



**39. Međunarodni kongres
o procesnoj industriji**
Negotin, 3. i 4. jun 2026.

ZBORNIK RADOVA **Proceedings**

ZBORNIK RADOVA

**pisanih za 39. Međunarodni kongres o procesnoj industriji
PROCESING '26**



2026.

ZBORNİK RADOVA
39. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji
(Negotin, 3. i 4. jun 2026)

IZDAVAČ

*Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS)
– Društvo za procesnu tehniku –
Kneza Miloša 7a/II, 11000 Beograd
2026. god.*

UREDNICI

V. prof. dr Nikola Karličić, mast. inž. maš.
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd
Prof. dr Marko Obradović, dipl. inž. maš.
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd
Prof. dr Miroslav Stanojević, dipl. inž. maš.
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd
Prof. dr Dejan Radić, dipl. inž. maš.
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

TIRAŽ

50 primeraka

CD UMNOŽAVA

SMEITS, Beograd

ISBN

978-86-85535-26-0

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

621(082)(0.034.2)

66.01(082)(0.034.2)

МЕЂУНАРОДНИ конгрес о процесној индустрији (39 ; 2026 ; Неготин)

Zbornik radova [pisanih za] 39. Međunarodni kongres o procesnoj industriji, [PROCESING '26], Negotin, 3. i 4. jun 2026 [Elektronski izvor] = Proceedings / [urednici Nikola Karličić ... [et al.]]. - Beograd : Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Društvo za procesnu tehniku, 2026 (Beograd : SMEITS). - 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemske zahteve: Nisu navedeni. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Tiraž 50. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-85535-26-0

a) Машинство -- Зборници b) Процесна индустрија -- Зборници

COBISS.SR-ID 197737481

Svi radovi su objavljeni pod licencom
CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
i dostupni za preuzimanje
<https://izdanja.smeits.rs/index.php/ptk>

Generalni pokrovitelj



Sponzori



Beograd



Beograd



Hrvatska



Beograd



Beograd



Beograd



Beograd



Beograd

Održavanje 39. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji
finansijski je pomoglo
Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja
i inovacija Republike Srbije
ugovorom broj 451-03-76/2026-03

**ORGANIZATOR
ORGANIZER**

Društvo za procesnu tehniku
pri Savezu mašinskih i elektrotehničkih inženjera
i tehničara Srbije (SMEITS),
Kneza Miloša 7a/II, 11000 Beograd
Tel. 011/3230-041, 3031-696, tel./faks 3231-372
E-mail: procesing@smeits.rs
www.procesing.smeits.rs

**SUORGANIZATOR
COORGANIZER**

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd,
Katedra za procesnu tehniku

ORGANIZACIONI ODBOR ORGANIZING COMMITTEE

Slavica Bogdanović	<i>Elixir Group</i>
Dr Mirjana Čujić	<i>Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratorija za hemijsku dinamiku i permanentno obrazovanje, Beograd</i>
Doc. dr Maja Đolić	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Dr Mladen Đurić	<i>Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd</i>
Doc. dr Miloš Ivošević	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Jelena Jolić	<i>Beo Čista Energija d.o.o., Beograd</i>
V. prof. dr Nikola Karličić	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd (predsednik)</i>
Dragan Mančić	<i>ANDRITZ TEP d.o.o. Ogranak Beograd</i>
Prof. dr Aleksandar Petrović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Doc. dr Jelena Ruso	<i>Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd</i>
Jelena Salević	<i>SMEITS, Beograd</i>
Alija Salkunić	<i>Elixir Group, Šabac</i>
Dr Zoran Simić	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Miroslav Stanojević	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Dušan Todorović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Branislav Todorović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Dušan Trajković	<i>Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd</i>

MEĐUNARODNI NAUČNI ODBOR INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Dr Martina Balać	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Aleksandar Dedić	<i>Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Maja Đolić	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Sandira Eljšan	<i>Univerzitet u Tuzli, Mašinski fakultet, Tuzla, Bosna i Hercegovina</i>
Dr Srbslav Genić	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Dušan Golubović	<i>Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Istočno Sarajevo, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina</i>
Dr Dijana Grgas	<i>Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno biološki fakultet, Zagreb, Hrvatska</i>
Dr Gorica Ivaniš	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Jelena Janevski	<i>Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Srbija</i>
Dr Aleksandar Jovović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Rade Karamarković	<i>Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija</i>
Dr Nikola Karličić	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Anes Kazagić	<i>„Elektroprivreda Bosne i Hercegovine“, Sarajevo, Bosna i Hercegovina</i>
Dr Katarina Knežević	<i>Venergi GmbH, Austrija</i>
Dr Atanas Kočov	<i>Univerzitet „Sv. Kiril i Metodij“, Mašinski fakultet, Skoplje, Severna Makedonija</i>
Dr Filip Kokalj	<i>Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet, Maribor, Slovenija</i>
Dr Tibela Landeka Dragičević	<i>Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno biološki fakultet, Zagreb, Hrvatska</i>
Dr Dorin Lelea	<i>University Politehnica Timisoara, Rumunija</i>
Dr Ljiljana Medić-Pejić	<i>Universidad Politécnica de Madrid Madrid, Španija</i>
Dr Sanja Milivojević	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Biljana Miljković	<i>Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija</i>
Dr Nenad Mitrović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Miloš Nikolić	<i>Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija</i>
Dr Nataša Nord	<i>Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norveška</i>
Dr Marko Obradović	<i>Mašinski fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija (predsednik)</i>
Dr Olga Petrov	<i>School of Construction and the Environment, British Columbia Institute of Technology, Canada</i>
Dr Andrija Petrović	<i>Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, Srbija</i>

Dr Milan M. Petrović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Darko Radenković	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Dejan Radić	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Ivona Radović	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Niko Samec	<i>Univerzitet u Mariboru, Mašinski fakultet, Maribor, Slovenija</i>
Dr Olivera Stamenković	<i>Univerzitet u Nišu, Tehnološki Fakultet, Leskovac, Srbija</i>
Dr Snežana Stevanović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Vladimir Stevanović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Dušan Todorović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija</i>
Dr Jasna Tolmač	<i>Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihailo Pupin“, Zrenjanin, Srbija</i>
Dr Radoje Vujadinović	<i>Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, Crna Gora</i>
Dr Igor Vušanović	<i>Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, Crna Gora</i>
Dr Nikola Živković	<i>Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd</i>

RECENZENTI / REVIEWERS

Prof. dr Miroslav Stanojević	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
V. prof. dr Nikola Karličić	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Marko Obradović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Dušan Todorović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Doc. dr Maja Đolić	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Mladen Đurić	<i>Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd</i>
Doc. dr Jelena Ruso	<i>Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd</i>
Dr Zoran Simić	<i>Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd</i>
Prof. dr Antonije Onjia	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
V. prof. dr Dragana Živojinović	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
V. prof. dr Nevena Prlainović	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Doc. dr Sanja Šešlija	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Dr Marina Maletić	<i>Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd</i>
Dr Katarina Antić	<i>Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd</i>
Dr Zorana Arsenijević	<i>Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd</i>
Dr Milena Milošević	<i>Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd</i>
Prof. dr Nikola Milašinović	<i>Kriminalističko-policijski Univerzitet, Departman forenzičkog inženjerstva, Beograd</i>
Prof. dr Ana Popović	<i>Akademija strukovnih studija Politehnika, Beograd</i>
Prof. dr Aleksandra Božić	<i>Akademija strukovnih studija Politehnika, Beograd</i>

POČASNI ODBOR / HONORARY COMMITTEE

Prof. dr Bratislav Blagojević	<i>SMEITS, Beograd</i>
Ljuba Stojčić	<i>Elixir Prahovo, Prahovo</i>
Prof. dr Vladimir Popović	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Mirjana Kijevčanin	<i>Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd</i>
Prof. dr Marko Mihić	<i>Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd</i>
Dr Slavko Dimović	<i>Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd</i>
Prof. dr Martin Bogner	<i>Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd</i>
Dejan Dotlić	<i>Kazantrade Solution, Beograd</i>
Vladimir Milovanović	<i>Beo Čista Energija, Beograd</i>
Veljko Todorović	<i>Grundfos Srbija, Beograd</i>
Nemanja Tubić	<i>Wilo, Beograd</i>
Zdravko Ivančić	<i>Numikon, Hrvatska</i>
Aleksandar Milosavljević	<i>Geotaur, Beograd</i>

PREDGOVOR

Procesna industrija ulazi u period velikih promena, u kome se od kompanija očekuje da proizvode efikasnije, smanje emisije, uvode obnovljive izvore energije i koriste digitalne alate.

Pred Vama je zbornik radova 39. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji - Procesing '26, kongresa koji već tradicionalno predstavlja ključnu tačku preseka naučne misli, tehnološkog razvoja i inženjerske prakse u procesnoj industriji.

39. Međunarodni kongres o procesnoj industriji Procesing '26, u organizaciji Društva za procesnu tehniku, pri Savezu mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), u saradnji sa Katedrom za procesnu tehniku Mašinskog fakulteta u Beogradu i pod generalnim pokroviteljstvom kompanije Elixir Prahovo - Elixir Group, održan je 3. i 4. juna 2026. u svečanoj sali La Moara u Negotinu, gde se uspešno organizuje drugu godinu zaredom. Kompanija Elixir Group je po treći put pokazala da je pouzdan partner u organizaciji Procesinga, ove i prethodne godine u Negotinu, a prvi put u Šapcu 2023. godine. Kompanija Elixir Group nije samo formalno bila pokrovitelj već je uzela učešće u kreiranju programa Procesinga i predložila teme, moderatore i učesnike panela. Pomoć u organizaciji Procesinga '26 dali su predstavnici drugih fakulteta i instituta iz Srbije, među kojima su predstavnici Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Fakulteta organizacionih nauka i predstavnici Institut za nuklearne nauke "Vinča".

Pored generalnog pokroviteljstva od strane Elixir Prahovo – Elixir Group, finansijsku podršku skupu obezbedile su sledeće institucije i kompanije:

- Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, Republika Srbija*
- Inženjerska komora Srbije,*
- Institut za nuklearne nauke „Vinča“,*
- Beo čista energija, Beograd,*
- Numikon, Zagreb,*
- Geotaur, Beograd,*
- Grundfos Srbija, Beograd,*
- Kazantrade Srbija, Beograd i*
- Wilo Beograd.*

Osnovni ciljevi Procesinga '26 su uspešno realizovani spajanjem nauke i industrije, kroz umrežavanje i stručno usavršavanje inženjera i istraživača u oblastima procesne tehnike, energetike, inženjerstva zaštite životne sredine i menadžmenta kvaliteta i standardizacije. Pored tradicionalne podrške razvoju novih inženjerskih rešenja, težište ovogodišnjeg skupa usmereno je ka održivosti, primeni obnovljivih izvora energije, smanjenju štetnih emisija i implementaciji principa cirkularne ekonomije. Uz jasnu viziju potpunog zatvaranja ciklusa od otpada do novog proizvoda, kongres trasira put ka ostvarivanju ciljeva održivog razvoja u procesnoj industriji. Ovakva razmena iskustava i definisanje pravaca daljih istraživanja predstavljaju direktan doprinos modernizaciji postojećih kapaciteta i zelenoj tranziciji domaće privrede.

Ovakav sveobuhvatan pristup stvara ključne preduslove za podizanje tehnološkog razvoja naše zemlje i uvođenje naprednih, ekološki odgovornih tehnologija. Da su ovi preduslovi već uveliko u fazi realizacije, svedoče upravo radovi sabrani u ovom Zborniku. Publikovana istraživanja jasno pokazuju da domaća naučna zajednica uspešno ide u korak sa globalnim trendovima, nudeći konkretna rešenja za transformaciju

tradicionalnih procesa i optimizaciju raspoloživih resursa. Ujedno, ovi tekstovi donose jasnu viziju o tome kako oblikovati novi inženjerski kadar, sposoban da iznese teret ove kompleksne zelene i tehnološke tranzicije.

Kongres Procesing '26 je organizovan prema pravilima definisanim za međunarodne skupove što određuje svrstavanje i kvantifikaciju radova autora. U Naučnom i Organizacionom odboru Procesinga '26 bili su uključeni predstavnici mašinskih, tehnoloških i drugih fakulteta iz Srbije (Beograda, Novog Sada, Niša, Leskovca, Kragujevca, Kraljeva i Zrenjanina), kao i iz zemalja regiona i sveta, u okviru kojih je oblast procesne tehnike zastupljena u nastavi i istraživanjima (Podgorica, Sarajevo, Tuzla, Skoplje, Zagreb, Temišvar, Maribor, Trondhajm, Madrid, Vankuver).

Pored naučnih i stručnih radova, program skupa su obogatili i paneli posvećena najaktuelnijim pitanjima procesne industrije, Industrija i veštačka inteligencija: od digitalne spremnosti do Industrije 5.0, zatim Industrija i klimatski zahtevi: smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte, monitoring i regulatorni okvir, kao i tradicionalni panel posvećen opremi pod pritiskom, kao jednoj od najvažnijih i najzahtevnijih oblasti procesne industrije. Učesnici su kroz pažljivo odabrane teme dobili konkretna znanja i jasne preporuke za unapređenje rada. Na ovim dinamičnim platformama za otvoreni dijalog, razmenu iskustava i kreiranje smernica za dalji razvoj sektora, učestvovali su vodeći stručnjaci iz industrije, predstavnici akademske zajednice, nadležnih ministarstava i vodećih domaćih i međunarodnih kompanija.

Kao i na prethodnom Procesingu, ovogodišnji skup je obogatio i sajamski prostor, gde je u izložbenom delu bio organizovan sajam opreme koja se koristi u procesnoj industriji, i koji je okupio brojne izlagače i učesnike.

Kongres je završen stručnom posetom učesnika skupa Industrijskom kompleksu Eliksira u Prahovu, odnosno Ogranku Eco Energy - Postrojenju za energetske iskorišćenje otpada u Prahovu, gde su imali priliku da se upoznaju sa skorim početkom rada postrojenja, savremenim procesima upravljanja i energetskog iskorišćenja otpada, kao i o standardima zaštite životne sredine koji se u njemu primenjuju. Takođe, učesnici skupa su imali priliku da obiđu i muzej, jedinstven u Srbiji, jer predstavlja svedočanstvo o izgradnji i razvoju jedne hemijske industrije od 1960. do danas.

*U Beogradu,
jula 2026.*

Predgovor

Energija u procesnoj industriji

1. **MODELIRANJE POGONSKE SILE ZA RAZMENU TOPLOTE U PLAMENOCEVNOM TOPLOVODNOM KOTLU SA TRI PROLAZA GASA**
Modeling the Driving Force for Heat Exchange in a Three-Pass Flame-Tube Hot Water Boiler
 Saša Stašević 15

Procesne tehnologije, operacije, aparati i mašine u procesnoj industriji

2. **BRZA IDENTIFIKACIJA NATRIJUM-POLIAKRILATA KAO SUPERAPSORBUJUĆEG POLIMERA ZASNOVANA NA TESTU GORENJA**
Burning Test-Based Rapid Identification of Sodium Polyacrylate as a Super-Absorbent Polymer
 Dragan Halas, Matilda Lazić, Aleksandar Dedić, Duško Salemović 23
3. **EKOLOŠKI PRIHVATLJIVA SINTEZA HIDROGELOVA AKRILAMIDA ZA KONTROLISANO OTPUŠTANJE AKTIVNIH SUPSTANCI**
Eco-Friendly Preparation of Acrylamide Hydrogels for Drug Delivery
 Maja D. Marković, Miloš Radovanović, Rada V. Pjanović 29
4. **UTICAJ HEMIJSKE STRUKTURE NA FARMAKOLOŠKU AKTIVNOST DERIVATA AKRIDIN-1,8-DIONA**
Structure-Activity Relationship Study of Acridine-1,8-Dione Derivatives
 Kristina Gak Simić, Luka Matović, Aleksandra Mašulović, Nemanja Trišović, Jelena Lađarević, Marija Dimitrijević, Ivana Đorđević, Anita Lazić 39
5. **EVALUACIJA UTICAJA RASTVARAČA NA POMERANJE APSORPCIONOG MAKSIMUMA AZO BOJA**
Solvent-Dependent Shifts in the Absorption Maxima of Azo Dyes
 Kristina Gak Simić, Luka Matović, Aleksandra Mašulović, Nemanja Trišović, Jelena Lađarević, Anita Lazić, Petar Jovanović, Marija Dimitrijević 47
6. **ANALIZA KINETIKE LUŽENJA BAKRA IZ KONCENTRATA SFALERITA POMOĆU MnO_2 -KI OKSIDACIONOG SISTEMA**
Kinetic Analysis of Copper Leaching from a Sphalerite Concentrate by the MnO_2 -Ki Leaching Oxidation System
 Dimitrije Anđić, Aleksandar Jovanović, Mladen Bugarčić, Vaso Manojlović, Nela Vujović, Corby Anderson, Miroslav Sokić 55
7. **ODREĐIVANJE UKUPNOG SADRŽAJA POLIFENOLA U EKSTRAKTIMA**
Determination of total Polyphenol Content in Extracts of Different Coffee Varieties and the Influence of Extraction Parameters
 Zdravka Jovanović, Nebojša Vasiljević, Vladan Mičić 63
8. **KOLIKO PLAMENOGASITELJI MENJAJU STABILNOST JEDNOBAZNIH BARUTA?**
How much Do Fire Retardants Affect the Stability of Single-Base Propellants?
 Mladen Bugarčić, Janko Živanić, Lazar Lapčević, Aleksandar Jovanović, Dimitrije Anđić, Anđela Simović, Jovica Nešić 77
9. **IDENTIFIKACIJA POLIMERNIH MATERIJALA I ELASTOMERA NA BAZI BRZIH METODA PROCENE GUSTINE I TESTA GORENJA**
Identification of Thermoplastic Polymer Materials Based on Floathing and Burning Test Methods
 Dragan Halas, Matilda Lazić, Aleksandar Dedić, Duško Salemović, Jelena Bera 85

10.	UTICAJ VISINE CENTRALNE CEVI NA HIDRODINAMIKU U FONTANSKOM SLOJU SA CEVNIM UMETKOM <i>Effect of Central Tube Height on Hydrodynamics i a Draft-Tube Spouted Fluid Bed</i> Dunja Šijaković, Katarina Šućurović, Tatjana Kaluđerović Radoičić, Nevenka Bošković-Vragolović	91
11.	NOVE AZO BOJE IZVEDENE IZ PIRIDONA: SINTEZA, STRUKTURNA KARAKTERIZACIJA I SOLVATOHROMNA SVOJSTVA <i>Novel Pyridone-Derived Azo Dyes: Synthesis, Structural Characterization, and Solvatochromic Properties</i> Luka Matović, Vojkan Stamenković, Dušan Mijin, Jelena Lađarević, Nemanja Trišović, Anita Lazić, Aleksandra Mašulović	99
12.	SINTEZA, KARAKTERIZACIJA I TAUTOMERIJA NOVE AZO BOJE NA BAZI OROTIČNE KISELINE <i>The Synthesis, Characterization, and Solvatochromic Properties of Novel Azo Dye Bearing Orotic Acid Core</i> Luka Matović, Vojkan Stamenković, Dušan Mijin, Jelena Lađarević, Nemanja Trišović, Anita Lazić, Aleksandra Mašulović	111
13.	OD REGRESIJE DO NEURONSKIH OPERATORA: PREGLED METODA MAŠINSKOG UČENJA U PROCESNOJ INDUSTRIJI <i>From Regression to Neural Operators: A Review of Machine Learning Methods in the Process Industry</i> Andrija Petrović	121

Projektovanje, izgradnja, eksploatacija i održavanje procesnih postrojenja

14.	UPRAVLJAČKI SISTEM ZA REGULACIJU RADA TANDEM EKSTRUZONE LINIJE <i>Control System for Regulating the Operation of the Tandem Extrusion Line</i> Igor Kocić, Saša S. Nikolić, Dragan S. Antić, Marko T. Milojković, Staniša Lj. Perić, Miroslav B. Milovanović, Nikola B. Danković	137
15.	NUMERIČKO-EKSPERIMENTALNI PRISTUP U PROCENI ČVRSTOĆE (INTEGRITETA) ELEMENATA PROCESNIH POSTROJENJA <i>Numerical and Experimental Approach in Evaluating the Strength (Integrity) of Structural Elements in Process Industry Plants</i> Ana Petrović	155
16.	STUDIJA SLUČAJA UPRAVLJANJA DEPONIJSKIM GASOM <i>Case Study of Landfill Gas Management</i> Marina Mihajlović, Ana Dajić	163
17.	ANALIZA TERMOTEHNIČKIH USLOVA U OBJEKTIMA ZA ODSUMPORAVANJE DIMNIH GASOVA BLOKOVA B1 I B2 TERMoeLEKTRANE „NIKOLA TESLA B“, OBRENOVAC <i>Analysis of Thermotechnical Conditions in Facilities for Flue Gas Desulfurization of Blocks B1 and B2 of the “Nikola Tesla B” Thermal Power Plant, Obrenovac</i> Đorđe Karić, Vladimir Jevtić, Mirko Komatina	171
18.	RASPOREĐIVANJE APARATA ZA GAŠENJE POŽARA U ZAVISNOSTI OD KLASJE POŽARA <i>Distribution of Fire Extinguishers According to Fire Classification</i> Ivan Arandelović, Nikola Tanasić, Radenko Rajić	179

Menadžment kvaliteta i standardizacija u organizacijama

19. **INTEGRISANI FILOZOFSKO KOMUNIKOLOŠKI PRISTUP UPRAVLJANJU KVALITETOM: HERMENEUTIKA, TEHNIKA I AKTERSKE MREŽE U POSTROJENJIMA ODRŽIVE ENERGETIKE**
Integrated Philosophical–Communicological Approach to Quality Management: Hermeneutics, Technology and Actor-Networks in Sustainable Energy Facilities
Andrea Ratković Novković 191
20. **FAKTORI KOJI UTIČU NA KVALITET USLUGE U MOBILNOM UČENJU: PLS-SEM PRISTUP**
Factors Influencing Service Quality in Mobile Learning: A PLS-SEM Approach
Lidija Krstić, Sanela Arsić, Aleksandra Radić, Isidora Milošević 203
21. **KVALITET TIMSKOG RAZVOJA I KOHEZIJE U HIBRIDNIM RADNIM OKRUŽENJIMA**
Quality of Team Development and Cohesion in Hybrid Work Environments
Snežana Nestić, Aleksandar Aleksić, Danijela Tadić, Strahinja Stijović 213
22. **PROCENA KVALITETA ERP REŠENJA KROZ PERFORMANSE SISTEMA: DOKAZI ZASNOVANI NA ANOVA ANALIZI IZ DISKRETNE I PROCESNE INDUSTRIJE**
Assessing ERP Solution Quality through System Performance: ANOVA-Based Evidence from Discrete and Process Industries
Aleksandra Radić, Sanela Arsić, Lidija Krstić 221
23. **STRATEŠKI MODELI I PERFORMANSE SA FOKUSOM NA BALANCED SCORECARD**
Strategic Models and Performance with a Focus on the Balanced Scorecard
Nedeljka Živković, Maja Glogovac, Biljana Tošić, Isidora Milošević, Sanela Arsić, Nedeljko Živković 229
24. **MEĐUSOBNI ODNOSI KAIZEN PRISTUPA I IT RESURSA U POBOLJŠAVANJU PROCESA U ORGANIZACIJI**
Relationship between the Kaizen Approach and IT Resources in Quality Improvement of Processes in an Organization
Milica Ljubojević, Mladen Đurić 237
25. **EFEKTIVNOST OBUKA IZVRŠILACA U SISTEMU MENADŽMENTA KVALITETA U MEDICINSKOJ I FARMACEUTSKOJ INDUSTRIJI**
Effectiveness of Employee Training in Quality Management Systems in the Medical and Pharmaceutical Industry
Nevena Krstajić, Mladen Đurić 265
26. **PRIMENA ISO/IEC 42001 U PROCESNOJ INDUSTRIJI: UPRAVLJANJE VEŠTAČKOM INTELIGENCIJOM U FUNKCIJI ODRŽIVOG RAZVOJA**
Applying ISO/IEC42001 in Process Industry: AI Governance for Sustainable Development
Nikola Vojtek, Vladan Pantović 275
27. **MODERNIZACIJA OBRAZOVNOG PROFILA „TEHNIČAR GREJANJA I KLIMATIZACIJE” U SKLADU SA ZAHTEVIMA PROCESNE INDUSTRIJE**
Modernization of the Educational Profile “Heating and Air Conditioning Technician” in Accordance with the Requirements of the Process Industry
Milica Gerasimović, Snežana Bećirić 283

28.	PRIMENA PRAVILA ODLUČIVANJA NA PRIMERU ISPITIVANJA VENTILA SIGURNOSTI PREMA ILAC G8:09/2019	
	<i>Application of Decision Rules to Safety Valve Testing in Accordance with ILAC G8:09/2019</i>	
	Dejan Radić	291

**Inženjerstvo životne sredine i održivi razvoj
u procesnoj industriji, cirkularna ekonomija**

29.	KAKO EVROPSKA POLITIKA OBLIKUJE BUDUĆNOST PROCESNE TEHNIKE	
	<i>How European Policy Shapes the Future of Process Engineering</i>	
	Miloš Ivošević, Nikola Karličić, Branislav Gajić, Nikola Budimir	301
30.	PRIMENA NOVE EU DIREKTIVE O KVALITETU VAZDUHA I PROCENA PREKORAČENJA PM2.5 U SRBIJI: IMPLIKACIJE NA GODIŠNJU KLASIFIKACIJU ZAGAĐENJA	
	<i>Application of the New EU Air Quality Directive and Assessment of PM2.5 Exceedances in Serbia: Implications for Annual Air Pollution Classification</i>	
	Aleksandar Madžarević, Miroslav Crnogorac, Filip Miletić	305
31.	ISPITIVANJE MOGUĆNOSTI OBEZBOJAVANJA RASTVORA BOJE REACTIV BLUE 5 U MIKROREAKTORSKOM SISTEMU	
	<i>Investigation of the Potential for Reactive Blue 5 Dye Solution Decolorization in Microreactor Systems</i>	
	Ana Dajić, Marina Mihajlović	317
32.	MOGUĆNOST VALORIZACIJE PEPELA SUNCOKRETOVE LJUSKE U PROIZVODNJI MINERALNIH GRANULISANIH ĐUBRIVA U SKLADU SA PRINCIPIMA CIRKULARNE EKONOMIJE	
	<i>Possibility of Sunflower Husk Ash Valorization in the Production of Mineral Granulated Fertilizers in Accordance with the Principles of Circular Economy</i>	
	Alija Salkunić, Dejan Todorović, Nikola Belobaba, Julijana Bogićević, Slavica Bogdanović	325

Originalni naučni rad <https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.015>

Ključne reči:
prenos toplote;
kotlovi;
energetika

MODELIRANJE POGONSKE SILE ZA RAZMENU TOPLOTE U PLAMENOCEVNOM TOPLOVODNOM KOTLU SA TRI PROLAZA GASA

Key words:
heat transfer; boilers;
energy systems

MODELING OF THE DRIVING FORCE FOR HEAT TRANSFER IN A THREE-PASS GAS FIRE-TUBE HOT-WATER BOILER

Saša STASEVIĆ*
* sasa.stasevic2@gmail.com
Mirjana STAMENIĆ

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0009-0004-9071-3748
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-7163-8584

Modeliranje pogonske sile za razmenu toplote u plamenocevnim toplovodnim kotlovima sa tri prolaza gasa predstavlja ključni korak za razumevanje, projektovanje i analizu ovakvih sistema. Na ovaj način dobija se matematički opis transporta toplote sa jasnim uvidom u temperaturne profile dimnih gasova sa cevne i vode sa međucevne strane. Analitičko modeliranje daje mogućnost da se u odsustvu preciznih modela i eksperimentalnih rezultata dobiju okvirni trendovi, identifikuju parametri i granice sistema bez kompleksnih i dugih simulacija. Dobijeni rezultati pružaju osnovu za procenu efikasnosti kotla, određivanje potrebnog protoka vode i optimizaciju konstrukcije za različite kapacitete. Ovaj pristup se pokazuje kao pogodan alat za unapređenje energetske efikasnosti, sigurnosti i pouzdanosti toplovodnih kotlova, kao i za razvijanje kriterijuma koji olakšavaju projektovanje i kontrolu rada u praksi.

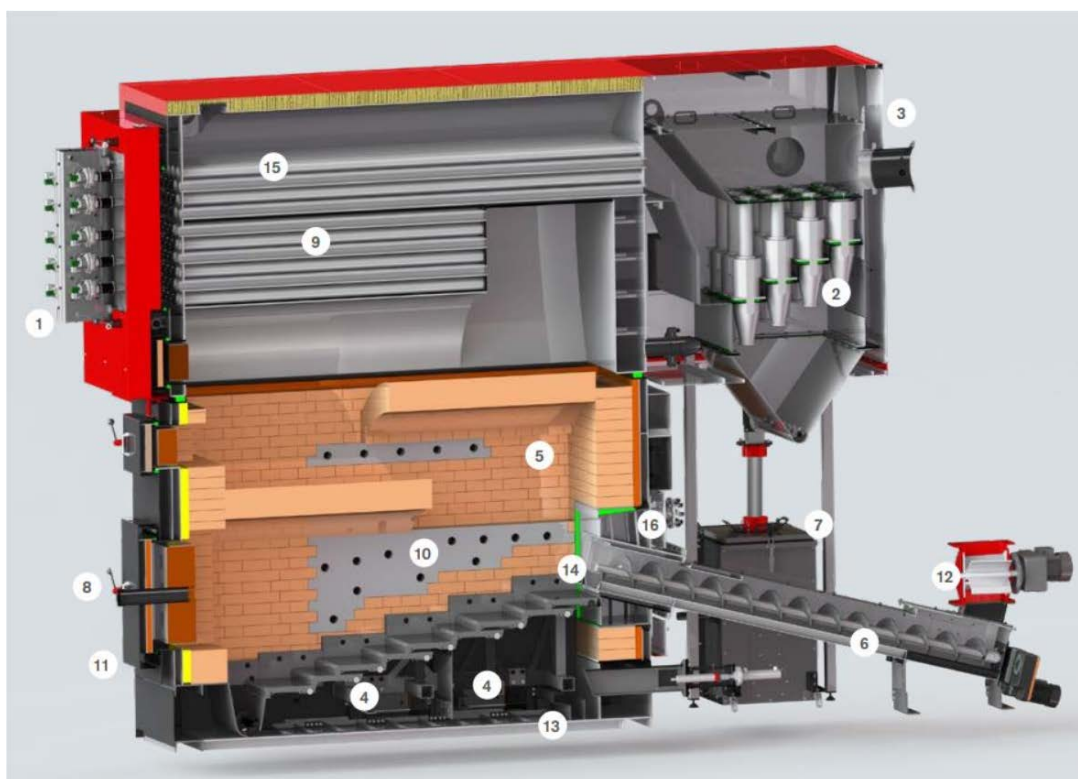
Modeling the driving force for heat exchange in fire-tube hot-water boilers with three gas passes represents a key step in understanding, designing, and analyzing such systems. In this way, a mathematical description of the heat transfer process is obtained, providing clear insight into the temperature profiles of flue gases on the tube side and water on the shell side. Analytical modeling makes it possible, even in the absence of precise models and experimental results, to determine general trends, identify parameters, and establish system boundaries without complex and time-consuming simulations. The obtained results form the basis for assessing boiler efficiency, determining the required water flow, and optimizing the design for different capacities. This approach proves to be a suitable tool for improving the energy efficiency, safety, and reliability of hot-water boilers, as well as for developing criteria that facilitate practical design and operational control.

1. Teorijski uvod

Cilj ovog rada je razvoj matematičkog modela pogonske sile za razmenu toplote u plamenocevnom toplovodnom kotlu sa tri prolaza gasa. Model se zasniva na postavljanju bilansa energije na elementarnoj zagreivnoj površini dS za svaki prolaz posebno. Pretpostavke za ovaj model su u skladu sa pretpostavkama koje su uveli Fischer (1938) i Hausen (1983): konstantan koeficijent prolaza toplote, konstantna vrednost specifičnih toplotnih kapaciteta toplijeg i hladnijeg fluida i stacionarnost strujanja. Analitičkim rešavanjem dobijenog sistema linearnih diferencijalnih jednačina izvedeni su izrazi za temperaturne profile produkata sagorevanja (topliji fluid) - $t'(S)$, $t''(S)$ i $t'''(S)$ duž razmenjivačke površine. Dobijeni model omogućava direktno određivanje izlaznih temperatura iz

svakog prolaza (označeni kao t' , t'' i t'''), raspodele toplotnog opterećenja i lokalne pogonske sile kao funkcije bezdimenzionog parametra površine.

Plamenocevni toplovodni kotlovi sa tri prolaza gasa široko su zastupljeni u sistemima daljinskog grejanja i industrijskim postrojenjima zbog kompaktnosti konstrukcije i visokog stepena iskorišćenja goriva[1]. Na slici 1, prikazan je kotao sa svojim elementima.



Slika 1. 3D model kotla Magno-SR 999 proizvođača „Hargassner“ sa označenim delovima (1 – sistem za pneumatsko čišćenje cevi; 2 – multiciklon; 3 – izlaz dimnih gasova; 4 – dovod primarnog vazduha za sagorevanje; 5 – dovod sekundarnog vazduha za sagorevanje; 6 – pužni dozirator goriva; 7 – kontejner za pepeo; 8 – vrata za ulaz u ložište; 9 – cevni snop za razmenu toplote konvekcijom; 10 – ložište kotla sa ozračenim površinama; 11 – sistem za odvod pepela; 12 – sigurnosna klapna za zaštitu od povratnog plamena; 13 – odvod propadnog pepela ispod rešetke; 14 – automatsko paljenje goriva; 15 – rezervni cevni snop u konvektivnom delu; 16 – sistem za vodeno hlađenje rešetke.) [2]

2. Postavka modela

Razmatrani sistem je plamenocevni toplovodni kotao u kome produkti sagorevanja (strana cevi) i voda (međucevna strana) razmenjuju toplotu preko zagrevne površine cevi većeg promera u prvom prolazu i površine cevni snopova u preostala dva prolaza.

Osnova modela zasnovana je na bilansiranju energetskih tokova po uzoru na pristup koji je postavio Fisher [3], čiji je cilj bio uspostavljanje analitičkog rešenja za korekcionni faktor razmenjivača sa više od jednog prolaza sa strane cevi i u međucevnom prostoru.

U njegovom radu prikazan je postupak modeliranja i početne pretpostavke, dok je u ovom radu fokus dat na proširenje Fisherovog modela sa ciljem dobijanja temperaturnog profila u funkciji bezdimenzionog parametra ζ koji se definiše kao odnos površine u bilo kom delu razmenjivača S i ukupne površine $S_{uk}(1)$.

$$\xi = \frac{S}{S_{uk}} \quad (1)$$

gde su:

S_{uk}, m^2 – ukupna površina za razmenu toplote,

S, m^2 – površina za razmenu u bilo kom delu razmenjivača toplote,

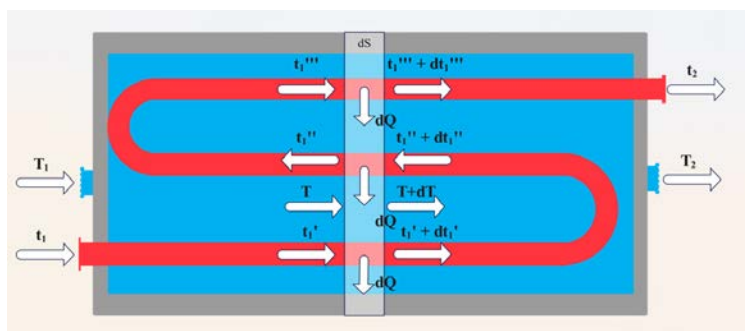
ξ , – bezdimenziona veličina koja predstavlja odnos površine S ukupne površine za razmenu toplote S_{uk} .

Produkti sagorevanja ulaze u kotao na temperaturi t_l i prolaze kroz tri uzastopna prolaza pre nego što napuste kotao, menjajući smer strujanja u skretnim komorama (sa prednje i zadnje strane kotla). Voda ulazi u kućište kotla na temperaturi T_1 i napušta ga na temperaturi T_2 , zagrevajući se preko celokupne zagrevne površine.

Model se razvija uz sledeće pretpostavke[3][4]:

- ukupni koeficijent prolaza toplote k konstantan je duž celokupne površine za razmenu,
- specifični toplotni kapacitet produkata sagorevanja c_{p1} i vode c_{p2} su konstantne vrednosti,
- svaki fluid je idealno izmešan, temperatura je uniformna po poprečnom preseku,
- fluidi (voda i produkti sagorevanja) stacionarno struje,
- toplotni gubici u okolinu su zanemarljivi,
- transport toplote između pojedinih prolaza kroz skretne komore je zanemarljiv,
- ne dolazi do isparavanja vode,
- zagrevna površina jednako je raspoređena između sva tri cevna prolaza.

Slika 2 prikazuje šematski presek plamenocevnog kotla sa tri prolaza gasa i grafičku osnovu matematičkog modela. Bezdimenzioni parametar razmenjivačke površine (ξ) je definisan kao odnos površine u bilo kom delu aparata i ukupne površine. Vrednosti koje ξ uzima su $\xi = 0$ čime je predstavljen uslov za temperature gasa i vode na ulazu, T_1 i t_1 , dok je za $\xi = 1$ definisana ukupna površina razmenjivača toplote ali i dužinu na kojoj se javlja promena smera strujanja, odnosno vrednosti temperature gasa i vode na izlazu, t_2 i T_2 .



Slika 2. Ilustrovan prikaz vrelovodnog kotla sa tri prolaza produkata sagorevanja kroz cevni deo i prolaza vode kroz međucevni prostor

Na slici 2 su prikazane sve relevantne termičke veličine sistema. Temperatura vode na strani međucevnog prostora označena je sa T , a njena vrednost na elementu površine $d\xi$ menja se za dT , dostižući vrednost $T + dT$ na izlaznoj strani elementa. Produkti sagorevanja prolaze kroz tri odvojena prolaza čije su temperature označene redom t_1' , t_1'' i t_1''' u zavisnosti od prolaza. Na ulazu u posmatrani element, temperature gasa u pojedinim prolazima iznose t_1' , t_1'' i t_1''' , dok su izlazu iz posmatranog bilansnog elementa te veličine označene $t_1' + dt_1'$, $t_1'' + dt_1''$ i $t_1''' + dt_1'''$. [3]

Posebno je važno uočiti razliku u smerovima strujanja dimnih gasova između prolaza, što je na slici prikazano strelicama unutar cevi.

Gas u prvom prolazu (t_1') i trećem prolazu (t_1''') teče u smeru porasta parametra ξ [$0 \rightarrow 1$] s leva na desno. Gas u drugom prolazu (t_1'') teče u suprotnom smeru, s desna na levo.

2.1. Izvođenje diferencijalnih jednačina iz energetskog bilansa

Pisanjem bilansa energije na elementarnoj razmenjivačkoj površini dS za svaki prolaz posebno, uz pretpostavku stacionarnog strujanja fluida i zanemarljivih toplotnih gubitaka, dobija se sistem diferencijalnih jednačina.

Bezdimenzioni parametar $d\xi$ definiše odnos elementarne površine dS prema ukupnoj površini S_{uk} , definisan je izrazom (2), čime se omogućava jedinstveno skaliranje i poređenje temperaturnih profila po prolazima. Diferencijalne jednačine za svaki prolaz date su u izrazima (3) - (5).

$$d\xi = \frac{dS}{S_{uk}} \quad (2)$$

Za prvi prolaz, gas struji u smeru porasta ξ , temperatura se snižava predajući toplotu vodi:

$$\dot{m}_1 c_{p1} \frac{dt'}{d\xi} = k S_{uk} (T(\xi) - t') \quad (3)$$

Za drugi prolaz, gas struji u smeru opadanja ξ (protivstrujni tok), što uvodi negativan predznak na levoj strani jednačine:

$$-\dot{m}_1 c_{p1} \frac{dt''}{d\xi} = k S_{uk} (T(\xi) - t'') \quad (4)$$

Za treći prolaz, gas ponovo teče u smeru porasta ξ , te je jednačina oblika istog kao za prvi prolaz:

$$\dot{m}_1 c_{p1} \frac{dt'''}{d\xi} = k S_{uk} (T(\xi) - t''') \quad (5)$$

gde su:

- t_1 , °C – temperatura gasa (produkata sagorevanja) na ulazu u kotao,
- m_1 , kg/s – maseni protok gasa,
- c_{p1} , J/(kg·K) – specifični toplotni kapacitet gasa,
- k , W/(m²·K) – ukupni koeficijent prelaza toplote,
- S_{uk} , m² – ukupna površina za razmenu toplote,
- ξ , – bezdimenziona veličina koja predstavlja odnos površine S ukupne površine za razmenu toplote S_{uk} .

Ukupna količina toplote predata vodi na površini $d\xi$ jeste zbir doprinosa iz sva tri prolaza, što odgovara šemi datoj na slici 2 sa strelicama dQ .

Bilans energije na strani vode je prikazan jednačinom (6):

$$\dot{m}_2 c_{p2} \frac{dT}{d\xi} = k S_{uk} [(T - t_1') + (T - t_1'') + (T - t_1''')] \quad (6)$$

gde su:

- t' , t'' i t''' , °C – temperatura produkata sagorevanja u svakom prolazu,
- T_1 , °C – temperatura vode na ulazu u kotao,
- T_2 , °C – temperatura vode na izlazu iz kotla,
- m_2 , kg/s – maseni protok vode,
- c_{p2} , J/(kg·K) – specifični toplotni kapacitet vode,
- k , W/(m²·K) – ukupni koeficijent prenosa toplote,
- S_{uk} , m² – ukupna površina za razmenu toplote.

Sistem od četiri spregnute linearne diferencijalne jednačine (3) – (6), čini matematičku osnovu modela. Rešavanjem ovog sistema uz odgovarajuće granične uslove dobijaju se analitički izrazi za temperaturne profile $t_1'(\xi)$, $t_1''(\xi)$, $t_1'''(\xi)$ i $T(\xi)$, koji su predmet narednog poglavlja. [3]

3. Postupak modeliranja

Polazni sistem od četiri spregnute diferencijalne jednačine (3) – (6) nije moguće rešavati izolovano po prolazima, jer sve četiri jednačine sadrže temperaturu vode $T(\xi)$ kao nepoznatu funkciju. Metoda rešavanja počinje eliminacijom temperatura gasa, a zatim se sabiranjem jednačina za sva tri prolaza dobija jednačina koja sadrži samo $T(\xi)$. Na ovaj način se dobija diferencijalna jednačina drugog reda (7).

$$\frac{d^2 T}{d\xi^2} - 3 \frac{kS_{uk}}{m_2 c_{p2}} \frac{dT}{d\xi} + \frac{k^2 S_{uk}^2}{(m_1 c_{p1})^2} \left(\frac{1-R_1}{R_1} \right) T = \frac{k^2 S_{uk}^2}{(m_1 c_{p1})^2} \left[\frac{t_2}{R_1} - T_1 \right] \quad (7)$$

gde su:

- t_2 , °C – temperatura gasa (produkata sagorevanja) na izlazu iz kotla,
- T_1 , °C – temperatura vode na ulazu u kotao,
- T_2 , °C – temperatura vode na izlazu iz kotla,
- m_1 , kg/s – maseni protok produkata sagorevanja (gasa),
- m_2 , kg/s – maseni protok vode,
- c_{p1} , J/(kg·K) – specifični toplotni kapacitet produkata sagorevanja,
- c_{p2} , J/(kg·K) – specifični toplotni kapacitet vode,
- k , W/(m²·K) – ukupni koeficijent prelaza toplote,
- S_{uk} , m² – ukupna razmenjivačka površina.

Sabiranjem levih i desnih strana jednačina za sva tri prolaza, uz uvođenje toplotnog ekvivalenta R_1 (8):

$$R_1 = \frac{m_2 c_{p2}}{m_1 c_{p1}} \quad (8)$$

Uzimajući u obzir da promena temperature vode duž razmenjivačke površine mora biti konzistentna sa ukupno predatom toplotom, dobija se linearna diferencijalna jednačina drugog reda za $T(\xi)$.

Ova jednačina ima karakteristične korene r_1 i r_2 koji su dati izrazom (10) dok je homogeno i partikularno rešenje prikazano izrazima (11) i (12) respektivno:

$$A = \frac{kS_{uk}}{m_2 c_{p2}} \quad (9)$$

$$r_{1,2} = \frac{A}{2} \left(3 \pm \sqrt{9 - 4R_1(1 - R_1)} \right) \quad (10)$$

$$T_h(\xi) = C_1 e^{r_1 \xi} + C_2 e^{r_2 \xi} \quad (11)$$

$$T_p = \frac{t_1 - R_1 T_2}{1 - R_1} \quad (12)$$

Fizički smisao korena r_1 i r_2 predstavlja koliko brzo se odvija promena temperature duž razmenjivačke površine.

Opšte rešenje diferencijalne jednačine drugog reda za $T(\xi)$ jeste:

$$T_h(\xi) = C_1 e^{r_1 \xi} + C_2 e^{r_2 \xi} + \frac{t_1 - R_1 T_2}{1 - R_1} \quad (13)$$

Konstante integracije C_1 i C_2 određuju se iz poznatih graničnih uslova ulazne temperature vode T_1 na $\xi = 0$ i izlazne temperature vode T_2 na $\xi = 1$.

Rešenje diferencijalne jednačine (13) za promenu temperature vode u međucevnom prostoru $T(\xi)$, uvrštava se u diferencijalne jednačine za svaki prolaz (3) – (5). Jednačine za t' , t'' i t''' tada dobijaju oblik linearnih diferencijalnih jednačina prvog reda sa članovima eksponencijalnog oblika i date su jednačinama (14) – (16):

$$\frac{dt'}{d\xi} = \gamma (C_1 e^{r_1 \xi} + C_2 e^{r_2 \xi} + T_p - t') \quad (14)$$

$$-\frac{dt''}{d\xi} = \gamma (C_1 e^{r_1 \xi} + C_2 e^{r_2 \xi} + T_p - t'') \quad (15)$$

$$\frac{dt'''}{d\xi} = \gamma (C_1 e^{r_1 \xi} + C_2 e^{r_2 \xi} + T_p - t''') \quad (16)$$

Pri čemu je $\gamma = \frac{kS_{uk}}{m_1 c_{p1}}$

Svaka od ovih jednačina sada ima poznatu desnu stranu, član sadrži $T(\xi)$ koji je već određen, a jedina nepoznata je temperatura gasa u odgovarajućem prolazu. Ovo je ključni korak u pristupu rešavanja, sada se rešavaju tri nezavisne jednačine prvog reda.

4. Rezultati

U tabeli 1 su prikazani rezultati analitičkog modela cevnog razmenjivača toplote sa tri prolaza produkata sagorevanja, pri čemu su obuhvaćeni osnovni termodinamički parametri procesa – temperature produkata sagorevanja (gasa) na ulazu i izlazu iz svakog prolaza, kao i količina razmenjene toplote. Ovi podaci omogućavaju uvid u promenu temperature toplijeg fluida duž razmenjivačke površine i količinu toplote u jedinici vremena za svaki od prolaza, što je ključno za razumevanje efikasnosti troprolazne konfiguracije.

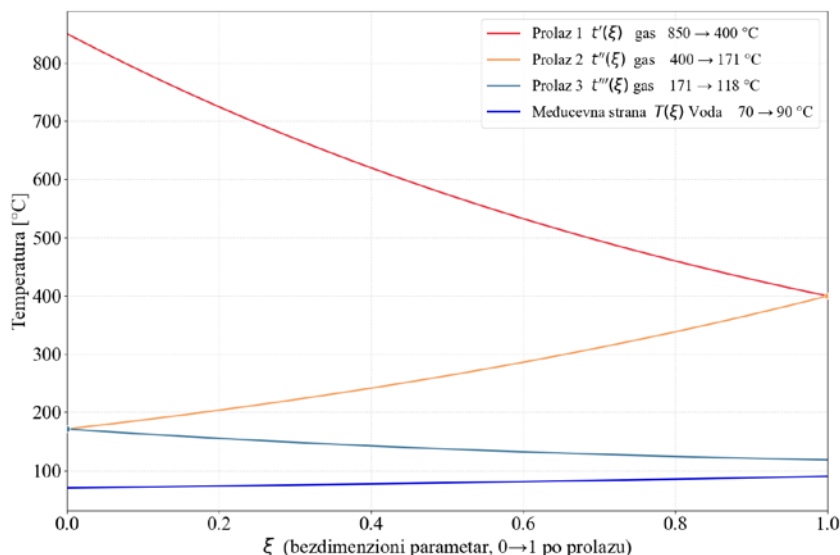
Tabela 1: Prikaz dobijenih vrednosti izlazne temperature gasa i količine razmenjene toplote u jedinici vremena primenom modela

Prolaz	$t'_1(\xi), t''_1(\xi), t'''_1(\xi)$ temperatura gasa na ulazu u prolaz [°C]	$t'_2(\xi), t''_2(\xi), t'''_2(\xi)$ temperatura gasa na izlazu iz prolaza [°C]	Q [kW]
Prolaz 1 (gas →, $\xi: 0 \rightarrow 1$)	850	399,7	390,3
Prolaz 2 (gas ←, $\xi: 1 \rightarrow 0$)	399,7	171,2	198,1
Prolaz 3 (gas →, $\xi: 0 \rightarrow 1$)	171,2	118,2	45,9
Ukupno			634,3

Iz prikazanih vrednosti u tabeli 1 jasno se uočava da je najveća razlika temperature i najveća količina razmenjene toplote u prvom prolazu, dok se u drugom prolazu proces nastavlja manjim intenzitetom. Treći prolaz pokazuje relativno mali doprinos ukupnoj razmenjenoj količini toplote u

jedinici vremena, ali je neophodan za postizanje krajnje izlazne temperature gasa od 118,2°C. Ukupno, troprolazna konfiguracija obezbeđuje toplotnu snagu od 634,4 kW.

Na osnovu rezultata koji su prikazani u Tabeli 1, na slici 3 je dat grafički prikaz, gde se jasno uočava tok hlađenja produkata sagorevanja u tri uzastopna prolaza, što vizuelno potvrđuju numeričke vrednosti izlaznih temperatura i količine razmenjene toplote.



Slika 3. Dijagram promene temperature produkata sagorevanja i vode u funkciji ξ

Dijagram na slici 3 prikazuje promenu temperature toplijeg fluida duž razmenjivačke površine u prvom (crvena), drugom (žuta) i trećem (zeleno-plava), kao i promenu temperature hladnijeg fluida (voda) – linija plave boje

Krive temperaturnih profila dimnih gasova jasno pokazuju značajno sniženje temperature u prvom prolazu (850°C → 399,7°C), zatim nastavak hlađenja u drugom prolazu (399,7°C → 171,2°C), dok treći prolaz ima završnu ulogu u postizanju krajnje izlazne temperature (171,2°C → 118,2°C). Četvrta kriva, prikazana plavom bojom pri dnu dijagrama, ilustruje zagrevanje vode u kotlu, koja se zagreva od 70 do 90°C.

5. Zaključak

Rezultati dobijeni pomoću razvijenog matematičkog modela ukazuju da se u stacionarnim uslovima rada u prvom prolazu preda najveća količina toplote sa produkata sagorevanja koji struje sa cevne strane, na vodu u međucevnom prostoru.

Razmenjena količina toplote u prvom prolazu odgovara promeni temperature sa ulaznih 850°C na 399,7°C koliko iznosi temperatura dimnih gasova na izlazu iz prvog prolaza. U drugom prolazu temperatura pada od početnih 399,7°C na 171,2°C dok se u trećem prolazu razmeni najmanja količina toplote, stoga temperatura na ulazu u treći prolaz iznosi 171,2°C dok je na izlazu iz trećeg prolaza, odnosno iz kotla, 118,2°C.

Ukupna snaga koju ova konfiguracija obezbeđuje iznosi 634,4 kW. Ovaj model omogućava proračun temperatura u svakom delu razmenjivačke površine bez upotrebe složenih i skupih softverskih paketa ili upotrebom skupih mernih instrumenata. Takođe može poslužiti kao osnova za razvoj dinamičkih modela.

6. Reference

- [1] **Elmas, E.T.**, *Three – Pass Fire Tube Boilers for production of Steam, Hot Water and Super-heated Water*, Global Journal of Research in Engineering & Computer Sciences, Volume 04, Issue 04, pp. 29-30, Town, India, 2024.
- [2] *****Hargassner** *INDUSTRIAL HEATING SYSTEMS*, Wood Chip / Pellet boilers 250 - 2,500 kW, Hargassner Industry GmbH, 08.2020
- [3] **Fischer, F.K.**, Mean Temperature Difference Correction in Multipass Exchangers, PM. Sc.thesis, University of Pittsburgh, Town, USA, 1937.
- [4] **Hausen, H.**, Heat Transfer in Counterflow Parallel Flow and Cross Flow, New Jersey, United States of America, 1983.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.023>

Ključne reči:

*natrijum-poliakrilat; superapsorbujući
polimeri; napredni polimerni
materijali; test sagorevanja; procena
tipa polimera*

Key words:

*sodium polyacrylate; super-absorbent
polymers; advanced polymer
materials; burning test, assessment of
polymer type*

Matilda LAZIĆ*

* matildalazic@outlook.com

Dragan HALAS

Aleksandar DEDIĆ

Duško SALEMOVIĆ

BRZA IDENTIFIKACIJA NATRIJUM-POLIAKRILATA KAO SUPERAPSORBUJUĆEG POLIMERA ZASNOVANOG NA TESTU GORENJA

BURNING TEST-BASED RAPID IDENTIFICATION OF SODIUM POLYACRYLATE AS A SUPER-ABSORBENT POLYMER

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Srbija
ORCID: 0009-0000-9174-554X

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Srbija
ORCID: 0009-0005-1426-0326

Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0001-6120-6414

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Srbija

U ovom radu ispitivana je mogućnost primene testa gorenja kao brze metode za identifikaciju natrijum-poliakrilata koji se koristi kao superapsorbujući polimer (SAP). Uzorci superapsorbujućeg sloja (koji sadrži granule natrijum-poliakrilata) ispitivani su kao funkcionalni deo higijenskih uložaka. Pretpostavljeno je da se primenom testa gorenja na uzorcima, koji predstavljaju proizvod sa kristalima za koje se, na osnovu podataka proizvođača, smatra da su natrijum-poliakrilat, može izvršiti preliminarna potvrda toga. Takođe je pretpostavljeno da prisustvo aditiva u polimernom materijalu na bazi natrijum-poliakrilata, kao i drugih polimernih ili nepolimernih materijala prisutnih u proizvodu formiranom od superapsorbujućeg sloja (koji čini funkcionalnu celinu sa ostalim slojevima higijenskih uložaka i ne može se u potpunosti odvojiti od njih), utiče na odstupanje njihovog ponašanja tokom ispitivanja u odnosu na literaturne podatke. Dobijeni rezultati su u skladu sa ograničenjima primenjene metode i predstavljaju preliminarnu procenu vrste polimernog materijala od kojeg je izrađen superapsorbujući sloj ispitivanih uzoraka higijenskih uložaka. Dobijeni rezultati potvrdili su postavljene pretpostavke. Ova se objašnjava prisustvom dodatka natrijum-poliakrilatu, kao i prisustvom drugih polimera i/ili nepolimernih materijala u ispitivanim uzorcima. Rezultati mogu ukazivati na to da je osnova superapsorbujućeg sloja, koji čini funkcionalnu celinu sa ostalim slojevima u strukturi komercijalno ispitivanih higijenskih uložaka, polimerni materijal na bazi natrijum-poliakrilata. Zahvaljujući svojim svojstvima, natrijum-poliakrilat omogućava formiranje gela, odnosno ostvarivanje funkcije „zaključavanja“ apsorbovane tečnosti u ispitivanim higijenskim ulošcima i, posledično, njihovu efikasnost.

In this work, the possibility of applying the burning test as a quick method for the identification of sodium polyacrylate used as super-absorbent polymer (SAP) was investigated. Samples of the super absorbent layer (containing sodium polyacrylate granules) were tested as a functional part of sanitary pads/napkins. It was assumed that by applying the burning test to the samples, which are a product with contained crystals that were considered to be sodium polyacrylate - based on the manufacturer's data; can make a preliminary confirmation of the same. The obtained results are in accordance with the limitations of the used method and represent a preliminary assessment of the type of polymer material from which the super-absorbent layer of the tested samples of sanitary pads/napkins is made. The obtained results confirmed the assumptions. The phenomenon is explained

by the presence of additions to sodium polyacrylate, as well as the presence of other polymers and/or non-polymer materials in the examined samples. The results may indicate that the basis of the super-absorbent layer, which forms a functional unit with other layers in the structure of commercially tested sanitary pads/napkins; is a polymer material based on sodium polyacrylate.

1. Introduction

Super-absorbent polymers (SAPs) are advanced materials that have a cross-linked tree-dimensional network structure, which endows attractive properties for a wide range of applications including daily hygiene, agriculture, construction, food and health care, among others. In recent years, there has been a huge demand for new materials that could be used as drug carriers in an alternative treatment to existing and emerging diseases for drug delivery. Since their unique structure gives them the ability to absorb and retain aqueous solutions up to 1000 times their own weight [1,2].

Sodium polyacrylate is a highly versatile SAP renowned for its extraordinary water and fluid absorption capacity, making it indispensable across industries from medical ice packs and wastewater treatment to sludge solidification, drilling fluids, and mining operations. Its ability to control moisture, stabilize waste, and enhance process efficiency supports both environmental sustainability and cost reduction [3, 4].

Sodium polyacrylate is a SAP vital in hygiene products like diapers, sanitary pads, and adult incontinence items, where it rapidly absorbs and locks away liquid, keeping skin dry, comfortable, and reducing irritation by forming a gel. It's also used in medical dressings for wound exudate and pet pads for odor control, leveraging its exceptional water retention to manage fluids and maintain hygiene. Feminine Hygiene - in sanitary napkins: it provides high absorption capacity for menstrual fluids, ensuring a feeling of dryness and comfort [5].

Rapid methods for the identification of polymeric materials are simple tests that do not require a standardized method and procedure of sample preparation or the latest generation testing equipment. In this way, they allow only an assessment or a preliminary determination of the type of polymer material from which the examined samples were made [6,7]. They are applicable exclusively, in the conditions when only the evaluation of the type of polymer material is sufficient or in the case of determining guidelines for the application of the so-called final methods of analysis.

In this paper, the possibility of applying the burning test as a quick method for the identification of sodium polyacrylates used as super absorbent (absorption) polymers was examined. Samples of the super absorbent layer (containing granules of sodium polyacrylate) were tested as a functional part of sanitary napkins. It was assumed that by applying the burning test to the samples, which are a product with contained crystals that were considered to be sodium polyacrylate - based on the manufacturer's data; can make a preliminary confirmation of the same. It was also assumed that the presence of additives in the polymer material based on sodium polyacrylate, as well as other polymers/non-polymer materials, present in the super absorbent layer formed by the manufacturer (which forms a functional unit with the other layers of sanitary napkins) influence the deviation of their behavior during the selected test; in relation to literature data [6-9].

2. Experimental part

2.1. Material

The series of 5 samples of sanitary napkins was used for testing. Samples of sanitary napkins were examined: 4 foreign and 1 domestic manufacturer, commercially available (in appropriate, hy-

gienic packaging) on the market of the Republic of Serbia. Taking into account the fact that commercially available sanitary pads, in terms of layered materials, consist of functionally connected layers (upper: soft natural material that receives liquid; distribution: distributes the received liquid towards the inside of the pad; super absorbent layer: made of sodium polyacrylate that gels the liquid; lower: prevents unexpected spillage of the gel) [5] and consequently, in order to enable the application of the chosen test method, a series of samples was prepared adequate for the given case. The layers are mechanically separated, which form a functional unit in the commercial structure of individual sanitary napkins. Only a rough separation of the superabsorbent layer was performed with the contained white granules (visually determined) which in this test were considered to represent sodium polyacrylate as the subject of the test. The prepared test tubes were subjected to a burning test.

The aim of the conducted test (in addition to evaluating the type of material from which the granules were made as the basis of the super absorbent layer of the tested samples) was to show whether: additions to the basic polymer from the super absorbent layer; other polymers and/or non-polymeric materials present in/around the coarsely separated superabsorbent layer; affect the expected identification of sodium acrylate in the tested series of sanitary napkins; as a result, it makes it possible to check the possibility of applying the chosen test method in the tested series of samples.

2.2. Methods

The series of 5 test tubes prepared from a selected series of samples was tested by direct application of the burning test, according to the method and procedure defined in the literature [6,7]. The test was carried out in the laboratories of the Technical College of Applied Studies in Zrenjanin. All personal and technical protection measures for work in laboratory conditions were applied, in accordance with the relevant regulations in the field of safety and health at work. The method and procedure for preparing test tubes for testing is described in chapter 2.1. of this paper. Individual samples were captured with laboratory tweezers and introduced into an open flame, under controlled laboratory conditions [8,9]. All tests were performed three times. During the examination, in accordance with the reference data from the literature [6,7], the following indicators were observed:

1. Flammability and combustion in/out of flame;
2. Possibility of formation of droplets during burning or melting of polymer material;
3. The smell of steam after removing the flame;
4. The appearance of the residue after the test.

3. Results and discussion

The obtained results of the test carried out in the selected series of samples are shown in Table 1.

Based on the obtained results (Table 1), it can be considered that the samples from the tested series contain polymer material based on sodium polyacrylate polymer.

It can be considered that the results of the test conducted in the selected series of samples are in accordance with the assumptions used in this work [6,7]. The chosen method is generally applicable to the tested series of samples. The results confirmed that additions to the sodium polyacrylate polymer in the super absorbent layer of sanitary napkins; as well as the presence of other polymers/non-polymeric materials in the samples from the tested batch; significantly affect the possibility of applying the burning test [6,7].

Table 1. Results of testing the type of polymer material, which forms the basis of the super absorbent layer of the tested series of sanitary napkins, using the burning test

	<i>Basic data about the sample</i>	<i>Flammability and the appearance of flame</i>	<i>The smell of released gases</i>	<i>Type of polymer material</i>
Sample 1	Foreign manufacturer, defined uses on the packaging with the indication: super absorbent. Basic available data.	After ignition, it continues to burn. The flame bright, a little sooty.	Pungent smell, to acrylic/polyacrylic acid, irritating.	Sodium polyacrylate polymer
Sample 2	Foreign manufacturer, defined uses on the packaging with the indication: super absorbent. Basic available data.	After ignition, it continues to burn. The flame bright, a little sooty.	Pungent smell, to acrylic/polyacrylic acid, irritating.	Sodium polyacrylate polymer
Sample 3	Foreign manufacturer, defined uses on the packaging with the indication: super absorbent. Basic available data.	After ignition, it continues to burn. The flame is less bright, more sooty.	Pungent smell, to acrylic/polyacrylic acid, irritating. Occasionally, a burnt cotton/paper smell.	Sodium polyacrylate polymer
Sample 4	Foreign manufacturer, defined uses on the packaging with the indication: super absorbent. Basic available data.	After ignition, it continues to burn. The flame is less bright, more sooty.	Pungent smell, to acrylic/polyacrylic acid, irritating. occasionally, faint smell of burnt cotton/paper.	Sodium polyacrylate polymer
Sample 5	Domestic producer. No special ones note. Basic data available	After ignition, it continues to burn. The flame bright, very little sooty.	Irritating, to acrylic/polyacrylic acid with the appearance of a burnt smell natural polymer based on cellulose.	Sodium polyacrylate polymer

It should be emphasized that, as expected, the behavior of the used group of polymers named: polyacrylates in an open flame is in accordance with the available data from the literature [6,7]. In the conducted testing, it was considered that sodium polyacrylate is included in the just mentioned group.

The results obtained in the performed test showed the following: additions to the basic sodium polyacrylate polymer from the super absorbent layer; as well as other polymeric and/or non-polymeric materials present in/around the roughly separated super absorbent layer of sanitary pads; affect the possibility of assessing the identification of sodium polyacrylate polymer in the tested series of samples.

Deviations of the tested indicators from the reference values used in the performed test can, for example, stem from the presence of natural polymers (for example, cellulose products: paper, cotton, etc.) as a carrier of the basic polymer in the super absorbent layer of sanitary napkins or in the remains of other layers present in the sample, which form a functional unit with the super absorbent layer in the manufacturer's formulation of sanitary napkins; as well as a possible consequence of the presence of e.g. polymer adhesives, which hold attached layers of material in the tested samples; and the like.

Observed, minimal mutual differences in the behavior of the samples from the investigated series during the performed test, can be considered as a consequence of the differences in the patent technologies of foreign and domestic manufacturers of sanitary napkins applied in structuring the layers of material; but also as a result of the significant limitations of the burning test in the testing methodology itself (non-standardized procedure of sample preparation and testing, etc.).

4. Conclusions

Based on the results obtained in this work, it can be considered that the burning test is a generally applicable test method.

The results obtained in the performed test showed the following: additions to the basic, sodium polyacrylate polymer from the super absorbent layer; as well as other polymeric and/or non-polymeric materials present in/around the roughly separated super absorbent layer; affect the possibility of assessing the identification of sodium polyacrylate polymer in the tested series of samples.

Deviations of the tested indicators from the reference values used in the performed test can, for example, stem from the presence of natural polymers (for example, cellulose products: paper, cotton, etc.) as a carrier of the basic polymer in the super absorbent layer of sanitary napkins or in the remains of other layers present in the sample, which form a functional unit with the super absorbent layer in the manufacturer's formulation of sanitary napkins; as well as a possible consequence of the presence of e.g. polymer adhesives, which hold attached layers of material in the tested samples; and the like.

The significance of the obtained results from the professional and practical side could be viewed from the point of view of creating a starting point for the application of final methods of analysis in order to finally confirm the assumptions used in this work.

The type and amount of additives in the polymer material based on sodium polyacrylate, the type of other present polymers and non-polymeric materials in the tested samples; could be determined by special tests, using the so-called final methods of analysis [6,7], which could consequently represent one of the ways of the further flow of work.

5. References

- [1] **van Vlierberghe, S., A. Mignon**, *Superabsorbent Polymers: Chemical Design, Processing and Applications*, De Gruyter, Germany, 2021.
- [2] **Arpit, S., T. Jaya**, *Properties and Applications of Superabsorbent Polymers*, Springer Nature Singapore, Singapore, 2023.
- [3] *******, Sodium Polyacrylate, Brochure, Socochem, 2023.
- [4] *******, The main material for hydrogels Brochure, Socochem, 2023.
- [5] **Mogale, R., M. S. Schutte-Smith, E. Erasmus, K. De Wet, H. G. Visser**, Toward sustainable menstrual health management: Focus on super absorbent polymers, *J. Mater Sci*, 59 (2024), pp. 6138–6168.
- [6] **Vujković, I., D. Stoilković, S. Đilas**, *Brza identifikacija polimernih materijala*, Poli, Novi Sad, Republika Srbija, 2000.
- [7] **Braun, D.**, *Simple Methods for Identification of Plastics* (with the Plastic Identification Table by Saechling H.), 5th edition, Hanser Publishers, Munich, Germany, 2013.
- [8] **Sin. L. T., B. S. Tueen**, *Plastics and Sustainability - Practical Approaches*, Elsevier, 2023.
- [9] **Lazić, M., D. Halas, A. Dedić, D. Salemović**, *Rapid identification of polymer materials based on acrylonitrile butadiene styrene rubber using the burning test and behavior in an open flame*, Proceedings of the 36th International Process Industry Congress - Processing 23, pp. 175-181.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.029>

Ključne reči:

hidrogelovi akrilamida; vitamin C;
ekološki prihvatljiva sinteza;
N-acetil glukozamin; diklofenak

EKOLOŠKI PRIHVATLJIVA SINTEZA HIDROGELOVA AKRILAMIDA ZA KONTROLISANO OTPUŠTANJE AKTIVNIH SUPSTANCI

Key words:

acrylamide hydrogels; vitamin C;
eco-friendly synthesis;
N-acetyl glucosamine; diclofenac

ECO-FRIENDLY PREPARATION OF ACRYLAMIDE HYDROGELS FOR DRUG DELIVERY

Miloš RADOVANOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Rada V. PJANOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-0817-182X

Maja D. MARKOVIĆ*

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

* mmarkovic@tmf.bg.ac.rs

ORCID: 0000-0002-8466-8539

Hidrogelovi su polimerni materijali meke konzistencije koji zbog toga imaju veliku primenu u biomedicini i srodnim oblastima. Hidrogelovi na bazi akrilamida (AAM) su posebno interesantni zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i stabilnosti u fiziološkim uslovima, kao i mogućnosti da im se poroznost prilagodi zahtevima primene. U ovom radu, AAM hidrogelovi su sintetisani u ambijentalnim uslovima primenom inicijatorskog sistema vodonik peroksid/vitamin C (H_2O_2/VC) kao ekološki prihvatljive alternative konvencionalnim inicijatorima. Karakterizacija dobijenih AAM hidrogelova je izvedena primenom različitih metoda: FTIR i SEM analiza, testovi kompresije i ispitivanje svojstva bubrenja. Ispitana je i mogućnost primene ovih hidrogelova za kontrolisano otpuštanje aktivnih supstanci. N-acetil glukozamin i diklofenak su korišćeni kao model lekovi koji mogu da se koriste za tretiranje rana. Postignuto je kontrolisano otpuštanje oba leka tokom tri dana. Takođe je ispitano kako povećanje količine H_2O_2 utiče na bubrenje i otpuštanje inkapsuliranih model lekova. Dobijeni rezultati pokazuju da se AAM hidrogelovi mogu pripremiti na ekološki prihvatljiv način primenom inicijatorskog sistema H_2O_2/VC i da poseduju potencijal za kontrolisano otpuštanje N-acetil glukozamina i diklofenka.

Hydrogels are soft polymeric networks widely investigated for biomedical applications. Hydrogels based on acrylamide (AAM) are particularly interesting because they possess favourable mechanical properties, tunable porosity and stability under physiological conditions. In this study, AAM hydrogels are synthesized under ambient conditions using hydrogen peroxide/vitamin C (H_2O_2/VC) initiation system as eco-friendly alternative to conventional initiators. Prepared AAM hydrogels are characterized by various technics: FTIR analysis, SEM analysis, compression testing, and analysis of swelling behaviour of the AAM hydrogels. The potential of these hydrogels for controlled release of drugs is evaluated. N-acetyl glucosamine and diclofenac are used as model drugs that can be used in wound treatment. Both model drugs are released in controlled manner for three days. It is also analysed how the increase in the H_2O_2 amount affects swelling behaviour and release of the encapsulated drugs. The results show that AAM hydrogels can be efficiently prepared in eco-friendly manner using H_2O_2/VC initiation system and have potential for controlled release of N-acetyl glucosamine and diclofenac.

1. Introduction

Hydrogels are soft polymeric networks which can absorb and retain huge amount of water and at the same time to keep three-dimensional structural integrity [1]. This combination makes this polymer materials suitable for biomedical applications, such as drug delivery and wound treatment [2]. Their ability to swell and release encapsulated active substances in the process has made them especially attractive for controlled release of active substances [3]. Hydrogels based on acrylamide (AAM) are extensively investigated due to their favourable mechanical properties, easily tunable polymer network, and stability and functionality under physiologically conditions (body temperature, pH etc) [4-6]. In addition, AAM hydrogels can be developed with desirable porosity and elasticity, which is important to achieve reproducible release kinetics and reliable performance in biomedical applications.

The performance of these materials directly depends on the synthesis route because polymerization conditions affect chain growth, crosslinking density, porosity, and therefore, the kinetic of drug release. Because of that, the development of synthesis methods that do not include harsh reaction conditions and toxic organic solvents and enable the preparation polymer material for biomedical application in more eco-friendly manner is very important. Initiation system based on hydrogen peroxide and ascorbic acid ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{VC}$) have recently attract attention as an environmentally friendly alternative to conventional initiators used for hydrogel preparation [7]. This system enables free-radical polymerization at room temperature without need for thermal or other type of activation.

In line with that, the present study investigated the possibility to prepare hydrogels based on acrylamide by using $\text{H}_2\text{O}_2/\text{VC}$ initiation system. Obtained AAM hydrogels were characterized by FTIR analysis, SEM analysis, compression tests and swelling experiments. Further, the potential of the AAM hydrogels for encapsulation and controlled release of two model active substances: N-acetyl glucosamine and diclofenac. N-acetyl glucosamine is active substance that is used for tissue regeneration and supports the restoration of damaged skin, due to which can be used in wound healing [8]. Its ability to stimulate fibroblast activity and improve formation of extracellular matrix makes N-acetyl glucosamine valuable for accelerating the early phases of wound healing. Diclofenac is well known non-steroidal anti-inflammatory drug which is commonly applied to reduce inflammation and reduce the pain in injured or irritated tissues [9]. This drug inhibits cyclooxygenase enzyme, and in that manner suppresses local inflammation process, which is important for minimization of discomfort, swelling and delayed healing of irritated tissue. Special attention was given to analyse how the change in the H_2O_2 amount affects the AAM hydrogels properties and drug release.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Acrylamide ($\geq 99\%$) (AAM) and diclofenac were purchased from Sigma-Aldrich (USA). The crosslinker N,N'-methylenebisacrylamide (p.a.) (MBA) was purchased from Aldrich Chemical Co. (USA). Vitamin C was supplied from Alkaloid (N. Macedonia). Hydrogen peroxide (30% v/v) was obtained from Sigma Aldrich (USA). N-acetyl glucosamine was supplied from Avena Lab, Farmadria d.o.o. All chemicals were used as received.

2.2. Synthesis of AAM hydrogels

The AAM hydrogels were prepared via free radical polymerization at room temperature under ambient conditions. Four AAM hydrogels were synthesized using the $\text{H}_2\text{O}_2/\text{VC}$ initiation system. The total volume of the reaction mixture was 20 mL for each sample. The synthesis was performed as

follows. First, 2 g of acrylamide was dissolved in an appropriate volume of distilled water (Table 1.). MBA (0.8 mol% calculated in respect with the amount of acrylamide) was then added under continuous stirring. After MBA was dissolved, 10 mg of VC was added in the reaction mixture and stirring was continued until complete dissolution of VC. Finally, the appropriate amount of H_2O_2 (Table 1.) was added, and the reaction mixture was stirred for an additional 10 min. The mixture was then poured into molds and left at room temperature until the polymerization reaction was completed. The obtained AAM hydrogels were cut into disk-shaped samples with a diameter of 7 mm and allowed to dry at room temperature. The samples were denoted as AAM- xH_2O_2/VC , where xH_2O_2 presents the volume of H_2O_2 used for hydrogel synthesis. The amount of H_2O_2 was varied to determine the minimum H_2O_2 volume required for successful AAM hydrogel synthesis and to examine how this variation affects hydrogel properties (swelling degree and amount of released active substance).

Table 1. Feed composition

Sample	Distilled water, mL	Volume of H_2O_2 , μL
AAM-40 H_2O_2/VC	15.08	40
AAM-70 H_2O_2/VC	15.05	70
AAM-100 H_2O_2/VC	15.02	100
AAM-150 H_2O_2/VC	14.97	150

*The total volume of reaction mixture for each sample was 20 mL

The Fourier Transform Infrared (FTIR) spectra of AAM xerogel disks were recorded in transmittance mode for the wavelength range of 600 cm^{-1} to 4000 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1} , using Nicolet iS10 FTIR Spectrometer.

Preparation of AAM-100 H_2O_2/VC hydrogel for analysis with Scanning Electron Microscope (SEM) was performed as follows. AAM-100 H_2O_2/VC hydrogel left in distilled water to swell at room temperature until it reached the equilibrium state, and then freeze-dried. Next, the AAM-100 H_2O_2/VC hydrogel was cut in half and Au-Pd coated using a POLARON SC502 sputter coater. Prepared cross section of AAM-100 H_2O_2/VC hydrogel was then analyzed employing Tescan MIRA 3 XMU Field-Emission Gun Scanning Electron Microscope with an acceleration voltage of 20 kV.

The compression tests were conducted according the following procedure. The AAM hydrogels were swollen to equilibrium in distilled water at room temperature. Next, the samples were removed, and excess of water was carefully blotted using a paper towel. The swollen samples were then subjected to compression tests at room temperature using a Shimadzu Autograph AGS-X (1 kN) apparatus, with a deformation rate of 2 mm/min. The compression strength was measured up to the hydrogels' elastic limit.

2.3. Monitoring of AAM hydrogels swelling

The swelling of the AAM hydrogels was monitored in distilled water at room temperature. The mass of each AAM hydrogel was first determined prior the swelling experiments (m_0 , g), and the samples were immersed in water. In previously determined time intervals the AAM hydrogels were removed from water, excess of water was gently removed with paper towel, their masses were determined (m_t , g) and the hydrogels were immediately returned into water. The swelling experiments were conducted until equilibrium state was reached. The values of swelling degree (SD) were determined according the Eq. (1).

$$SD = (m_t - m_0)/m_0 \quad (1)$$

The equilibrium swelling degree for each AAM hydrogel was determined according to the same equation by replacing the m_t value with m_{eq} value which present the mass of AAM hydrogel in equilibrium state.

2.4. Determination of encapsulation degree and monitoring of controlled release of N-acetyl glucosamine and diclofenac

The amounts of diclofenac and N-acetyl glucosamine that were encapsulated in the AAM hydrogels were determined according to so-called extracting method [10].

To investigate the process of N-acetyl glucosamine and diclofenac release, the AAM hydrogels were immersed in distilled water at 25 °C. At predetermine time points, 3 mL of solution was withdrawn, and its absorbance measured using UV-Vis spectrophotometer (Shimadzu). After the measurement, the aliquot was returned to the system. The absorbance was recorded at a wavelength of 273 nm. The obtained values were then used to construct cumulative drug-release profiles. Monitoring of drug release was conducted until the equilibrium state was achieved.

3. Results and discussion

3.1. The FTIR and SEM analysis of AAM hydrogels

The recorded FTIR spectra of the AAM hydrogels are presented in Fig. 1. Analysis of the spectra showed the presence of characteristic poly(acrylamide) bands at: 3305 cm^{-1} and 3200 cm^{-1} (symmetric and asymmetric stretching vibrations of the $-\text{NH}_2$ group), 2935 cm^{-1} and 2865 cm^{-1} (symmetric and asymmetric $-\text{CH}_2$ stretching vibrations), 1654 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ stretching vibrations), 1609 cm^{-1} ($-\text{NH}$ bending vibrations), and 1313 cm^{-1} (N-H bending vibrations) [11-13].

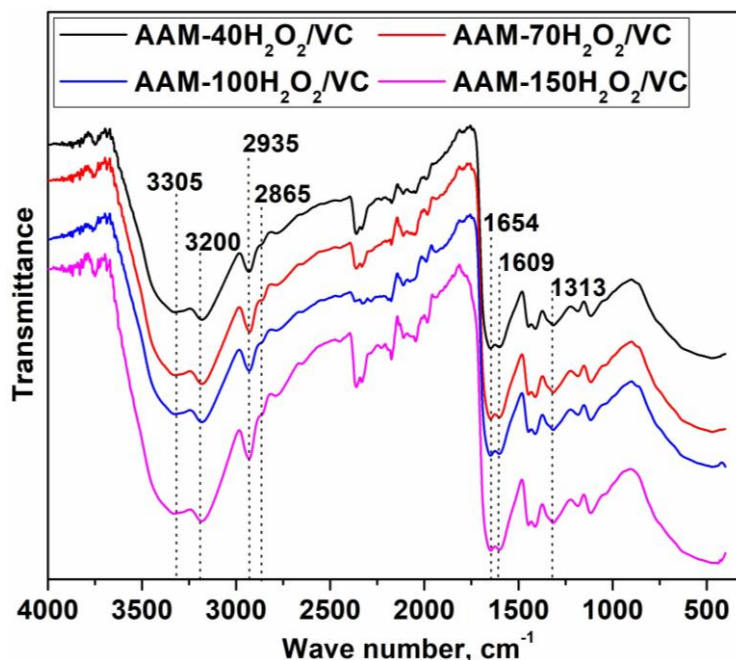


Figure 1. FTIR spectra of AAM hydrogels

The obtained SEM micrograph of the AAM-100H₂O₂/VC hydrogel is shown in Fig. 2. The AAM hydrogel exhibit a porous structure that is characteristic for hydrogel materials [14].

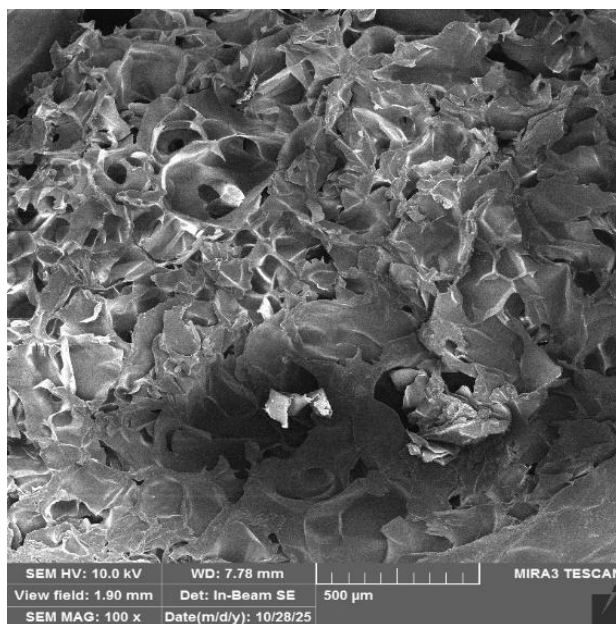


Figure 2. SEM micrograph of the AAM-100H₂O₂/VC hydrogel

3.2. Analysis of mechanical properties of AAM hydrogels

The mechanical properties of the AAM hydrogels were further investigated. Obtained values of maximal compressive strength (σ) and maximal stroke strain (MSS) of the AAM hydrogels previously swollen to equilibrium in distilled water are presented in Table 2. The values of maximal compressive strength and maximal stroke strain of AAM hydrogels increased with the increase in the H₂O₂ amount up to 100 μ L. Above this H₂O₂ amount, these parameters swelling started to decrease. This was consequence of the behaviour of the AAM hydrogels. The increase in the H₂O₂ amount led to the decrease in swelling degree, and therefore to more rigid polymer network and increase in the σ and MSS values [7]. Further increase in H₂O₂ amount led to the formation of more loosen polymer network, decrease of swelling degree, and therefore to the decrease in the σ and MSS values. Plotted stress-strain diagrams for the AAM hydrogels are shown in Fig. 3.

Table 2. The values of maximal compressive strength and maximal stroke strain of the AAM hydrogels previously swollen to equilibrium in distilled water

Sample	Maximal compressive stress, N/mm ²	Maximal stoke strain, %
AAM-40H ₂ O ₂ /VC	0.1132	55.68
AAM-70H ₂ O ₂ /VC	0.1988	57.58
AAM-100H ₂ O ₂ /VC	0.3501	78.08
AAM-150H ₂ O ₂ /VC	0.06341	50.12

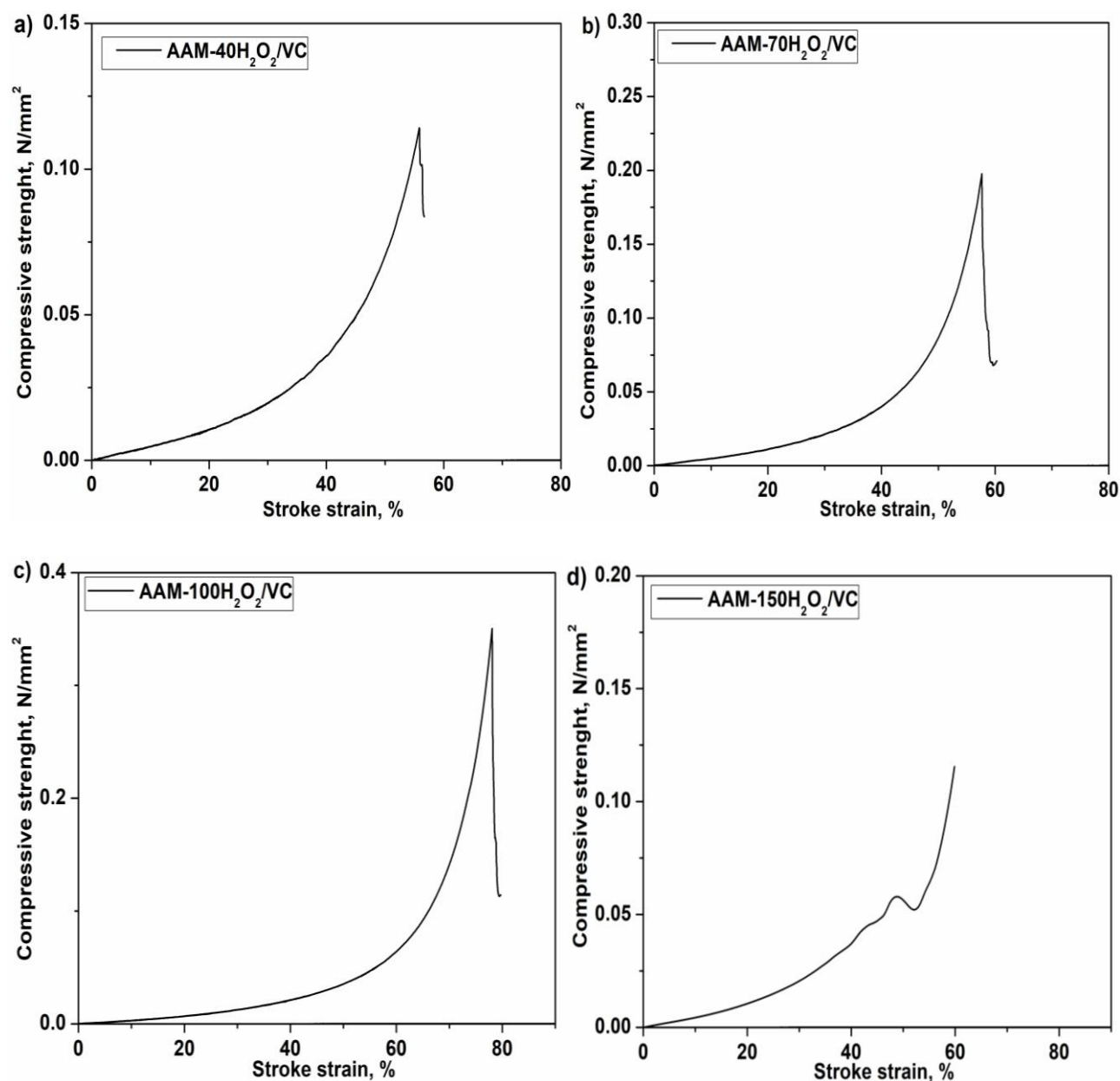


Figure 3. Stress-strain diagrams for the AAM hydrogels: a) AAM-40H₂O₂/VC; b) AAM-70H₂O₂/VC; c) AAM-100H₂O₂/VC and d) AAM-150H₂O₂/VC

3.3. Swelling of AAM hydrogels and controlled release of N-acetyl glucosamine and diclofenac from AAM hydrogels

The swelling curves of the AAM hydrogels are shown in Fig. 4. The swelling degree of the AAM samples decreased with an increase in hydrogen peroxide amount up to 100 μ L. Increase in H₂O₂ amount led to the formation of large number of ascorbyl radical, and therefore numerous polymer chains were created. As consequences, xerogel density increased leading further to the reduced swelling capacity. The SD values started slightly to increase with further increase in the H₂O₂ amount. This was probably because used amount of crosslinker was not sufficient for efficient crosslinking, leading further to formation of looser polymer network and higher swelling degree [7].

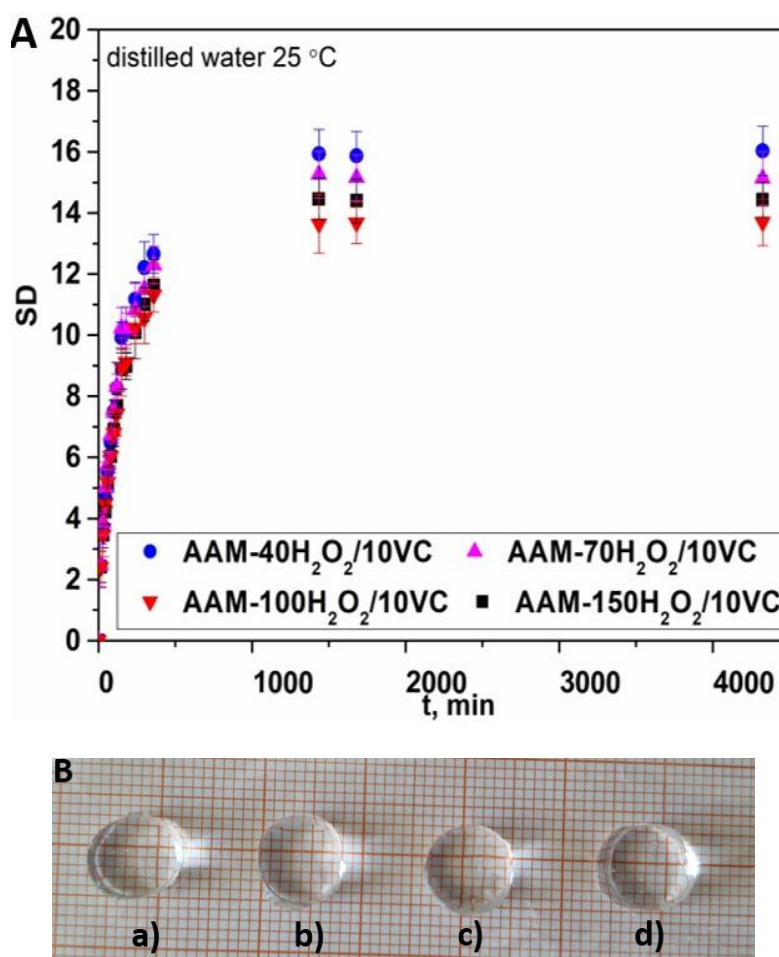


Figure 4. A) Swelling curves of the AAM hydrogels and B) pictures of the AAM hydrogels (a) AAM-40H₂O₂/VC; b) AAM-70H₂O₂/VC; c) AAM-100H₂O₂/VC and d) AAM-150H₂O₂/VC

The degree of encapsulation of N-acetyl glucosamine in AAM-40H₂O₂/VC, AAM-70H₂O₂/VC, AAM-100H₂O₂/VC and AAM-150H₂O₂/VC was 76.0%, 76.5%, 85.5% and 88.0%, respectively. The degree of encapsulation of diclofenac was 89.0%, 86.88%, 90.3% and 78.44%, respectively.

The curves of cumulative release of N-acetyl glucosamine and diclofenac from the AAM hydrogels are presented in Fig. 5. a) and b). Both active substances are released in controlled manner for three days (4320 min). The percent of released N-acetyl glucosamine was similar for all AAM hydrogels and was around 99.0% (Fig. 5. a) and Table 3.). The percent of released diclofenac from AAM hydrogels was between 82.0% – 99.0% (Fig. 5. b) and Table 3.). A slight decrease in cumulative release with increase in H₂O₂ amount up to 100 μ L was observed for both drugs. Further increase in H₂O₂ amount led to mild increase in released amount of both drugs. These results are consistent with the swelling behaviour of AAM hydrogels, where the increase in H₂O₂ amount up to 100 μ L reduced the swelling degree, which further limited drug diffusion. Higher amount of H₂O₂ led to formation of slightly looser polymer network which enabled mildly enhanced release of drugs. Obtained results show that AAM hydrogels have potential for encapsulation and controlled release of anti-inflammatory active substance that are used for treatment of wounds.

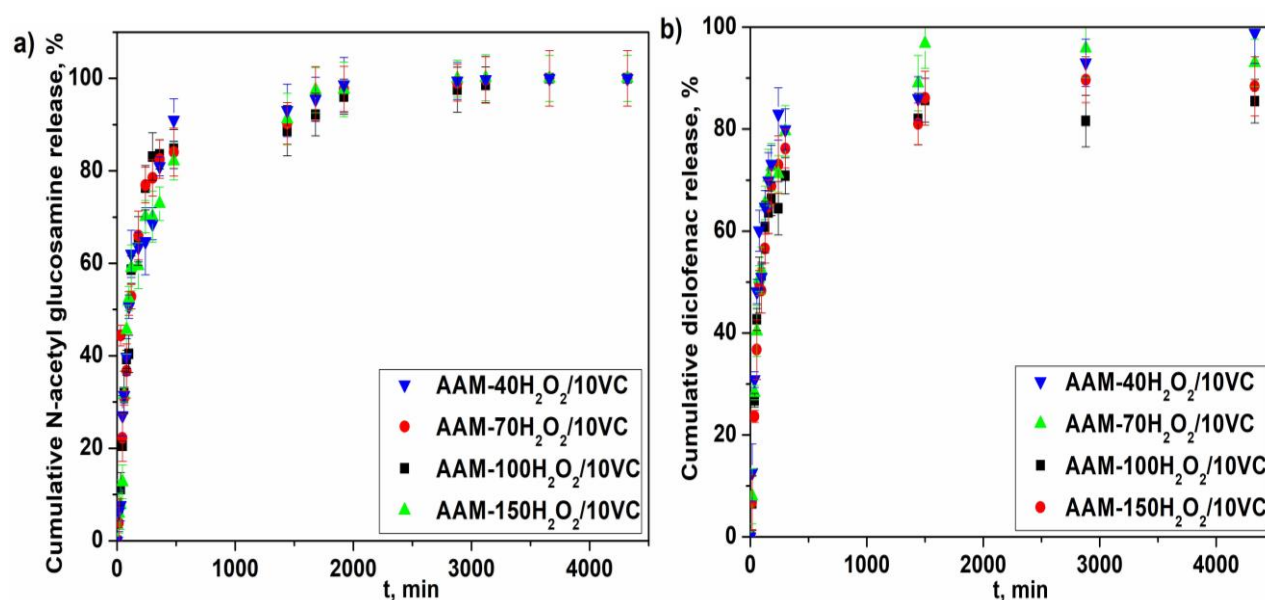


Figure 5. Cumulative release of: a) N-acetyl glucosamine and b) diclofenac from the AAM hydrogels in distilled water at 25 °C

Table 3. The *SDeq* values of the AAM hydrogels and cumulative drug release

Sample	<i>SDeq</i>	Cumulative release of N-acetyl glucosamine, %	Cumulative release of diclofenac, %
AAM-40H ₂ O ₂ /VC	16.03	99.79	98.87
AAM-70H ₂ O ₂ /VC	15.13	99.70	93.04
AAM-100H ₂ O ₂ /VC	13.69	98.57	85.49
AAM-150H ₂ O ₂ /VC	14.43	99.93	88.39

4. Conclusions

In this study hydrogels based on acrylamide (AAM) was successfully synthesized at ambient conditions by employing hydrogen peroxide/vitamin C (H₂O₂/VC) initiation system. FTIR analysis confirmed the composition of prepared AAM hydrogels and SEM analysis revealed porous structure of the AAM hydrogels. Compression tests showed that the values of compression stress increased with the increase in the H₂O₂ amount up to 100 μ L. Above that point the value of compression stress started to decrease. The analysis of swelling behavior of the AAM hydrogels showed that the equilibrium swelling degree decreased with the increase in the H₂O₂ amount up to 100 μ L, above which started to increase. This result was consistent with the results obtained by compression tests. The increase in the H₂O₂ amount led to the formation of large number of short polymer chains, so xerogels density increased leading further to the reduced swelling capacity. Further increase in the H₂O₂ amount led to the formation of huge number of polymer chains that probably could not be efficiently crosslinked with used crosslinker amount, so polymer network was more elastic and could absorb higher amount of water. The drug release experiments showed that both N-acetyl glucosamine and diclofenac were released in controlled manner for three days. A slight decrease in cumulative release with increase in H₂O₂ amount up to 100 μ L was observed for both drugs. Further increase in H₂O₂ amount led to mild increase in released amount of both drugs. All obtained results show that AAM

hydrogels can be efficiently prepared in eco-friendly manner by using H₂O₂/VC initiation system and have potential for controlled release of N-acetyl glucosamine and diclofenac.

5. Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-33/2026-03/200287).

6. References

- [1] **M. Huang, Y. Huang, H. Liu, Z. Tang, Y. Chen, Z. Huang, S. Xu, J. Du, B. Jia**, Hydrogels for the treatment of oral and maxillofacial diseases: current research, challenges, and future directions, *Bio-materials Science*, 10 (22) (2022), pp. 6413-6446.
- [2] **P. Sánchez-Cid, M. Jiménez-Rosado, A. Romero, V. Pérez-Puyana**, Novel Trends in Hydrogel Development for Biomedical Applications: A Review, *Polymers (Basel)*, 14 (15) (2022).
- [3] **Y. Zhang, B.M. Wu**, Current Advances in Stimuli-Responsive Hydrogels as Smart Drug Delivery Carriers, *Gels*, (2023), pp. 838.
- [4] **F. Milos, A. del Campo**, Polyacrylamide Hydrogels as Versatile Biomimetic Platforms to Study Cell-Materials Interactions, *Advanced Materials Interfaces*, 11 (34) (2024), pp. 2400404.
- [5] **D. Son, H. Hwang, J.F. Fontenot, C. Lee, J.P. Jung, M. Kim**, Tailoring Physical Properties of Dual-Network Acrylamide Hydrogel Composites by Engineering Molecular Structures of the Cross-linked Network, *ACS Omega*, 7 (34) (2022), pp. 30028-30039.
- [6] **N. H. Aljarba, M. Afzal, M.A. Alkhateeb, S. Alkahtani**, Polyacrylamide functionalized polysaccharide based nanocomposite semi-interpenetrating polymeric network hydrogel for pH-responsive controlled release of a model neuroprotective drug, *RSC Advances*, 15 (44) (2025), pp. 37027-37038.
- [7] **M. D. Markovic, M.M. Svetozarevic, V.V. Panic, S.I. Savic, A.D. Masulovic, P.M. Spasojevic, R.V. Pjanovic**, Novel eco-friendly initiation system based on vitamin C for energy efficient synthesis of PMAA hydrogel used for delivery of phenolic compounds, *Chemical Engineering Journal*, 459 (2023), pp. 141580.
- [8] **A. Polubinska, J. Cwalinski, E. Baum, A. Bręborowicz**, N-Acetylglucosamine modulates function of the skin fibroblasts, *International journal of cosmetic science* 35 (5) (2013), pp. 472-6.
- [9] **T.J. Gan**, Diclofenac: an update on its mechanism of action and safety profile, *Current medical research and opinion*, 26 (7) (2010), pp. 1715-31.
- [10] **M. Suhail, A. Khan, J.M. Rosenholm, M.U. Minhas, P.-C. Wu**, Fabrication and Characterization of Diclofenac Sodium Loaded Hydrogels of Sodium Alginate as Sustained Release Carrier, *Gels*, (2021), pp. 10.
- [11] **N.M. Aguilar, B.L. Sanchez-Gaytan, G. Soriano-Moro**, Polyacrylamide-based nanocomposite hydrogel prepared by synergistic solar light-induced polymerization, *Macromolecular Research*, 33 (4) (2025), pp. 399-405.
- [12] **E. Olăreț, Ș.I. Voicu, R. Oprea, F. Miculescu, L. Butac, I.-C. Stancu, A. Serafim**, Nanostructured Polyacrylamide Hydrogels with Improved Mechanical Properties and Antimicrobial Behavior, *Polymers*, (2022), pp. 2320.
- [13] **A. Yaghoubi, A. Ramazani, H. Ghasemzadeh**, Synthesis of physically crosslinked PAM/CNT flakes nanocomposite hydrogel films via a destructive approach, *RSC Advances*, 11 (62) (2021), pp. 39095-39107.
- [14] **Y. Gombert, F. Roncoroni, A. Sánchez-Ferrer, N.D. Spencer**, The hierarchical bulk molecular structure of poly(acrylamide) hydrogels: beyond the fishing net, *Soft Matter*, 16 (42) (2020), pp. 9789-9798.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.039>

Ključne reči:
antioksidativna aktivnost;
lipofilnost; linearna korelacija

UTICAJ HEMIJSKE STRUKTURE NA FARMAKOLOŠKU AKTIVNOST DERIVATA AKRIDIN-1,8-DIONA

Key words:
antioxidant activity;
lipophilicity; linear correlation

STRUCTURE–ACTIVITY RELATIONSHIP STUDY OF ACRIDINE-1,8-DIONE DERIVATIVES

Kristina GAK SIMIĆ

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0003-3928-9967

Luka MATOVIĆ

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0003-4945-7776

Aleksandra MAŠULOVIĆ

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0002-5279-7694

Nemanja TRIŠOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-9231-4810

Jelena LAĐAREVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-5554-7295

Marija DIMITRIJEVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-4999-1664

Ivana ĐORĐEVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju,
institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd
ORCID: 0000-0001-5981-9385

Anita LAZIĆ*

* alazic@tmf.bg.ac.rs

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0003-4855-3782

Derivati akridina predstavljaju jedinjenja jedinstvenih fizičko-hemijskih i farmakoloških svojstava, sa značajnom primenom u medicini i industriji. Zahvaljujući planarnoj strukturi i sposobnosti da uspostavljaju interakcije sa različitim biološkim receptorima, brojni analozi ovog heterocikla imaju terapijski značaj. Kvinakrin se koristi u lečenju malarije, akriflavin i proflavin u terapiji bakterijskih infekcija, dok se amsakrin i nitracin primenjuju kao antineoplastični agensi. Pored toga, poznata su njihova antiinflamatorna, antituberkulozna, antiviralna i antifungicidna svojstva, a u industriji boja i pigmenata prisutni su još od 19. veka. U ovom radu, pručavani su derivati 3,3,6,6-tetrametil-3,4,6,7,9,10-heksahidroakridin-1,8-diona sa p-hidroksifenil-grupom u položaju 9 i p-supstituisanom benzil-grupom u položaju 10. Antioksidativna aktivnost ispitana je ABTS metodom. Efekat različitih interakcija između molekula rastvarača i molekula rastvorene supstance na pomeranje apsorpcionih maksimuma analiziran je metodom linearne korelacije energije solvatacije, što je dalje omogućilo da se procene efekti solvatacije na njihovu potencijalnu farmakološku aktivnost.

Acridine derivatives represent an important class of heterocyclic compounds characterized by unique physicochemical features and broad pharmacological potential. Their planar tricyclic structure enables multiple interactions with biomacromolecules, underlying diverse biological activities. Quinacrine is used in the treatment of malaria, acriflavine and proflavine in the treatment of bacterial infections, while amsacrine and nitracin are used as antineoplastic agents. Clinically relevant representatives include antiinflammatory, antitubercular, antiviral, and antifungal activity. In addition to their biomedical significance, acridine-based compounds have permanent applications in the dye and pigment industry due to their stability and strong chromophoric properties. Herein, a

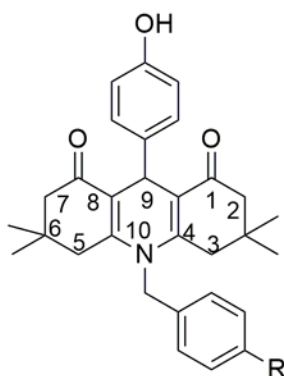
series of derivatives of 3,3,6,6-tetramethyl-3,4,6,7,9,10-hexahydroacridine-1,8-dione was synthesized and structurally characterized. The synthesized compounds contain a *p*-hydroxyphenyl group at position 9 and various *p*-substituted benzyl groups at position 10. The antioxidant activity was investigated using the ABTS assay. Furthermore, solvent effects on the absorption maxima shifts were analyzed using the linear solvation energy relationship (LSER) concept, providing insight into solvent–solute interactions and their possible influence on pharmacological activity.

1. Introduction

Acridine-1,8-dione derivatives represent an important class of nitrogen-containing heterocyclic compounds due to their diverse pharmacological activities. In this context, the anticancer potential has been extensively studied [1]. These compounds are known to interact with DNA through intercalation or groove binding, thereby interfering with replication and transcription processes [2]. In addition, acridine-1,8-dione derivatives have been reported to possess antimicrobial, antioxidant, anti-inflammatory, and antiviral activities. Their antimicrobial effects are often attributed to disruption of cellular membranes or inhibition of essential enzymatic pathways, while antioxidant activity is associated with their ability to scavenge free radicals and regulate oxidative stress [3].

Potentially pharmacologically active compounds often bear numerous functional groups capable of forming hydrogen bonds, which enhance solubility and enable specific interactions with the biomolecular targets [4]. These interactions substantially influence both pharmacological activity and pharmacokinetics [5]. In this context, solvatochromic studies provide insights into different solute–solvent interactions that may mimic the interactions of pharmacologically active compounds within their biological environment.

Considering the aforementioned applications of acridine-1,8-dione derivatives, a series of 3,3,6,6-tetramethyl-3,4,6,7,9,10-hexahydroacridine-1,8-dione derivatives (Figure 1; compounds 1–7) was synthesized and fully characterized [6]. Herein, we examined their radical scavenging properties using the 2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) method. The effects of specific (hydrogen bonding) and nonspecific (dipolarity/polarizability) solvent–solute interactions on the absorption maxima shifts were interpreted by using the linear solvation energy relationship (LSER) concept proposed by Kamlet, and Taft.



R = Me (1), OH (2), OMe (3), H (4), F (5), Cl (6), Br (7).

Figure 1. Chemical structure of the investigated compounds.

2. Experimental

2.1. Spectroscopic measurements

The absorption spectra were recorded on a Shimadzu 1700 spectrophotometer in the region 200–500 nm. The spectra were run in spectroquality solvents (Fluka) using a concentration of $1 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$.

2.2. Antioxidant activity

The antioxidant activity of investigated compounds **1–7** was determined using ABTS radical-scavenging assay. A stock solution of $\text{ABTS}^{\bullet+}$ was prepared in the reaction of ABTS (4.912 mL, 7 mM in phosphate-buffered saline (PBS)) and potassium persulfate (0.088 mL, 140 mM in distilled water). After 16 h of incubation in the dark, the stock solution was diluted with methanol until the recorded absorbance at 734 nm was 0.700 ± 0.02 . Subsequently, 20 μL of the methanolic solutions of the investigated compounds (5 mM) were mixed with 2 mL of the ABTS radical solution, shaken and stored in the dark for 10 min. Afterward the absorbance was measured at 734 nm. Each test was done in triplicate. The inhibition percentage of $\text{ABTS}^{\bullet+}$ was calculated using the formula:

$$\text{Inhibition} = 100(\text{Ac} - \text{As})/\text{Ac} \quad (1)$$

where Ac is the absorbance of the control solution (20 μL of methanol in 2 mL of ABTS solution) and As is the absorbance of the sample solution. Ascorbic acid was used as a standard antioxidant. The antioxidant ability of the most promising derivatives was further evaluated by determination of the IC_{50} values. The methanolic solutions of the synthesized compounds and ascorbic acid were prepared at concentrations ranging from 5 to 0.5 mM, and obtained IC_{50} were compared. The tests were performed in triplicate. The resulting IC_{50} values are presented as means with standard deviation ($\pm\text{SD}$) from three experiments ($n = 3$) [7].

3. Results

3.1. Solvatochromic analysis

The solvatochromic behavior of compounds **1–7** was examined through the analysis of their UV-Vis absorption spectra recorded in a selected set of solvents and solvent mixtures over the wavelength range of 200–500 nm. The recorded spectra showed no dependence on compound concentration, indicating the absence of dimerization or formation of higher-order aggregates. The representative spectra in ethanol are provided in Figure 2, while the corresponding absorption maxima are summarized in Table 1.

All investigated compounds exhibit an absorption band associated with the $\pi \rightarrow \pi^*$ electronic transition within 250–270 nm. Furthermore, a less intense band is observed in the 350–390 nm range for all compounds, which can be attributed to the $n \rightarrow \pi^*$ transition. In some solvents and solvents mixture, there is an additional band in the range 220–240 nm, which can be attributed to $\pi \rightarrow \pi^*$ transition. Relative to the unsubstituted compound **4**, the incorporation of both electron-donating and electron-withdrawing groups produces a pronounced red shift of the absorption maxima.

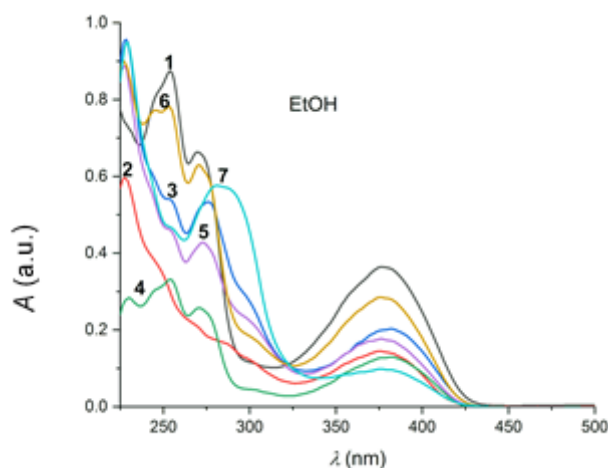


Figure 2. UV-Vis spectra of the investigated compounds in ethanol.

The influence of solvent polarity and hydrogen-bonding interactions, on the position of the absorption maxima is inherently complex and was examined using the general solvatochromic equations proposed by Kamlet and Taft (3):

$$\nu_{\max} = \nu_{\max 0} + a\alpha + b\beta + s\pi^* \quad (3)$$

where $\nu_{\max}$ is a solvent-dependent physicochemical property in a given solvent, $\nu_{\max 0}$ is a statistical quantity that corresponds to the absorption frequency in cyclohexane as a reference solvent, α is a measure of the solvent ability to donate a proton when establishing a hydrogen bond, β is a measure of the solvent ability to receive a proton when establishing a hydrogen bond, π^* is a measure of the solvent dipolarity/polarizability.

The values of the regression coefficients with a probability of 95 %, together with the percentage contribution of solvatochromic parameters are shown in Table 2. Based on the high values of the obtained regression coefficients and the Fisher parameter, the results of the correlation of absorption frequencies with solvatochromic parameters can be considered satisfactory. The data summarized in Table 2 show a bathochromic shift of the absorption maxima with increasing solvent polarity, as evidenced by the negative sign of the s coefficient. This trend reflects a more effective stabilization of the excited state relative to the ground state. The negative values of the b coefficient indicate that solvent hydrogen bonding basicity has a greater impact on the excited state than on the ground state. In a similar manner, the negative values of the a coefficient for compounds **2** and **6** demonstrate that solvent hydrogen bonding acidity also preferentially stabilizes the excited state. The negative a term can be attributed to strong intermolecular hydrogen bonding between hydrogen bond donor (HBD) solvents and the carbonyl functionalities of the investigated compounds, leading to a decrease in electron density and an enhancement of the intramolecular charge-transfer (push–pull) character. Based on the relative contributions of the solvatochromic parameters, it can be inferred that dipolarity/polarizability is the dominant solvent effect for compounds **1**, **3**, **4**, **5**, **7** whereas solvent acidity governs the behavior of compounds **2** and **6**.

Table 1: Absorption maxima of the investigated compounds (1–7) in selected solvents and their mixtures.

No. Solvent/ $\lambda_{\max}$	1	2	3	4	5	6	7
Methanol	220, 270, 383	227, 275, 377	226, 274, 383	227, 270, 383	227, 273, 376	224, 271, 383	225, 271, 376
Methanol/Water (80:20) ^a	255, 270, 383	226, 284, 376	226, 279, 382	226, 270, 383	227, 273, 376	223, 271, 376	225, 292, 377
Methanol/Water (60:40) ^a	246, 285, 390	278, 354, 376	281, 354, 390	277, 354, 376	288, 354, 376	291, 355, 392	247, 293, 355
Methanol/Water (40:60) ^a	247, 276, 385	226, 279, 384	226, 278, 384	226, 274, 385	226, 277, 384	278, 393	225, 291, 377
Ethanol	254, 270, 382	227, 287, 383	227, 277, 383	227, 271, 382	227, 273, 382	253, 277, 382	289, 383
Ethanol/Water (80:20) ^a	246, 271, 382	284, 380	277, 383	271, 382	273, 380	274, 360, 377	291, 376, 382
Ethanol/Water (60:40) ^a	291, 353, 384	278, 355, 377	283, 389	278, 387	293, 381	289, 380	293, 353, 383
Ethanol/Water (40:60) ^a	246, 275, 384	226, 279, 376	226, 278, 383	227, 277, 383	226, 279, 368	222, 277, 384	226, 292, 376
Ethanol/Water (40:60) ^a	246, 275, 384	226, 279, 376	226, 278, 383	227, 277, 383	226, 279, 368	222, 277, 384	226, 292, 376
2-Propanol	244, 270, 376	281, 358, 383,	278, 360, 383	243, 270, 382	273, 362, 377	243, 270, 377	280, 358, 382
2-Propanol/ Water (80:20) ^a	270, 383	271, 360, 383	275, 382	274, 376, 383	274, 376	271, 376	278, 381
2-Propanol/ Water (60:40) ^a	245, 291, 409	281, 386	279, 385	278, 356, 387	285, 388	285, 387	292, 353, 376
2-Propanol/ Water (40:60) ^a	246, 275, 367	280, 376	277, 376	271, 383	278, 383	276, 377	283, 376
2-Propanol/ Methanol (80:20) ^a	250, 270, 376	227, 278, 376	277, 363, 383	253, 271, 380	271, 375	272, 376	279, 378
2-Propanol/ Methanol (60:40) ^a	254, 270, 377	280, 359, 376	254, 274, 381	246, 270, 382	273, 376	245, 271, 376	285, 358, 376
2-Propanol/ Methanol (40:60) ^a	253, 269, 376	268, 377	277, 382	245, 270, 382	253, 272, 378	243, 271, 377	277, 376
2-Propanol/ Ethanol (80:20) ^a	245, 270, 368	271, 355, 376	277, 377	271, 376, 385	227, 273, 376	244, 271, 376	279, 367, 378
2-Propanol/ Ethanol (60:40) ^a	273, 379	276, 356, 380	277, 382	271, 380	276, 356, 380	277, 382	273, 379
2-Propanol/ Ethanol (40:60) ^a	271, 380	268, 358, 380	277, 383	272, 383	277, 358, 380	277, 383	271, 380

^aVolumetric composition (of the solvent mixture).

Table 2. Regression fits to solvatochromic parameters (3) and percentage contribution of solvatochromic parameters.

No.	ν_0 (10^3 cm^{-1})	S (10^3 cm^{-1})	b (10^3 cm^{-1})	a (10^3 cm^{-1})	R^a	s^b	F^c	$P\pi^*$ (%)	$P\alpha$ (%)	$P\beta$ (%)
1	45.77 (± 3.26)	-11.27 (± 1.36)	-5.26 (± 2.69)	1.61 (± 1.44)	0.95	0.42	23	62.10	29.00	8.89
2	56.53 (± 2.93)	-3.34 (± 0.89)	-14.96 (± 2.31)	-7.46 (± 1.31)	0.923	0.34	17	12.96	58.08	28.95
3	40.05 (± 1.62)	-3.27 (± 0.58)	-2.98 (± 0.58)	0.34 (± 0.03)	0.89	0.17	11	49.64	45.25	5.10
4	40.94 (± 1.22)	-3.77 (± 0.39)	-2.91 (± 1.05)	0.33 (± 0.05)	0.96	0.14	31	53.73	41.54	4.73
5	45.77 (± 3.26)	-11.27 (± 1.36)	-5.26 (± 2.69)	1.61 (± 1.44)	0.95	0.42	23	62.10	29.00	8.89
6	57.49 (± 2.42)	-3.63 (± 0.77)	-15.46 (± 1.88)	-7.82 (± 1.08)	0.95	0.29	27	13.48	57.45	29.06
7	40.05 (± 1.62)	-3.27 (± 0.58)	-2.98 (± 1.39)	0.34 (± 0.01)	0.89	0.17	11	49.63	5.10	45.26

^aCorrelation coefficient; ^bStandard error of the estimate; ^cFisher's test;

3.2. Antioxidant activity of the investigated compounds

The antioxidant potential of the investigated compounds (1–7) was evaluated using the ABTS assay and compared with ascorbic acid (Figure 3). Antioxidants act by donating hydrogen atoms or electrons to neutralize free radical species [8]. Analysis of IC_{50} values indicated that each compound exhibits better antioxidant activity relative to the reference standard, ascorbic acid, with lower IC_{50} values. Among the series, compound 1 emerged as the most potent ($IC_{50} = 1.08 \text{ mM}$), whereas compound 2 displayed the lowest activity ($IC_{50} = 1.32 \text{ mM}$), which nevertheless remains higher than that of ascorbic acid ($IC_{50} = 1.45 \text{ mM}$). A comparative evaluation of IC_{50} values established the relative antioxidant ranking as follows: **1 > 4 > 7 > 6 > 3 > 5 > 2** > ascorbic acid. These findings underscore the promising radical-scavenging capabilities of the synthesized derivatives and highlight their potential as promising candidates for further development in antioxidant focused studies.

Solvent effects on the antioxidant potential of the investigated compounds (1–7) were assessed by correlating the IC_{50} values with the a/s ratio, reflecting dominant solvation contributions (Equation 3). A comprehensive correlation encompassing all compounds was established (Equation 4):

$$IC_{50} = 96.70(\pm 0.44) + 0.22(\pm 0.05) |a/s| \quad (4)$$

$$(R = 0.81, s = 0.46, F = 7, n = 6)$$

Equation (4) could be interpreted analogously to the Abraham model, as the coefficients a and s correspond to the hydrogen-bond basicity and dipolarity/polarizability of the compounds, respectively. The Abraham framework, based on a theoretical solvent–solute cavity model, effectively correlates diverse physicochemical properties of solutes. According to Equation (4), increased hydrogen-bond acidity appears to reduce antioxidant activity, whereas higher dipolarity/polarizability promotes it [9–11].

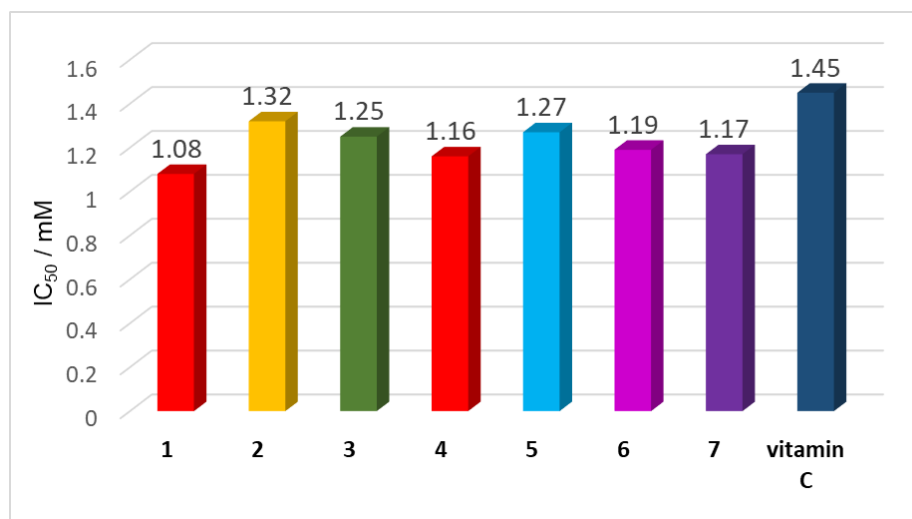


Figure 4. The antioxidant properties of investigated compounds compared to the ascorbic acid.

4. Conclusion

Seven 3,3,6,6-tetramethyl-3,4,6,7,9,10-hexahydroacridine-1,8-diones, bearing 4-hydroxy-phenyl group in position 9 and various 4-substituted benzyl groups in position 10, were synthesized. The antioxidant activity, assessed via the ABTS assay, revealed that all derivatives slightly better radical-scavenging capacity relative to ascorbic acid, with IC_{50} values ranking as $1 > 4 > 7 > 6 > 3 > 5 > 2 > \text{ascorbic acid}$. The observed correlations between absorption frequencies and the Kamlet-Taft solvent parameters indicate that this model can effectively account for hydrogen-bonding interactions and solvent dipolarity/polarizability effects on the absorption maxima shifts of these compounds. Overall, the presented approach provides a predictive tool for assessing the antioxidative potential of acridine-1,8-dione derivatives.

5. Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No., 451-03-33/2026-03/200287, 451-03-34/2026-03/200135 and 451-03-33/2026-03/200026).

6. References

- [1] Denny, W. A., Acridine derivatives as chemotherapeutic agents, *Current medicinal chemistry*, 9 (2002), 18, pp. 1655–1665.
- [2] Wainwright, M., Acridine-A neglected antibacterial chromophore. *The Journal of antimicrobial chemotherapy*, 47, (2001), 1, pp. 1–13.
- [3] El-Ashry, E. S. H., El-Tamany, E. S., Biological activity of acridine derivatives, *European Journal of Medicinal Chemistry*, 66, (2013), pp. 106–118.
- [4] Khatab, H., Hammad, S. E., El-Fakharany, E. M., Hashem, A. I., El-Helw, E. A. E., Synthesis and cytotoxicity evaluation of novel 1,8-acridinedione derivatives, *Scientific reports*, 13, (2023), pp. 15093.
- [5] Kuhn, B., Mohr, P., Stahl, M., Intramolecular hydrogen bonding in medicinal chemistry, *Journal of Medicinal Chemistry*, 53, (2010), pp. 2601–2611.
- [6] Lazić, A., Mihajlović, E., Kapavarapu, R., Đorđević, I., Krajnović, T., Maksimović-Ivanić, D., Mijatović, S., Trišović, N., Tumor cell growth inhibition by acridine-1,8-dione derivatives, *Bioorganic Chemistry*, 164, (2025), pp. 108894–108907.

-
- [7] **Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C.,** Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay, *Free radical biology and medicine*, 26, (1999), pp. 1231–1237.
- [8] **Li, P. Z., Liu, Z. Q.,** Ferrocenyl-contained dendritic-like antioxidants with dihydropyrazole and pyrazole as the core: investigations into the role of ferrocenyl group and structure–activity relationship on scavenging radical and protecting DNA, *Tetrahedron*, 69, (2013), pp. 9898–9905.
- [9] **Hmuda, S. F., Banjac, N. R., Trišović, N. P., Božić, B. Đ., Valentić, N. V., Ušćumlić, G. U.,** Solvent effects on the absorption spectra of potentially pharmacologically active 5-alkyl-5-arylhydantoins-a structure-property relationship study, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 78, (2013), pp. 628–635.
- [10] **Zhao, Y. H., Le, J., Abraham, M. H., Hersey, A., Eddershaw, P. J., Luscombe, C. N., Butina, D., Beck G., Sherborne, B., Cooper, I., Platts, J. A.,** Evaluation of human intestinal absorption data and subsequent derivation of a quantitative structure-activity relationship (QSAR) with Abraham descriptors, *Journal of Pharmaceutical Science*, 90, (2001), pp. 749–784.
- [11] **Abraham, M. H., Ibrahim, A., Zissimos, A. M., Zhao, Y. H., Comer, J., Reynolds, D. P.,** Application of hydrogen bonding calculations in property based drug design, *Drug Discovery today*, 15, (2002), pp. 1056–1063.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.047>

Ključne reči:
azobenzen; solvatohromizam;
Kamlet-Taftova jednačina

EVALUACIJA UTICAJA RASTVARAČA NA POMERANJE APSORPCIONIH MAKSIMUMA AZO BOJA

Key words:
azobenzene; solvatochromism;
Kamlet-Taft equations

SOLVENT-DEPENDENT SHIFTS IN THE ABSORPTION MAXIMA OF AZO DYES

Kristina GAK SIMIĆ

*Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0003-3928-9967*

Luka MATOVIĆ

*Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0003-4945-7776*

Aleksandra MAŠULOVIĆ

*Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0002-5279-7694*

Nemanja TRIŠOVIĆ

*Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-9231-4810*

Jelena LAĐAREVIĆ

*Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-5554-7295*

Anita LAZIĆ

*Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0003-4855-3782*

Petar JOVANOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Marija DIMITRIJEVIĆ*

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

* mmilosevic@tmf.bg.ac.rs

ORCID: 0000-0002-4999-1664

Azo boje predstavljaju strukturno najraznovrsniju klasu organskih jedinjenja, koju karakteriše prisustvo jedne ili više azo-grupa ($-N=N-$) koje povezuju dva organska fragmenta, pri čemu je bar jedan aromatičan. Najčešće se dobijaju metodom diazokuplovanja, gde diazonijumove soli reaguju sa aromatičnim jedinjenjima poput fenola, naftola ili arilamina. Značaj azo boja u industriji je ogroman, koriste se za bojenje tekstila, kože, plastike i kozmetičkih proizvoda, a njihov udeo u ukupnoj proizvodnji boja prelazi 60%. U ovom radu, ispitivan je uticaj rastvarača na pomeranje apsorpcionih maksimuma dve azobenzenske boje. Da bi se istražile intermolekulske interakcije koje se uspostavljaju između molekula ove dve azobenzenske boje i molekula rastvarača, snimljeni su apsorpcioni spektri u setu rastvarača i njihovim binarnim smešama. Analiziran je uticaj polarnosti rastvarača i efekata supstituenata na položaj, intenzitet i oblik apsorpcionog maksimuma. Dobijeni rezultati omogućiće bolje razumevanje uticaja hemijske strukture na spektroskopska svojstva ovih boja. Obzirom na širok spektar primene azobenzenskih boja i očekivani porast njihovog značaja, rezultati ovog istraživanja predstavljaju korisnu osnovu za buduće studije u oblasti sintetskih boja, sa potencijalom za razvoj novih boja i poboljšanje svojstava postojećih.

Azo dyes represent one of the most structurally diverse classes of organic compounds, characterized by one or more azo groups ($-N=N-$) connecting two organic moieties, at least one of which is aromatic. They are predominantly synthesized via classical diazocoupling, in which diazonium salts react with aromatic compounds such as phenols, naphthols, arylamines. Owing to their unique coloration, chemical stability, and versatility, azo dyes play a central role in industrial applications, including the coloring of textiles, leather, plastics, and cosmetics, accounting for over 60% of global dye production. In this study, the influence of solvents on the absorption maxima of two synthesized azobenzene dyes was extensively investigated. The effects of solvent polarity and substituent effects on the position, intensity, and shape of the absorption maxima were analyzed, providing insight into

the underlying intermolecular interactions. These findings provide a detailed understanding of solvent-solute interactions and offer predictive guidance for modulating dye properties. Given the growing industrial relevance of these dyes, the insights gained in this work will establish a starting point for the rational design of new dyes

1. Introduction

Azo dyes represent the largest and most diverse class of synthetic dyes, characterized by the presence of one or more azo ($-N=N-$) chromophoric groups linking aromatic moieties. Due to their structural versatility, ease of synthesis, and variable physicochemical properties, azo dyes have found widespread applications in textile, pharmaceutical, food, and cosmetic industries [1,2]. The color of azo dyes arises from extended π -conjugation and could be further modulated by the introduction of electron-donating and electron-withdrawing substituents, which influence their optical and electronic properties [3]. Substituents such as $-OH$, $-NH_2$, or $-NO_2$ significantly influence the electronic distribution within the molecule, thereby modulating spectral, redox, and solvation behavior. The solubility and lipophilicity of azo dyes are strongly dependent on their substitution pattern and the presence of polar functional groups, which govern intermolecular interactions such as hydrogen bonding and dipole-dipole interactions. Furthermore, azo dyes often exhibit azo-hydrazone tautomerism, which can influence their stability, color, and reactivity under different solvent and pH conditions. Beyond their industrial relevance, azo dyes have attracted considerable attention in medicinal and material chemistry. Numerous azo dyes possess biological activities, including antimicrobial, anticancer, and antioxidant, making them promising scaffolds for drug design and development [4,5]. In addition, their ability to undergo reversible *cis-trans* isomerization under light irradiation has enabled their use as molecular switches, photo responsive materials, and optical data storage systems [6]. In this context, the design and synthesis of novel azo derivatives with modified physicochemical and biological properties remain an important area of research, combining synthetic chemistry, computational modeling, and pharmacological evaluation to explore their potential applications [2,5].

In addition, due to their extended π -conjugated systems, the physicochemical properties of azo dyes are highly influenced by solvent effects. Understanding these solvent effects is crucial for rational design of dyes with modified optical and electronic properties. Linear solvation energy relationship (LSER) models provide a quantitative framework to analyze and predict such solvent-dependent properties. Among these, the Kamlet-Taft model where parameters such as dipolarity/polarizability and hydrogen-bonding ability significantly impact their spectral and electronic properties, is widely applied. In the context, LSER analysis allows deconvolution of specific interactions of azo dyes, such as hydrogen bonding, from nonspecific polar and dispersive effects, providing insights into how solvent polarity modulate chromophore behavior [7,8]. By applying these models, we could rationalize solvatochromic shifts, predict dye performance in various media, and guide the design of functional dyes for various applications. Guided by these considerations, we synthesized two azobenzene dyes (Figure 1), compound **1** via classical diazo-coupling reaction and compound **2** by introducing a hydrocarbon chain into compound **1**. Their chemical structures and purity were confirmed by melting points, elemental analysis FT-IR, and UV-Vis spectroscopy. To investigate dye-solvent interactions, absorption spectra were measured in the 200–500 nm range across different solvents of varying polarity and their binary mixtures, and the influence of solvent on band position, intensity, and shape was evaluated using correlations with Kamlet-Taft solvent parameters.

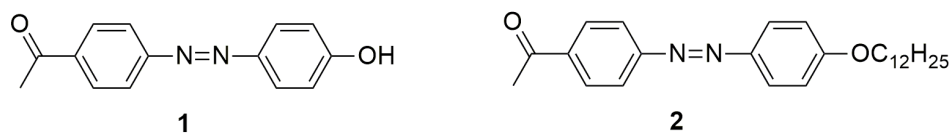
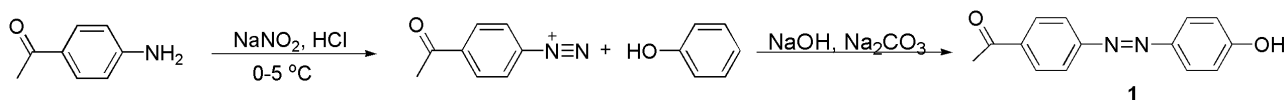


Figure 1. The chemical structure of the investigated azo dyes.

2. Experimental

2.1. General procedure for the synthesis of compound 1

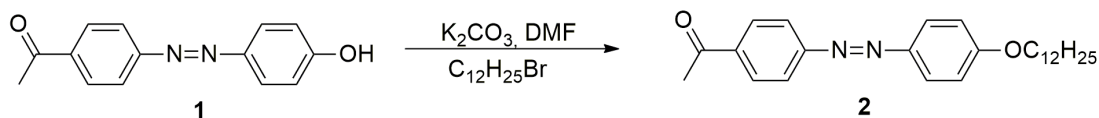
The synthetic route was carried out according to Scheme 1. A solution of sodium nitrite (0.075 mol, 5.01 g) in 25 ml of water was dropped into a mixture of 4-aminoacetophenone (0.045 mol, 6.07 g), hydrochloric acid (36%, 15 ml) and water (30 ml). After that, the solution was stirred at 0–5 °C for 30 min. After a pistachio colored solution of the diazonium salt had formed, it was added dropwise to a solution of phenol (4.2 g, 0.045 mol), sodium hydroxide (1.8 g, 0.045 mol) and sodium carbonate (4.2 g, 0.04 mol) in water (30 ml) at 0–5 °C. The mixture was agitated for 60 minutes and its pH was adjusted to 2–3. The product was collected by filtration, washed with water until the pH of the filtrate was neutral and dried. The crude product was purified by dissolving in ethanol and precipitating twice by water and dried under vacuum oven for 48 hours [9].



Scheme 1. Synthesis of compound 1.

2.2. General procedure for the synthesis of compound 2

The synthetic route was carried out according to Scheme 2. 1-(4-((4-hydroxyphenyl)diazenyl)phenyl)ethanone (1) (0.012 mol, 4.0 g) was dissolved in *N,N*-dimethylformamide (50 mL). Potassium carbonate (0.15 mol, 20.73 g) and 1-bromododecane (0.018 mol, 4.48 g, 4.5 mL) were added, and the reaction mixture was stirred at room temperature for 72 h. Reaction progress was monitored by TLC. Upon completion, the mixture was poured into 100 mL of cold water and extracted with dichloromethane (3 × 30 mL). The combined organic layers were washed with 5% aqueous sodium hydroxide and water (30 mL), dried over anhydrous magnesium sulfate, filtered, and concentrated by evaporation. The crude product was purified by column chromatography [10].



Scheme 2. Synthesis of compound 2.

2.3. Spectroscopic measurements

The melting points were measured on an Electrothermal melting point apparatus without correction. FT-IR spectra of all synthesized compounds were recorded in the range from 400 to 4000 cm^{-1} using a Thermo Scientific Nicolet iS¹⁰ spectrometer. Elemental analysis of the investigated compounds was carried out using microanalyzer Elemental Vario EL III. The ultraviolet-visible (UV-Vis) absorption spectra were recorded on a Shimadzu 1700 spectrophotometer in the region 200–500 nm. The spectra were run in spectroquality solvents (Fluka) using a concentration of $1 \times 10^{-5} \text{ mol dm}^{-3}$.

1-(4-((4-Hydroxyphenyl)diazenyl)phenyl)ethanone (**1**): Brown solid; Yield: 80%; m. p. 210–213 °C; FT-IR (ATR/ cm^{-1}): 3116, 2809, 2707, 2114, 1938, 1654, 1588, 1501, 1467, 1426, 1403,

1354, 1306, 1268, 1222, 1138, 1109, 1099, 1018, 1007, 963, 841, 796, 735, 715, 642, 589, 537, 529, 467, 421; ¹HNMR (400 MHz, acetone-*d*₆): δ = 10.11 (s, 1H), 8.08 (d, *J* = 8.4 Hz, 2H), 8.00 (d, *J* = 8.4 Hz, 2H), 7.90 (d, *J* = 8.4 Hz, 2H), 7.03 (d, *J* = 8.4 Hz, 2H); Elemental analysis (%) calcd. for C₁₃H₁₀N₂O₂: C 69.02, H 4.46, N 12.38; found: C 69.01, H 4.53, N 12.35. The obtained results are consistent with those reported in the literature [11].

1-(4-((4-Dodecyloxy)phenyl)diazenyl)phenyl)ethanone (2): Orange solid; Yield: 92%; m. p. 115–118 °C; FT-IR (ATR/cm⁻¹): 3338, 3074, 2955, 2917, 2872, 2848, 2037, 1980, 1941, 1885, 1675, 1639, 1603, 1584, 1500, 1472, 1463, 1394, 1258, 1313, 1268, 1245, 1145, 1107, 1045, 1035, 1025, 1006, 964, 854, 840, 825, 795, 765, 729, 719, 629, 619, 570, 549, 532, 517, 461433; Elemental analysis (%) calcd. for C₂₆H₃₆N₂O₂: C 76.43, H 8.88, N 6.86; found: C 76.40, H 8.91, N 6.86.

3. Results

3.1. Azo-hydrazone tautomerism

Azo-hydrazone tautomerism represents a fundamental structural phenomenon observed in hydroxy-substituted azo compounds, arising from the intramolecular transfer of a labile proton between the azo bridge nitrogen atom and a conjugated hydroxyl group [1,3]. This equilibrium involves inter-conversion between the azo form (–N=N–) and the hydrazone form (–NH–N=), often accompanied by the formation of a keto-group, resulting in distinct electronic and structural properties. The position of this equilibrium is highly sensitive to various factors, including solvent polarity, hydrogen-bonding ability, substituent pattern, and temperature [7,8]. The hydrazone tautomer is generally favored in polar and protic environments due to enhanced stabilization through hydrogen bonding, whereas the azo form is more prevalent in nonpolar media [3,10]. This dynamic equilibrium significantly influences the optical, physicochemical, and biological properties of azo dyes, including their absorption spectra, color, reactivity, and potential pharmacological activity [1,12]. Understanding azo-hydrazone tautomerism is therefore essential for the rational design of functional azo compounds, especially in applications involving solvatochromism, molecular switching, and drug development. Quantitative approaches, such as spectroscopic analysis and computational methods, have been widely employed to elucidate the factors governing this equilibrium and to correlate structural features with observed properties [7,12]. The investigated 1-(4-((4-Hydroxyphenyl)diazenyl)phenyl)ethanone (compound **1**) may exist in two main tautomeric forms (Figure 2) which is in agreement with Özen's inference that some azobenzene dyes occur as two tautomers and that tautomerism is altered mainly by the nature of the substituents [13]. The infrared spectrum of compound **1** shows two intense carbonyl bands at the 1654 and 1588 cm⁻¹ which are assigned to the diketohydrazone form. The FT-IR spectra also exhibited a band at 3116 cm⁻¹ which was attributed to the –N–H group of hydrazone tautomeric form. If the azobenzene dyes were predominantly in the azo form, there would be no absorption band for the hydrazone group and there would be a broad absorption band for the –OH group from the phenyl ring (about 3500 cm⁻¹) and one band for the carbonyl group.

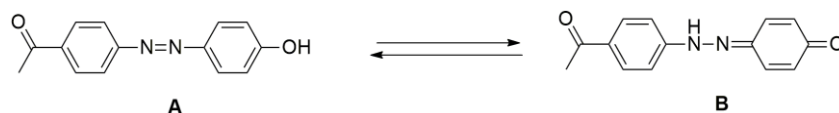


Figure 2. The equilibrium between the azo form (**A**) and hydrazone form (**B**) form of compound **1**.

Since compound **2** lacks a labile proton (due to alkylation of the –OH group), it does not exhibit azo-hydrazone tautomerism, and adopts solely the azo tautomeric form. This is confirmed by the presence of strong vibration at 1500 cm⁻¹ ascribed to –N=N– stretching vibrations.

3.2. Solvatochromic analysis

Solvatochromic behavior of the investigated azobenzene dyes (**1** and **2**) was examined in protic solvents and solvent binary mixtures (Table 1). Representative UV-Vis spectra of azobenzene dyes in ethanol (Figure 3) exhibit a dominant band at approximately 360 nm, attributed to the azo form. In the case of compound **1**, a weak band is observed at higher wavelengths (around 450 nm) and is ascribed to hydrazone form of this dye. Also, there is one weak absorption band in the range 240–270 nm. The data presented in Table 1 indicate that the position of the absorption maxima is strongly influenced by the nature of substituents on the phenyl moiety, particularly by alkylation of the hydroxyl group. Specifically, the electron-donating –OH group in the *para*- position of the phenyl ring induces a more pronounced bathochromic shift than the –OR group in most of the investigated solvents, as evidenced by the absorption maxima.

Table 1: Absorption maxima of the investigated compounds (**1** and **2**) in selected solvent set.

No.	1	2
Solvent	$\lambda_{\max}$	$\lambda_{\max}$
Methanol	241, 358, 378	229, 358, 370
Methanol/Water (80:20) ^a	262, 358	248, 349, 383
Methanol/Water (60:40) ^a	256, 356	350, 382
Methanol/Water (40:60) ^a	261, 359	256, 378
Ethanol	237, 264, 364	237, 265, 363
Ethanol/Water (80:20) ^a	261, 367	256, 353, 379
Ethanol/Water (60:40) ^a	267, 287, 374	301, 384
Ethanol/Water (40:60) ^a	237, 262, 371	261, 360
2-Propanol	262, 357, 385	263, 369, 374
2-Propanol/ Water (80:20) ^a	263, 370	275, 391
2-Propanol/ Water (60:40) ^a	239, 261, 370	255, 360, 374
2-Propanol/ Water (40:60) ^a	237, 261, 372	235, 260, 369
2-Propanol/ Methanol (80:20) ^a	259, 362, 371	254, 357
2-Propanol/ Methanol (60:40) ^a	262, 358, 375	260, 357, 372
2-Propanol/ Methanol (40:60) ^a	261, 374	236, 262, 369
2-Propanol/ Ethanol (80:20) ^a	263, 359, 374	264, 358, 374
2-Propanol/ Ethanol (60:40) ^a	262, 356, 380	261, 355, 380
2-Propanol/ Ethanol (40:60) ^a	271, 380	268, 358, 380

^aVolumetric composition (of the solvent mixture)

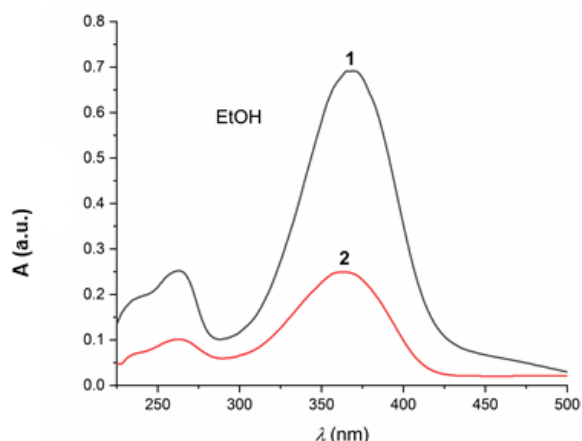


Figure 3. UV-Vis absorption spectra of the investigated compounds in ethanol.

Further insight into solvent effects was obtained by correlating the absorption frequencies ($\nu = 1/\lambda$, cm^{-1}) of the azo tautomeric form with the Kamlet-Taft solvatochromic equation (Eq. 1), enabling quantitative assessment of solvent polarity and hydrogen-bonding contributions:

$$\nu_{\max} = \nu_{\max 0} + a\alpha + b\beta + s\pi^* \quad (1)$$

where π^* is an index of the solvent dipolarity/polarizability, β is measure of the solvent hydrogen-bonding acceptor ability (HBA), α is a measure of the solvent hydrogen-bonding donor ability (HBD) and ν_0 is the regression value of the solute property in cyclohexane as the reference solvent. The regression coefficients a , b and s , in equation (1) are a measure of the relative susceptibility of the absorption frequencies to the indicated solvent parameters. The LSER concept developed by Kamlet and Taft represents one of the most ambitious and successful quantitative treatments of solvation effects which assumes attractive interactions between a solute and its environment enabling an estimation the ability of the investigated compounds to form hydrogen bonds. The results of multiple linear regression analysis (Table 2) for azo tautomeric form indicated that $\nu_{\max}$ in the selected solvent set showed satisfactory correlation with the solvent parameters. The positive sign of the coefficient a for both compounds indicate a hypsochromic shift with the increase of the basicity of the solvent, and stabilization of the ground state with respect to excited. Coefficient s is positive for compound 1 and negative for compound 2 indicating different shifts with increase of the solvent polarity. Also, coefficient b is negative for compound 1 indicating bathochromic shift with the increase of solvent acidity, while for compound 2 an opposite effect is observed. Obtained data demonstrated that the solvent effects on the position of UV-Vis absorption spectra of investigated azobenzene dyes are very complex and strongly dependable of the electronic influence of p -substituent on the phenyl moiety. The percentage contributions of the solvatochromic parameters (Table 2) for the investigated azobenzene dyes bearing strong electron-donating substituents on the phenyl moiety demonstrated that the most of the solvatochromism is consequence of the solvent basicity rather than dipolarity/polarizability.

Table 2. Regression fits to solvatochromic parameters (1) and percentage contribution of solvatochromic parameters.

No.	ν_0 (10^3 cm^{-1})	s (10^3 cm^{-1})	b (10^3 cm^{-1})	a (10^3 cm^{-1})	R^a	s^b	F^c	$P\pi^*$ (%)	$P\alpha$ (%)	$P\beta$ (%)
1	21.891 (± 4.430)	0.768 (± 0.264)	-0.519 (± 0.187)	5.478 (± 0.767)	0.972	0.209	46	11.35	7.67	80.97
2	12.286 (± 4.430)	-3.830 (± 0.993)	7.297 (± 2.314)	13.002 (± 2.521)	0.888	0.240	10	15.87	30.24	53.89

^aCorrelation coefficient; ^bStandard error of the estimate; ^cFisher's test;

The success degree of Eq. (1) is shown in Figures 4 and 5 by means of a plot of $v_{\max \text{ exp.}}$ versus $v_{\max \text{ calc.}}$ observed in ethanol for compounds **1** and **2** respectively.

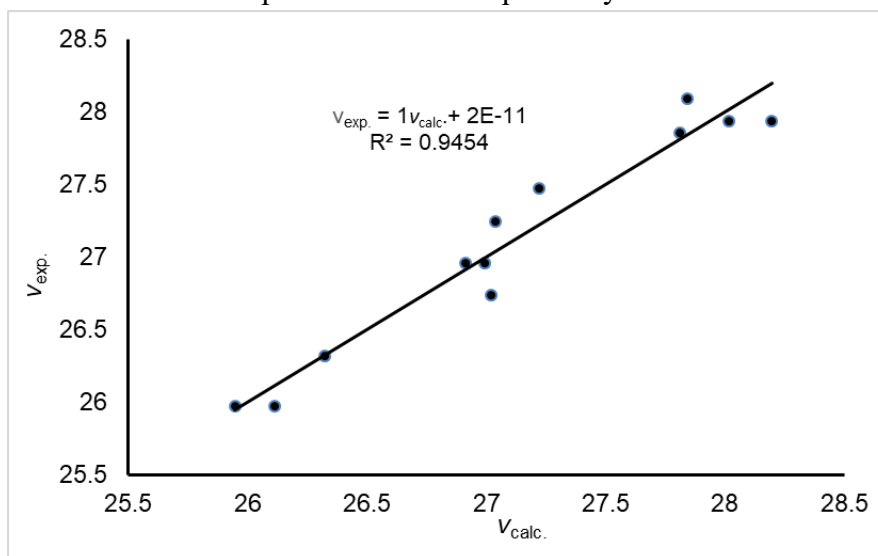


Figure 4. Experimental vs. calculated values of v from Eq. for compound **1**(1).

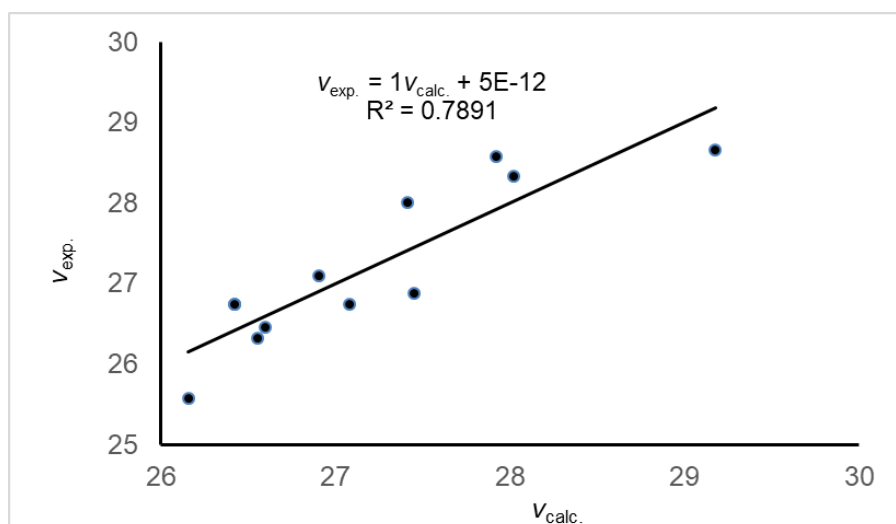


Figure 5. Experimental vs. calculated values of v from Eq. for compound **2**(1).

4. Conclusion

In this work, two azobenzene dyes were synthesized and completely structurally characterized by melting points, elemental analysis, FT-IR and UV-Vis spectroscopic measurements. The results indicated that compound **1** exists in hydrazone tautomeric form in the solid state, and dominantly as azo in different solvents and their mixtures. Due to the lack of labile proton in molecule, compound **2** exists solely in azo tautomeric form in both solid state and different solvents. The solvent effect on absorption maxima position is very complex and strongly dependent on the electronic nature of the substituent. The satisfactory correlation of the ultraviolet absorption frequencies on the azo tautomeric form of the investigated azo dyes Kamlet-Taft equations indicated that adequate model was selected giving correct interpretation of the linear solvation energy relationships of the intricate azobenzene system. The results revealed that most of the solvatochromism of the azo dyes is influenced by solvent basicity.

5. Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-33/2026-03/200135, 451-03-34/2026-03/200135 and 451-03-34/2026-03/200287).

6. Abbreviations

FT-IR	– Fourier Transform Infrared (spectroscopy)	LSER	– Linear solvation energy relationship
HBA	– Hydrogen bond acceptor	UV-Vis	– Ultraviolet-visible (spectroscopy)
HBD	– Hydrogen bond donor	λ_{max}	– Absorbance maximum
¹ HNMR	– Proton nuclear magnetic resonance		

7. References

- [1] **Zollinger, H.**, *Color Chemistry* 3rd ed., Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2003.
- [2] **Hunger, K.**, *Industrial Dyes: Chemistry, properties, applications*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2003.
- [3] **Griffiths, J.**, *Colour and constitution of organic molecules*, London, United Kingdom, 1976.
- [4] **Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., Ahmad, A.**, Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 177, (2010), pp. 70–80.
- [5] **Sharma, P., Rane, N., Gurram, V. K.**, Synthesis and biological evaluation of some novel azo derivatives as antimicrobial agents, *European Journal of Medicinal Chemistry*, 62, (2013), pp. 77–83.
- [6] **Bandara, H. M. D., Burdette, S. C.**, Photoisomerization in different classes of azobenzene, *Chemical Society Reviews*, 41, (2012), pp. 1809–1825.
- [7] **Kamlet, M. J., Taft, R. W. J.**, The solvatochromic comparison method. I. The β -scale of solvent hydrogen-bond acceptor (HBA) basicities, *Journal of American Chemical Society*, 98, (1976), pp. 377–383.
- [8] **Catalán, J.**, Toward a generalized treatment of the solvent effect based on four empirical scales: dipolarity (SdP, a New Scale), polarizability (SP), acidity (SA), and basicity (SB) of the medium, *The Journal of Physical Chemistry B*, 113, (2009), pp. 5951–5960.
- [9] **Xie, Z., He, H., Deng, Y., Wang, X., Liu C.**, Three-arm star compounds of 1,3,5-tri(azobenzeneenthyne)benzene cores and flexible PEO arms synthesis, optical functions, hybrid ormosyl gel glasses, *Journal of Materials Chemistry C*, 1, (2013), pp. 1791–1797.
- [10] **Jaman, Z., Khairuddean M., Guan-Seng, T.**, Liquid-crystal and fire-retardant properties of new hexasubstituted cyclotriphosphazene compounds with two Schiff base linking units, *Molecules*, 25, (2020), pp. 2122–2148.
- [11] **Kim, J.-H., El-Khouly, M. E., Araki, Y., Ito, O., Kay, K.-Y.**, Photoinduced processes of subphthalocyanine -diazobenzene-fullerene triad as an efficient excited energy transfer system, *Chemistry Letters*, 37, (2008), pp. 544–545.
- [12] **Kelemen, J., Turányi, T.**, An analysis of azo–hydrazone tautomerism of some azo dyes using quantum chemical methods, *Dyes and Pigments*, 62, (2004), pp. 127–133.
- [13] **Bandara, H. M. D., Burdette, S. C.**, Photoisomerization in different classes of azobenzene, *Chemical Society Reviews*, 41, (2012), pp. 1809–1825.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.055>

Ključne reči:
hidrometalurgija; površinska difuzija;
energija aktivacije;
temperaturna zavisnost

ANALIZA KINETIKE LUŽENJA BAKRA IZ KONCENTRATA SFALERITA POMOĆU MnO_2 -KI OKSIDACIONOG SISTEMA

Key words:
hydrometallurgy;
surface diffusion; activation energy;
temperature dependence

KINETIC ANALYSIS OF COPPER LEACHING FROM A SPHALERITE CONCENTRATE BY THE MnO_2 -KI LEACHING OXIDATION SYSTEM

Dimitrije ANĐIĆ*
* d.andjic@itnms.ac.rs
Aleksandar JOVANOVIĆ

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd
ORCID: 0009-0001-6824-5202
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd
ORCID: 0000-0001-9867-9282

Mladen BUGARČIĆ

„Milan Blagojević“ AD, Lučani, Srbija
ORCID: 0000-0002-6119-4414

Vaso MANOJLOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-3009-2909

Nela VUJOVIĆ

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd
ORCID: 0009-0004-7451-8897

Corby ANDERSON

Kroll Institute for Extractive Metallurgy,
Mining Engineering Department, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA
ORCID: 0000-0003-0193-2208

Miroslav SOKIĆ

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd
ORCID: 0000-0002-4468-9503

Bakar predstavlja jedan od najvažnijih industrijskih metala zbog svoje široke primene i izuzetne toplotne i električne provodljivosti, kao i otpornosti na koroziju. Najznačajniji izvor bakra je halkopirit (CuFe_2S_2), koji se u prirodi javlja zajedno sa drugim sulfidnim mineralima, kao što su pirit, galenit i sfalerit, u ležištima ruda više metala. Sa iscrpljivanjem bogatih ruda, hidrometalurški procesi dobijaju sve veći značaj u preradi siromašnijih i složenijih sulfidnih koncentrata. U ovom istraživanju ispitivano je luženje bakra iz sfaleritnog koncentrata u sumpornoj kiselini uz dodatak pomoćnog sistema oksidansa MnO_2 -KI. Rezultati su pokazali da temperatura značajno utiče na kinetiku procesa, pri čemu povećanje temperature u opsegu od 40 do 80 °C dovodi do povećanja stepena luženja bakra. Dodatak KI ima ključnu ulogu u smanjenju pasivacije površine i povećanju dostupnosti oksidacionog sredstva, pri čemu je maksimalni stepen luženja od 82,1% postignut pri dodatku od 3 mas. % KI. Kinetička analiza ukazuje na relativno nisku energiju aktivacije (28,90 kJ mol⁻¹), što sugeriše da se proces efikasno odvija na umerenim temperaturama i da prati mehanizam rastvaranja bakra kontrolisan difuzijom. Dobijeni rezultati ukazuju na značajan potencijal primene ovog sistema u hidrometalurškoj preradi složenih sulfidnih sirovina.

Copper represents one of the most important industrial metals due to its wide application and exceptional thermal and electrical conductivity, as well as corrosion resistance. The most important source of copper is chalcopyrite (CuFe_2S_2), which occurs in nature together with other sulphide minerals, such as pyrite, galena and sphalerite, in polymetallic ore deposits. With the depletion of rich ores, hydrometallurgical processes gain increasing importance in the processing of poorer and more complex sulphide concentrates. In this study, the leaching of copper from sphalerite concentrate in sulphuric acid combined with auxiliary oxidans MnO_2 -KI system was investigated. The results

showed that temperature significantly affects the kinetics of the process, whereby an increase in temperature in the range from 40 to 80 °C leads to an increase in the degree of copper leaching. The addition of KI plays a key role in reducing surface passivation and increasing the availability of the oxidizing agent, with the maximum degree of leaching of 82.1% achieved at the addition of 3 wt.% KI. Kinetic analysis indicates a relatively low activation energy (28.90 kJ mol⁻¹), suggesting that the process proceeds efficiently at moderate temperatures and follows a diffusion-controlled copper dissolution mechanism. The obtained results indicate the significant potential of the application of this system in the hydrometallurgical processing of complex sulphide raw materials.

1. Introduction

Copper is one of the most important industrial metals due to high electrical and thermal conductivity, as well as its corrosion resistance, which enables wide application in modern technologies and infrastructure [1]. The primary source of copper is chalcopyrite (CuFeS₂), which commonly occurs in association with other sulphide minerals such as pyrite and sphalerite in polymetallic deposits [2, 3]. As the quality of ore resources declines, hydrometallurgical processes, particularly acid leaching, are gaining increasing importance, since they enable the treatment of complex concentrates with lower environmental impact compared to conventional pyrometallurgical methods [2, 4]. Leaching of chalcopyrite is typically carried out in acidic media in the presence of oxidizing agents to solubilize copper [5, 6, 7]. However, this mineral exhibits significant resistance to dissolution due to its stable structure and the tendency for passivation, *i.e.*, the formation of surface layers of elemental sulphur or polysulphides that hinder further reaction [5, 7, 8]. Similar mechanisms are observed in other sulphide minerals such as pyrite and sphalerite, which is particularly relevant when processing complex concentrates [3, 5]. Various oxidative systems have been investigated to enhance leaching kinetics. Hydrogen peroxide can accelerate the initial dissolution rate, although its application is limited by instability and the formation of passivating layers [9, 10]. The addition of certain additives or the use of physical activation methods can mitigate these effects and improve leaching efficiency [10, 11]. Oxidation using Fe³⁺ ions is also widely applied, where the Fe³⁺/Fe²⁺ redox pair enables continuous process operation, including in bioleaching systems [6, 12]. Nevertheless, these approaches may be accompanied by issues such as the formation of insoluble phases (*e.g.*, jarosite) and increased operational costs. Strong oxidants such as persulfates can generate highly reactive radicals and enhance sulphide oxidation; however, their use is often limited by economic and technological constraints, as well as side reactions in complex systems [13]. Additional challenges arise from interactions between different minerals within the concentrate, which may promote passivation and reduce metal recovery [8]. Recently, iodide/iodine systems have attracted considerable attention as efficient redox mediators. Iodine acts as a strong oxidant that can be continuously regenerated in solution, enabling sustained and more effective leaching while reducing passivation effects [14, 15]. These systems demonstrate good performance even under mild conditions, making them promising for the treatment of complex sulphide concentrates. Based on these considerations, this study investigates a MnO₂-KI oxidative system applied to a sphalerite concentrate containing chalcopyrite. The effects of key process parameters, particularly temperature and iodine concentration, on the kinetics and efficiency of copper leaching were systematically examined, with the aim of improving the understanding of the underlying mechanisms and optimizing the process.

2. Materials and methods

The base material used in this study was a sphalerite concentrate obtained from a polymetallic ore flotation plant (Rudnik, Serbia). Prior leaching assays, the collected sample was subjected to comminution followed by homogenization in a vibratory mill.

Leaching experiments were carried out following procedure from Bugarčić et al. 2025 [16]. In a closed glass reactor equipped with a helical stirrer and a temperature control system. The reaction system consisted of the initial concentrate (10 g) and an aqueous sulphuric acid solution (Zorka p.a., Šabac, Serbia), with a constant agitation rate of 300 rpm. During the experimental investigation, key operational parameters were systematically varied, including temperature (40, 60, 70, and 80 °C), leaching time (0–180 min), and the presence of additional oxidizing agents-manganese dioxide (Alkaloid, purity >95%, Skopje, North Macedonia) and potassium iodide (Merck, purity >95%, Darmstadt, Germany). Manganese dioxide was introduced in a stoichiometric amount relative to the total sulphide sulphur content, aiming at the complete oxidation of sulphide minerals to sulphate species. Potassium iodide (KI), employed as an auxiliary oxidant, was investigated up to a maximum practical concentration of 3 wt.% in order to achieve an optimal balance between process efficiency and economic feasibility.

At predetermined time intervals, aliquots of the leach solution were collected and analyzed using atomic absorption spectrophotometry (AAS, Perkin Elmer 703, Shelton, USA). The copper extraction efficiency (%) was calculated based on the AAS measurements.

For the interpretation of the process kinetics, appropriate kinetic models were applied. In this context, the modified Sharp method of reduced half-reaction time was employed to linearize the experimental data using suitable mathematical formulations.

The activation energy (E_a) was determined using the Arrhenius equation:

$$k = A \times \exp(-E_a/R \times T) \quad (1)$$

where A is the pre-exponential factor, k is the rate constant (s^{-1}), E_a is the activation energy ($J\ mol^{-1}$), R is the universal gas constant ($8.314\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$), and T is the absolute temperature (K). The activation energy was obtained graphically from the slope of the linear plot of $\ln(k)$ versus $1/T$.

3. Results and discussion

The chemical composition of the initial sample is presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition of Zn concentrate.

Element	Zn	S	Fe	Cu	Cd	Pb	As
wt. %	46.91	28.87	6.77	0.806	0.338	0.287	1.8×10^{-4}

The dominant element is zinc, occurring primarily in the form of the mineral sphalerite. It is followed by iron, which is present as pyrite, while copper is present in concentrations below 1% and occurs in the form of chalcopyrite.

Increase in temperature had a pronounced effect on the reaction kinetics and extraction efficiency (Figure 1). After 3 h of processing, a maximum copper leaching yield of 82.1% was achieved. The reduced extraction efficiency at lower temperatures can be attributed to the formation of a passivation layer on the surface of chalcopyrite particles, which limits the further progress of the reaction.

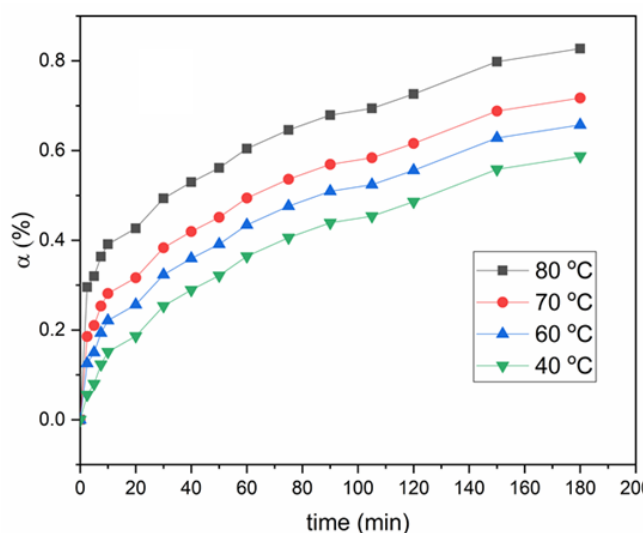
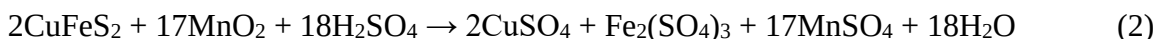


Figure 1. Temperature and reaction time effects on Cu leaching percentage.

In the presence of an adequate amount of MnO_2 , the dissolution of copper from chalcopyrite can be described by the following stoichiometric equation:



Reaction (2) proceeds both in the presence and absence of potassium iodide; however, side reactions may occur that adversely affect the overall leaching kinetics. The formation of passivation products such as elemental sulphur, anglesite, and barite can further reduce reactant accessibility and hinder diffusion through the reaction layer. The presence of iodine, generated in reaction (3), contributes to the degradation of the sulphur-based passivation film, thereby facilitating the continued oxidation of the mineral phase.



The formed iodine (I_2) further reacts with iodide ions (I^-), leading to the formation of triiodide ions. In the subsequent step, iodine acts as an oxidizing agent in the dissolution of copper–iron sulphide (chalcopyrite), being reduced back to iodide:



The leaching kinetics of copper from a sphalerite concentrate were analyzed using models based on the modified Sharp method, whereby the Jander model for three-dimensional diffusion through a product layer was identified as providing the best fit to the experimental data (Figure 2a). The high coefficients of determination ($R^2 \approx 0.97\text{--}0.98$) across the entire temperature range (40–80 °C), as shown in Figure 2b, confirm the reliability of this model.

The results indicate that the process rate is governed by the diffusion of dissolved metal ions and sulphide components through the product layer, which is most likely composed of elemental sulphur formed on the surface of chalcopyrite particles. This layer acts as a passivation barrier, limiting mass transfer and reducing leaching efficiency. Increasing the temperature significantly accelerates the reaction; however, it also promotes sulphur crystallization and the formation of a more compact and less permeable layer (Figure 2b). The addition of potassium iodide (>3 wt%) mitigates this effect by enabling the oxidation of elemental sulphur into soluble forms, thereby reducing diffusion resistance and enhancing leaching efficiency. This is further supported by the trends observed in Figure 2b.

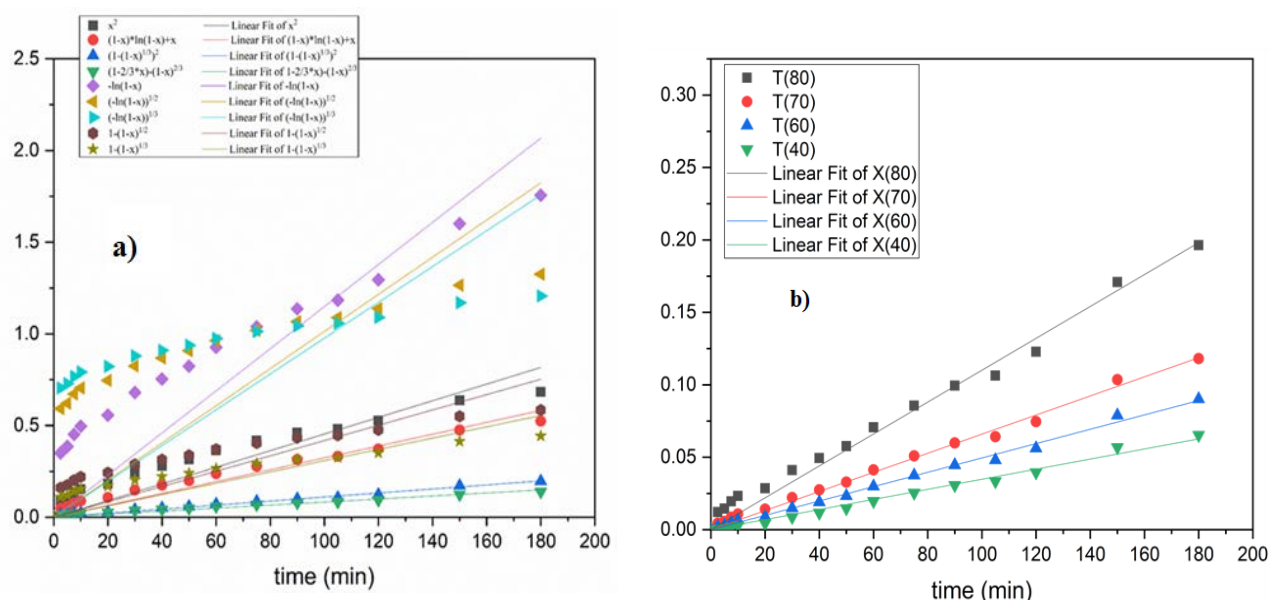


Figure 2. a) Modified Sharp's method in correlation with experimental results; b) Jander's model for experimental results at different temperatures.

The activation energy (E_a), determined using the linearized form of the Arrhenius equation, represents the final step in the kinetic analysis. The results shown in Figure 3 demonstrate a strong linear relationship ($R^2 > 0.95$), confirming the reliability of the applied approach. The calculated activation energy for copper leaching is approximately $28.90 \text{ kJ mol}^{-1}$, indicating a relatively low energy barrier.

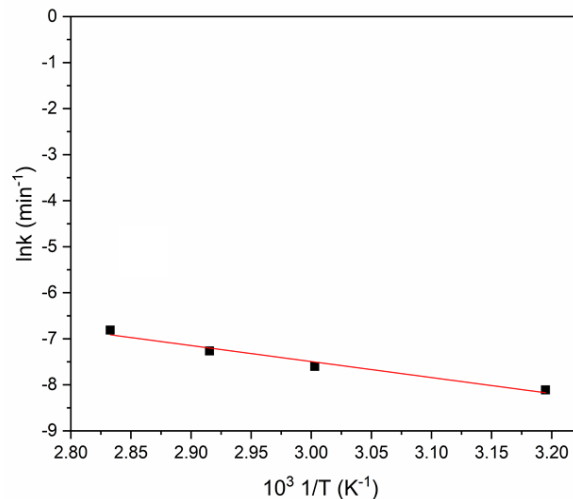


Figure 3. Activation energy for copper leaching from sphalerite concentrate.

The relatively low activation energy indicates that copper leaching is governed by a diffusion-controlled mechanism, associated with mass transport through the product layer. Such a low energy barrier suggests that the process can proceed efficiently even at moderate temperatures.

These findings are consistent with the experimental data and the good agreement with the Jander model, further confirming that diffusion is the rate-controlling step in the leaching of copper in this system.

4. Conclusions

This study investigates the leaching of copper from a sphalerite concentrate using an MnO_2 -KI oxidative system in an acidic medium. The results indicate that temperature and the presence of iodine are key factors influencing the kinetics and efficiency of the process. The analysis suggests that the process is governed by diffusion through a product layer, with a significant impact of surface passivation.

Key conclusions:

- The maximum copper extraction (~82%) was achieved at 80 °C, confirming the strong influence of temperature on process efficiency;
- The dominant leaching mechanism is described by the Jander model for three-dimensional diffusion, with high coefficients of determination ($R^2 \approx 0.97$ -0.98);
- The activation energy for copper leaching was determined to be approximately 28.90 kJ mol⁻¹, indicating a low energy barrier for the reaction;
- The low activation energy confirms that diffusion through the product layer is the rate-controlling step;
- The formation of elemental sulfur on the particle surface reduces reactant accessibility and slows down the reaction;
- Elevated temperatures promote sulfur crystallization and the formation of a more compact passivation layer;
- The presence of KI enables the formation of iodine species that oxidize sulfur into soluble forms, thereby reducing diffusion resistance;
- The MnO_2 -KI system demonstrates strong potential for application in the treatment of complex sulfide concentrates by improving leaching kinetics.

5. Acknowledgement

This paper was supported by the Ministry of Science and Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-33/2026-03/200023 and 451-03-34/2026-03/200135).

6. References

- [1] **Jaramillo, K.; Gómez, M.; Colet-Lagrange, M.**, From Copper Ores to E-Waste Processing: Can Urban Mining Practices Be Actually Integrated into Idle Capacity in Acid-Ferric Hydrometallurgical Facilities? *Miner. Eng.* 2025, 229, 109355.
- [2] **Bogdanović, G.D.; Petrović, S.; Sokić, M.; Antonijević, M.**, Chalcopryrite Leaching in Acid Media: A Review. *Metall. Mater. Eng.* 2020, 26, 177–198.
- [3] **Sokić, M.D.; Bugarčić, M.; Jovanović, A.**, Sphalerite Leaching in Acid Media: A Review. *Metall. Mater. Data* 2023, 1, 33–43.
- [4] **Moskalyk, R.R.; Alfantazi, A.M.**, Review of Copper Pyrometallurgical Practice: Today and Tomorrow. *Miner. Eng.* 2003, 16, 893–919.
- [5] **Gok, O.; Anderson, C.G.**, Dissolution of Low-Grade Chalcopryrite Concentrate in Acidified Nitrite Electrolyte. *Hydrometallurgy* 2013, 134–135, 40–46.
- [6] **Shiri, H.R.; Mokmeli, M.; Ghadamgahi, S.M.; Babakhani, A.**, Deep Eutectic Solvents (DESS) for Chalcopryrite Concentrate Extraction: Leaching, Optimization and Kinetics Mechanism. *J. Environ. Chem. Eng.* 2025, 13, 117779.

- [7] **Ali, Z.; Wilkes, N.; Raza, N.; Omar, M.**, Modified Hydrometallurgical Approach for the Beneficiation of Copper from Its Low-Grade Ore. *ACS Omega* 2025, 10, 14826–14834.
- [8] **Flores, D.J.; Graber, T.A.; Angel-Castillo, A.H.; Hernández, P.C.; Taboada, M.E.**, Use of Hydrogen Peroxide as Oxidizing Agent in Chalcopyrite Leaching: A Review. *Metals* 2025, 15, 531.
- [9] **Aghazadeh-Ghomi, M.; Adli-Mehr, A.; Mozammel, M.**, A Kinetic Study on the Atmospheric Leaching of Chalcopyrite Concentrate in Sulfuric Acid-Hydrogen Peroxide-Isopropanol Medium. *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.* 2025, 56, 300–306.
- [10] **Panda, S.; Akcil, A.; Pradhan, N.; Deveci, H.**, Current Scenario of Chalcopyrite Bioleaching: A Review on the Recent Advances to Its Heap-Leach Technology. *Bioresour. Technol.* 2015, 196, 694–706.
- [11] **Behnajady, B.; Najafi, M.; Karimi, S.**, A New Approach to Direct Chemical Leaching of Sungun Chalcopyrite Concentrate via Green Deep Eutectic Solvent Choline Chloride-*p*-Toluenesulfonic Acid and MD Simulation. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2025, 172, 106118.
- [12] **Adebayo, A.O.; Ipinmoroti, K.O.; Ajayi, O.O.**, Dissolution Kinetics of Chalcopyrite with Hydrogen Peroxide in Sulphuric Acid Medium. *Chem. Biochem. Eng. Q.* 2003, 17, 213–218.
- [13] **Agacayak, T.; Aras, A.; Aydogan, S.; Erdemoglu, M.**, Leaching of Chalcopyrite Concentrate in Hydrogen Peroxide Solution. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2014, 50, 657–666.
- [14] **Laubertová, M.; Velgosová, O.; Pirošková, J.; Briančin, J.**, Effects of Microwave Energy and MnO₂ from Deep-Sea Polymetallic Nodules as an Oxidizing Agent on the Leaching of Chalcopyrite Concentrate. *Minerals* 2025, 15, 914.
- [15] **Du, Y.; Wang, L.; Zhang, W.; Chen, Y.; Ma, B.; Wang, C.**, Disparity in Leaching Behavior of Representative Copper Sulfide Minerals with Dilute H₂SO₄ and the Underlying Microscopic Mechanism. *Appl. Surf. Sci.* 2025, 706, 163413.
- [16] **Bugarčić, M.; Jovanović, A.; Anđić, D.; Jelić, I.; Miletić, M.; Marković, B., & Sokić, M.** (2025), Kinetics of Sphalerite Leaching by MnO₂-KI Oxidation System in Sulfuric Acid. *Metals*, 15(1), 50. <https://doi.org/10.3390/met15010050>

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.063>

Ključne reči:
ekstrakcija; flavonoidi; kafa;
maceracija; polifenoli

ODREĐIVANJE UKUPNOG SADRŽAJA POLIFENOLA U EKSTRAKTIMA RAZLIČITIH SORTI KAFE I UTICAJ PARAMETARA EKSTRAKCIJE

Key words:
coffee; extraction; flavonoids;
maceration; polyphenols

DETERMINATION OF TOTAL POLYPHENOL CONTENT IN EXTRACTS OF DIFFERENT COFFEE VARIETIES AND THE INFLUENCE OF EXTRACTION PARAMETERS

Zdravka JOVANOVIĆ*

* zdravka.j97@gmail.com

Nebojša VASILJKOVIĆ

Vladan MICIĆ

Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet, Zvornik, Bosna i Hercegovina

Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet, Zvornik, Bosna i Hercegovina
ORCID: 0000-0002-3789-9975

Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet, Zvornik, Bosna i Hercegovina
ORCID: 0000-0002-4383-4879

U ovom radu ispitivan je uticaj procesnih parametara — temperature, vremena i odnosa biljna droga:rastvarač - na efikasnost ekstrakcije ukupnih fenolnih jedinjenja i flavonoida iz tri različita uzorka mlevene pržene kafe. Kafa, kao kompleksna smeša bogata fitohemikalijama, predstavlja značajan izvor prirodnih antioksidanasa, prvenstveno hlorogenske kiseline, čija izolacija direktno zavisi od primenjenih uslova ekstrakcije.

Metodološki pristup obuhvatio je detaljnu karakterizaciju polaznog materijala. Za određivanje raspodele veličine čestica mlevene, pržene kafe primenjena je metoda difrakcije laserske svetlosti, dok je za identifikaciju funkcionalnih grupa i hemijskih karakteristika uzorka korišćena infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR).

Granulometrijskom analizom utvrđene su značajne razlike u veličini čestica, gde je Uzorak 1 bio najfinije mleven, dok su uzorci 2 i 3 pokazali znatno krupniju strukturu. FTIR spektroskopija potvrdila je prisustvo ključnih funkcionalnih grupa polifenola, pri čemu je intenzitet pikova na ≈ 3300 i 1030 cm^{-1} ukazao na to da Uzorak 3 poseduje najviši inicijalni bioaktivni potencijal.

Eksperimentalni rezultati dobijeni metodom maceracije pokazali su da su temperatura od 85°C i vreme ekstrakcije od 30 minuta optimalni za postizanje maksimalnog prinosa kod svih uzoraka. Povećanje odnosa faza sa 1:20 na 1:30 (m/v) dodatno je unapredilo efikasnost procesa obezbeđivanjem povoljnijeg koncentracionog gradijenta.

Ključni nalaz istraživanja je da Uzorak 3, uprkos najnepovoljnijem granulometrijskom sastavu, ostvaruje apsolutne maksimalne vrednosti sadržaja fenola i flavonoida. Ovo potvrđuje da hemijski sastav sirovine i optimizacija procesnih parametara (visoka temperatura i veća zapremina rastvarača) imaju presudan uticaj na finalni kvalitet ekstrakta, nadmašujući fizička ograničenja veličine čestica. Dobijeni rezultati pružaju naučnu osnovu za optimizaciju ekstrakcije antioksidanasa iz kafe na industrijskom nivou za potrebe prehrambene i farmaceutske industrije.

This study investigated the influence of process parameters—temperature, time, and the solid-to-liquid ratio - on the extraction efficiency of total phenolic compounds and flavonoids from three

distinct samples of ground roasted coffee. Coffee, a complex mixture rich in phytochemicals, represents a significant source of natural antioxidants, primarily chlorogenic acid, the isolation of which directly depends on the applied extraction conditions.

The methodological approach included a detailed characterization of the raw material. Laser diffraction was applied to determine the particle size distribution of the ground roasted coffee, while Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was used to identify functional groups and chemical characteristics.

The particle size analysis revealed significant differences in grain size, where Sample 1 was the most finely ground, while Samples 2 and 3 showed a considerably coarser structure. FTIR spectroscopy confirmed the presence of key polyphenol functional groups, with peak intensities at ≈ 3300 and 1030 cm^{-1} indicating that Sample 3 possesses the highest initial bioactive potential.

Experimental results obtained through the maceration method showed that a temperature of 85°C and an extraction time of 30 minutes were optimal for achieving maximum yield across all samples. Increasing the phase ratio from 1:20 to 1:30 (w/v) further improved process efficiency by providing a more favorable concentration gradient.

The key finding of this research is that Sample 3, despite having the least favorable particle size distribution, achieved the absolute maximum values for phenol and flavonoid content. This confirms that the chemical composition of the raw material and the optimization of process parameters (high temperature and larger solvent volume) have a decisive influence on the final extract quality, surpassing the physical limitations of particle size. The obtained results provide a scientific basis for optimizing the extraction of antioxidants from coffee at an industrial level for the needs of the food and pharmaceutical industries.

1. Uvod

Kafa zauzima vitalno mesto u savremenom društvu, služeći ne samo kao najrasprostranjeniji napitak, već i kao kamen temeljac socijalnog i kulturnog života širom sveta. Njen značaj prevazilazi okvire svakodnevne rutine i duboko je integrisan u globalnu ekonomiju, s obzirom na to da se kafa ubraja u najtrgovanije robe na svetskim berzama. O globalnoj popularnosti ovog napitka svedoče podaci da je samo u periodu 2022/2023. godine svetska potrošnja dostigla 168,2 miliona džakova od po 60 kg, uz kontinuirani trend rasta [1, 2].

Pored društveno-ekonomskog značaja, kafa je predmet intenzivnih naučnih istraživanja zbog svog kompleksnog hemijskog sastava i brojnih pozitivnih efekata na ljudsko zdravlje. Bogata je bioaktivnim jedinjenjima, prvenstveno kofeinom i polifenolima, koji joj daju izražena antioksidativna i antiinflamatorna svojstva. Ova jedinjenja imaju ključnu ulogu u suzbijanju oksidativnog stresa (OS) i smanjenju rizika od razvoja hroničnih oboljenja, uključujući kardiovaskularne bolesti i različite oblike karcinoma.

Dosadašnje kliničke i epidemiološke studije ukazuju na to da redovna konzumacija kafe može značajno unaprediti kognitivne funkcije, povećati budnost i koncentraciju [3]. Takođe, zabeležena je korelacija između konzumacije kafe i smanjenog rizika od neurodegenerativnih bolesti, poput Alchajmerove i Parkinsonove bolesti [4, 5], kao i poboljšanje metaboličkog zdravlja kroz povećanje insulinske osetljivosti [6]. Posebno interesovanje naučne zajednice usmereno je ka potencijalnim antiaging efektima kafe, koji doprinose dugovečnosti i unapređenju opšteg zdravstvenog statusa [7].

S obzirom na navedenu kompleksnost i značaj ovog napitka, ovaj rad ima za cilj da ispita uticaja procesnih parametara ekstrakcije mlevene kafe – vremena ekstrakcije, odnosa biljne droge i rastvarača i temperature – na sadržaj ukupnih fenolnih jedinjenja i flavonoida, koji predstavljaju glavne nosioce antioksidativnih svojstava kafe.

2. Teorijski deo

Mnogi konzumenti preferiraju kafu kao napitak koji pruža užitak i energiju. Međutim, kafa privlači pažnju naučne javnosti ne samo zbog svog ukusa, arome i sadržaja kofeina, već i zbog svog kompleksnog hemijskog sastava [8]. Zrno kafe sadrži različite nutrijente kao što su lipidi, azotna jedinjenja, vitamini, minerali, alkaloidi i fenolna jedinjenja [9]. Istraživanja ukazuju na to da redovna konzumacija kafe može smanjiti rizik od Alchajmerove bolesti [10, 11], Parkinsonove bolesti [12], srčanih oboljenja [13], dijabetesa tipa 2 [14], ciroze jetre [15] i određenih tipova karcinoma [16]. Shodno tome, konzumacija kafe može pružiti značajne zdravstvene benefite [17].

2.1. Antioksidativni potencijal

Antioksidansi predstavljaju najvažnije supstance korisne po zdravlje koje se nalaze u kafi, čineći ovaj napitak njihovim bogatim izvorom [18]. Među glavnim sekundarnim metabolitima prisutnim u zrnu kafe izdvajaju se hlorogenska kiselina, kofein, teofilin, teobromin, kafestol, kaveol, tokoferoli i trigonelin, čiji su biološki efekti od velikog značaja [19]. Fenolna jedinjenja poznata kao hlorogenske kiseline, za koja je potvrđeno da su efikasni antioksidansi u *in vitro* i *ex vivo* uslovima, spadaju u najzastupljenija jedinjenja u kafi i mogu činiti do 12% suve mase zrna zelene kafe [20].

U proseku, dnevni unos hlorogenskih kiselina kod konzumenata kafe može biti pet do deset puta veći u poređenju sa osobama koje ne konzumiraju ovaj napitak [21, 22]. Na osnovu funkcionalnosti ovih značajnih bioaktivnih jedinjenja, istraživači su istakli potencijal redovne konzumacije kafe u smanjenju rizika od autoimunih bolesti i metaboličkih poremećaja [23]. Studije su demonstrirale snažan antioksidativni efekat visokog sadržaja polifenola [24], pri čemu koncentracija u zelenom zrnu varira u zavisnosti od vrste i porekla, dok nivo u samom napitku zavisi od postupka pripreme [25, 26].

Tokom prženja, fenolna jedinjenja se delimično degradiraju ili formiraju kompleksne polimerne strukture. Važno je napomenuti da postoji nelinearan odnos između preostalog sadržaja hlorogenske kiseline nakon prženja i ukupnog antioksidativnog efekta zrna, što ukazuje na to da produkti Maillard-ovih reakcija nastali tokom prženja takođe mogu doprineti ukupnom antioksidativnom kapacitetu [27, 28].

3. Eksperimentalni deo

3.1. Uzorci i priprema materijala

Eksperimentalni deo istraživanja sproveden je u laboratorijama Tehnološkog fakulteta u Zvorniku, Univerziteta u Istočnom Sarajevu. Predmet ispitivanja obuhvatio je tri uzorka komercijalnih mešavina pržene i mlevene kafe (*Coffea arabica* i *Coffea robusta*), nabavljenih na tržištu Republike Srpske (Zvornik).

Pre procesa ekstrakcije, izvršena je detaljna karakterizacija polaznog materijala radi utvrđivanja fizičko-hemijskih specifičnosti uzoraka. Raspodela veličine čestica određena je metodom difrakcije laserske svetlosti, dok je identifikacija funkcionalnih grupa i hemijskih karakteristika sprovedena primenom infracrvene spektroskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR) [29, 30].

3.2. Postupak ekstrakcije

Ekstrakcija bioaktivnih jedinjenja realizovana je tehnikom maceracije uz zagrevanje, koristeći destilovanu vodu kao rastvarač. U cilju optimizacije procesa, ispitan je uticaj tri ključna procesna parametra na prinos ekstrakcije:

- Vreme ekstrakcije: 5, 10, 15, 20 i 30 minuta;
- Temperatura: 65, 75 i 85 °C;
- Odnos čvrsto:tečno (S/L odnos): 1:20 i 1:30 (m/v).

3.3. Određivanje ukupnog sadržaja fenola (TPC)

Ukupni sadržaj fenolnih jedinjenja određen je primenom spektrofotometrijske metode sa Folin–Ciocalteu reagensom [31]. Metoda se zasniva na redoks reakciji između hidroksilnih grupa fenola i reagensa (kompleksni polimerni jon molibdena i volframa) u baznoj sredini, obezbeđenoj dodatkom natrijum-karbonata.

Tokom reakcije dolazi do deprotonacije i oksidacije fenolnih grupa, uz simultanu redukciju reagensa, što uzrokuje promenu boje rastvora iz žute u plavu. Intenzitet nastalog obojenja direktno je proporcionalan koncentraciji fenola u uzorku. Merenje apsorbancije vršeno je na talasnoj dužini od 765 nm. Rezultati su izraženi kao ekvivalenti galne kiseline (mg GAE/g).

3.4. Određivanje ukupnog sadržaja flavonoida (TFC)

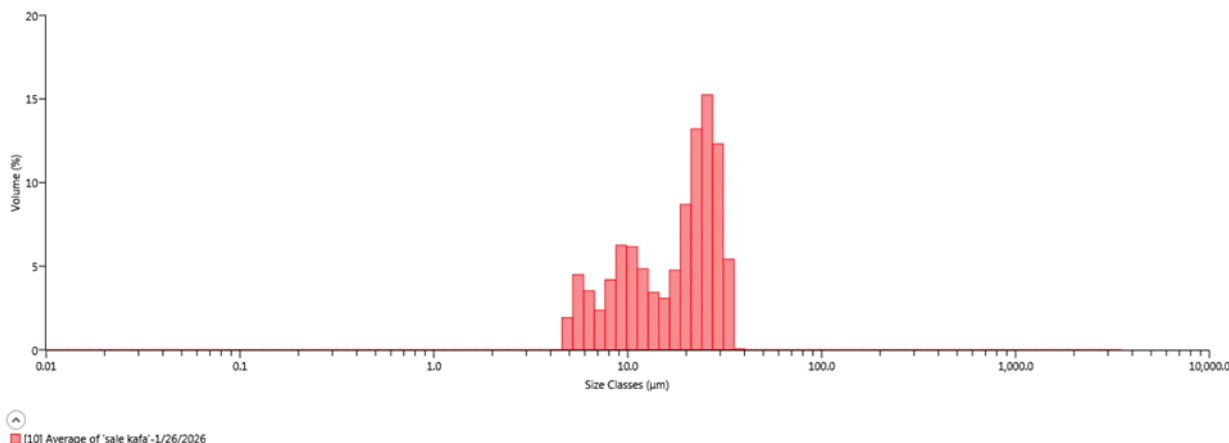
Sadržaj flavonoida određen je kolorimetrijskom metodom sa aluminijum-hloridom [32]. Princip metode zasniva se na formiranju stabilnih kompleksa aluminijuma sa C-4 keto grupom i C-3 ili C-5 hidroksilnim grupama flavona i flavonola u kiselj sredini. Takođe, aluminijum gradi nestabilne komplekse sa orto-dihidroksilnim grupama u A ili B prstenu flavonoidne strukture.

Intenzitet obojenja meren je spektrofotometrijski na talasnoj dužini od **450 nm**. Kao standard za kvantifikaciju korišćen je katehin hidrat, a rezultati su izraženi kao ekvivalenti katehina (mg CE/g).

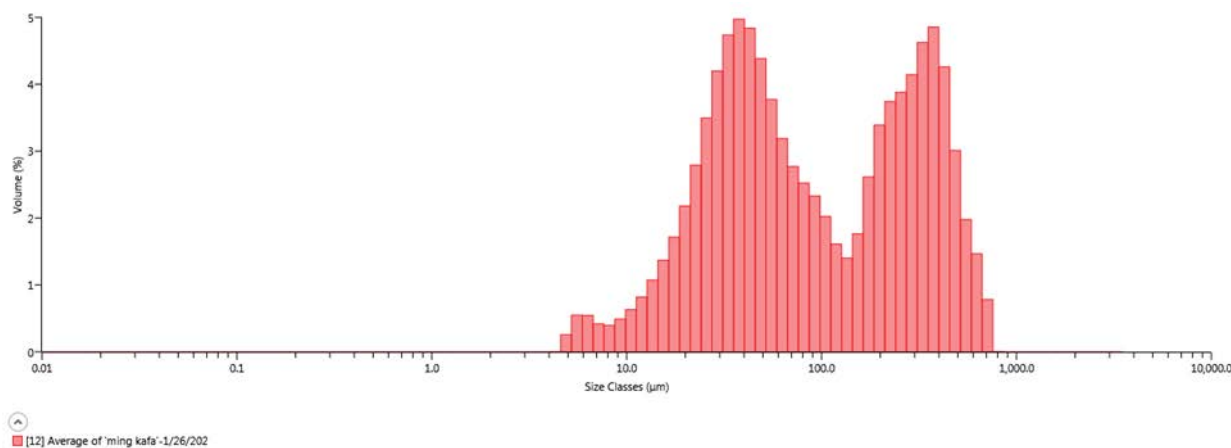
4. Rezultati i diskusija

4.1. Granulometrijska analiza uzoraka kafe

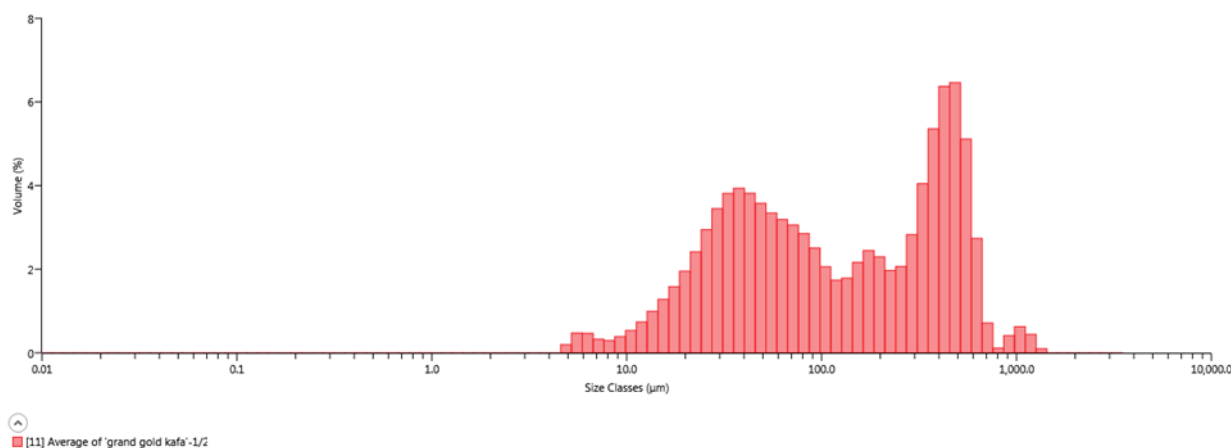
Fizička struktura mlevene kafe, definisana raspodelom veličine čestica, predstavlja jedan od ključnih faktora koji utiču na efikasnost ekstrakcije bioaktivnih jedinjenja. Na Slikama 1, 2 i 3 prikazani su histogrami raspodele veličine čestica za tri ispitivana uzorka, dok su u Tabeli 1 sumirane vrednosti karakterističnih percentila $D_x(10)$ (μm), $D_x(50)$ (μm) i $D_x(90)$ (μm).



Slika 1. Histogram raspodele veličine čestica za Uzorak 1



Slika 2. Histogram raspodele veličine čestica za Uzorak 2



Slika 3. Histogram raspodele veličine čestica za Uzorak 3

Tabela 1. Karakteristični percentili raspodele veličine čestica ispitivanih uzoraka

Uzorak	$D_x(10)$ (μm)	$D_x(50)$ (μm)	$D_x(90)$ (μm)
Uzorak 1	6,74	20,1	29,7
Uzorak 2	20,7	77,6	418
Uzorak 3	22,1	110	519

Analizom dobijenih podataka uočavaju se fundamentalne razlike u stepenu usitnjenosti uzoraka. Uzorak 1 karakteriše izrazito fina i homogena struktura, gde se 90% čestica nalazi u opsegu ispod 30 μm . Ovakva raspodela rezultuje velikom specifičnom površinom kontakta sa rastvaračem, što teorijski favorizuje brzu difuziju i visoku efikasnost ekstrakcije u početnim fazama procesa.

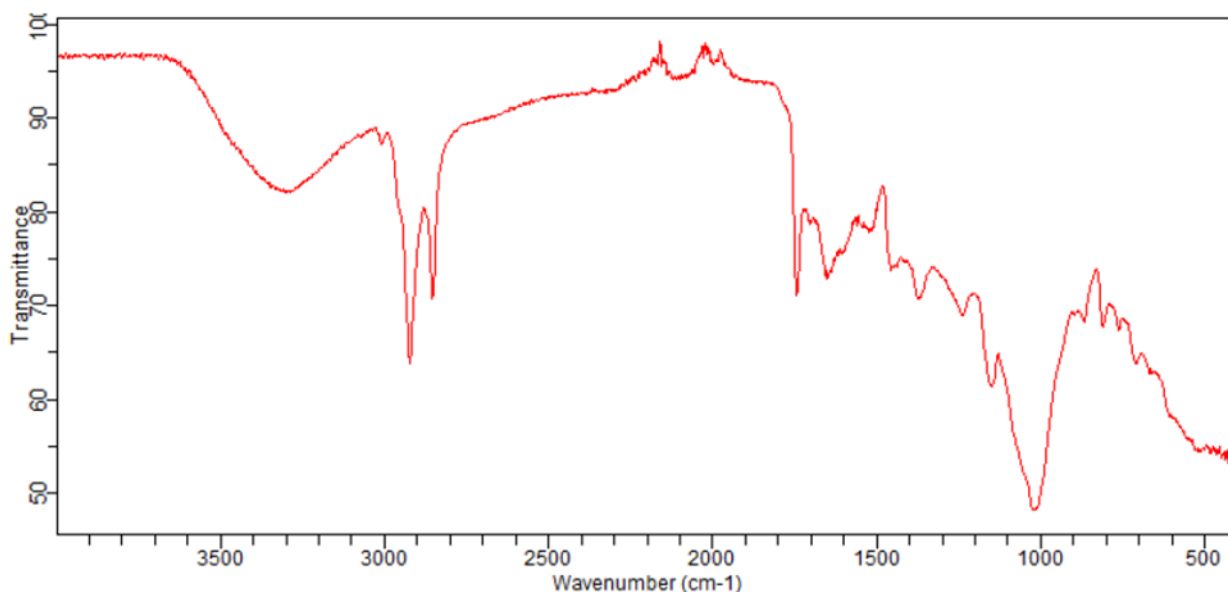
Nasuprot tome, Uzorci 2 i 3 pokazuju bimodalnu raspodelu (uočljivu na histogramima) sa znatno širim opsegom veličina čestica. Kod Uzorka 2, medijan raspodele ($D_x(50)$) iznosi 77.6 μm , dok kod Uzorka 3 dostiže maksimalnu vrednost od 110 μm . Prisustvo frakcija krupnijih od 500 μm kod Uzorka 3 direktno utiče na kinetiku ekstrakcije, s obzirom na to da krupnije čestice pružaju veći otpor prenosu mase iz unutrašnjosti čvrste matrice ka rastvaraču. Ove razlike u granulometrijskom sastavu su od presudnog značaja za interpretaciju rezultata ekstrakcije. Dok sitnije čestice (Uzorak 1) omogućavaju intenzivan kontakt, krupnije čestice (Uzorci 2 i 3) mogu usloviti sporije oslobađanje

fenola i flavonoida, zahtevajući optimizaciju procesnih parametara poput temperature i vremena kako bi se nadomestila manja specifična površina.

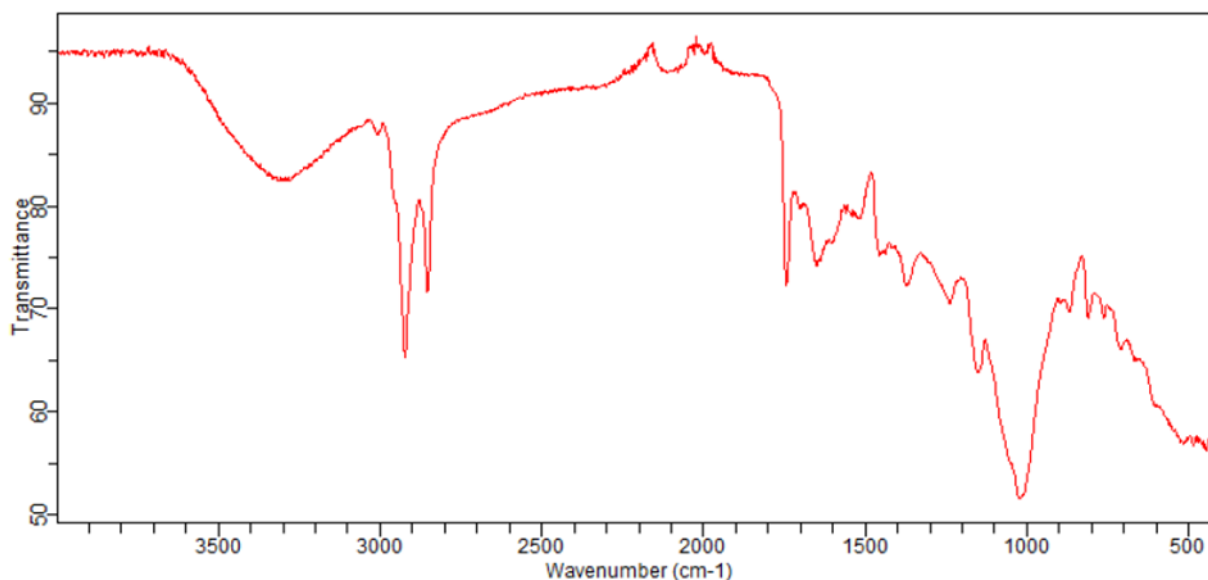
4.2. FTIR karakterizacija uzoraka kafe

U cilju identifikacije funkcionalnih grupa i potvrde prisustva bioaktivnih jedinjenja, snimljeni su infracrveni spektri tri ispitivana uzorka kafe u opsegu talasnih brojeva od 4000 do 400 cm^{-1} . Na Slikama 4, 5 i 6 prikazani su FTIR spektri za ispitivane uzorke kafa.

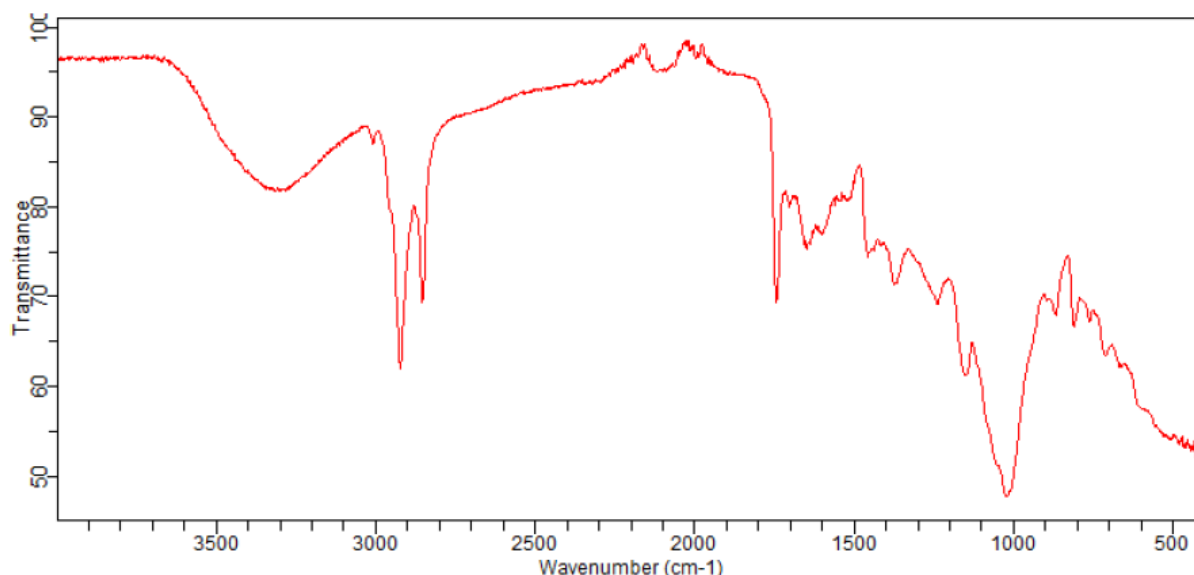
Svi ispitivani spektri pokazuju karakteristične apsorpcione trake tipične za prženu kafu, sa minimalnim razlikama u položaju pikova, što ukazuje na sličan hemijski sastav ispitivanih mešavina. U Tabeli 2 sumirani su glavni pikovi i njihova korelacija sa funkcionalnim grupama bioaktivnih komponenti.



Slika 4. FTIR spektar za Uzorak 1



Slika 5. FTIR spektar za Uzorak 2



Slika 6. FTIR spektar za Uzorak 3

Tabela 2: Karakteristični FTIR pikovi ispitivanih uzoraka kafe

Talasni broj (cm ⁻¹)	Vibracija i funkcionalna grupa	Komponenta kafe
≈ 3300	O–H istezanje (vodonične veze)	Polifenoli, voda, polisaharidi
2924 i 2853	C–H asimetrično i simetrično istezanje	Lipidi (trigliceridi)
1745	C=O istezanje (estarske grupe)	Lipidi (trigliceridi)
1655	C=O istezanje (amid I) i C=C	Kofein, proteini, hlorogenska kiselina
1030	C–O istezanje	Polisaharidi (galaktomanani, celuloza)

Široka traka u oblasti od 3500 do 3100 cm⁻¹ potiče od istezanja O–H grupa, što je direktna potvrda prisustva fenolnih jedinjenja i flavonoida čiji je sadržaj kvantifikovan u daljem toku rada. Oštri pikovi na 2924 i 2853 cm⁻¹ odgovaraju masnim kiselinama i lipidima koji su prirodno prisutni u zrnu kafe. Pik na 1655 cm⁻¹ od posebnog značaja jer predstavlja preklapanje vibracija kofeina i karbonilnih grupa hlorogenskih kiselina. Intenzitet pika u oblasti oko 1030 cm⁻¹ ukazuje na prisustvo strukturnih ugljenih hidrata koji čine matricu zrna.

Poređenjem FTIR spektara tri uzorka (slike 4, 5 i 6), uočava se da su položaji karakterističnih pikova gotovo identični, što ukazuje na kvalitativno sličan hemijski sastav. Međutim, varijacije u relativnim intenzitetima određenih pikova ukazuju na razlike u kvantitativnom sastavu i tehnološkoj obradi:

1. Lipidi: Uzorak 1 pokazuje nešto niži intenzitet pikova na 2924 i 1745 cm⁻¹ u odnosu na Uzorke 2 i 3, što može ukazivati na manji udeo lipidne frakcije ili specifičnu mešavinu sorti (veći udeo *Robuste*).
2. Ugljeni hidrati: Pik na ≈1030 cm⁻¹ je najdublji kod Uzorka 3, što sugeriše viši relativni sadržaj strukturnih polisaharida u ovoj kafi.
3. Hlorogenske kiseline: Blage razlike u širini trake na 3300 cm⁻¹ ukazuju na varijacije u sadržaju polifenola, što je direktna posledica različitih režima prženja kod analiziranih proizvođača.

Sprovedena FTIR analiza potvrdila je da svi ispitani uzorci pržene mlevene kafe poseduju karakterističan hemijski profil sa jasno definisanim funkcionalnim grupama lipida, proteina, ugljenih hidrata i kofeina. Iako su spektralni otisci kvalitativno ujednačeni, uočene varijacije u intenzitetu pikova ukazuju na specifičnosti u sirovinskom sastavu i intenzitetu prženja kod različitih proizvođača.

4.3. Analiza sadržaja ukupnih fenola (TPC) i flavonoida (TFC)

Rezultati određivanja sadržaja ukupnih fenola i flavonoida u ekstraktima tri ispitivana uzorka kafe, dobijeni pri različitim uslovima ekstrakcije, prikazani su u Tabeli 3. Analizom podataka uočava se da su vrednosti TPC varirale u širokom rasponu od 41,800 mg GAE/g (Uzorak 1, 65°C, 5 min, S/L odnos 1:20) do maksimalnih 67,120 mg GAE/g (Uzorak 3, 85°C, 30 min, S/L odnos 1:30).

Tabela 3. Rezultati određivanja sadržaja ukupnih fenola i flavonoida u ekstraktima tri ispitivana uzorka kafe

Odnos biljna droga:rastvarač, [m/v]	Temperatura, [°C]	Vreme, [min]	Uzorak 1		Uzorak 2		Uzorak 3	
			Sadržaj ukupnih fenola, [mg GAE/g]	Sadržaj ukupnih flavonoida, [mg KaH/g]	Sadržaj ukupnih fenola, [mg GAE/g]	Sadržaj ukupnih flavonoida, [mg KaH/g]	Sadržaj ukupnih fenola, [mg GAE/g]	Sadržaj ukupnih flavonoida, [mg KaH/g]
1:20	65	5	41,800	26,400	46,809	32,935	47,626	33,436
1:20	65	10	42,752	26,992	45,831	33,962	47,434	35,010
1:20	65	15	43,374	28,466	46,092	34,898	50,030	35,828
1:20	65	20	44,600	27,174	45,670	35,699	50,100	35,013
1:20	65	30	45,768	27,884	45,800	34,384	50,646	37,275
1:20	75	5	43,898	27,484	44,200	32,037	46,334	35,549
1:20	75	10	45,320	27,502	45,452	32,732	46,922	34,832
1:20	75	15	46,136	28,854	43,616	31,934	46,132	35,937
1:20	75	20	47,420	29,286	46,367	33,261	47,700	36,586
1:20	75	30	47,242	28,258	45,485	33,402	48,827	36,400
1:20	85	5	46,862	27,200	48,360	34,110	50,210	37,140
1:20	85	10	46,552	27,438	48,570	34,660	51,420	37,870
1:20	85	15	48,614	30,826	49,900	35,110	52,870	38,680
1:20	85	20	53,048	31,430	50,650	35,740	53,900	39,430
1:20	85	30	53,000	31,238	50,700	36,410	59,750	40,210
1:30	65	5	50,084	28,189	50,247	27,412	51,761	33,769
1:30	65	10	52,693	27,697	52,867	33,125	57,046	35,590
1:30	65	15	52,015	30,738	53,238	33,419	57,400	38,345
1:30	65	20	52,249	30,303	56,863	34,025	57,535	39,829

Odnos biljna droga: rastvarač, [m/v]	Temperatura, [°C]	Vreme, [min]	Uzorak 1		Uzorak 2		Uzorak 3	
			Sadržaj ukupnih fenola, [mg GAE/g]	Sadržaj ukupnih flavanoida, [mg KaH/g]	Sadržaj ukupnih fenola, [mg GAE/g]	Sadržaj ukupnih flavanoida, [mg KaH/g]	Sadržaj ukupnih fenola, [mg GAE/g]	Sadržaj ukupnih flavanoida, [mg KaH/g]
1:30	65	30	51,772	31,028	55,637	34,327	58,521	39,193
1:30	75	5	48,744	27,883	55,953	34,269	56,300	39,305
1:30	75	10	48,939	29,550	56,120	33,706	56,356	40,500
1:30	75	15	49,550	28,600	55,327	34,051	58,752	41,291
1:30	75	20	51,133	30,015	57,625	35,140	59,600	39,883
1:30	75	30	51,790	31,200	57,980	36,030	60,867	46,979
1:30	85	5	53,898	29,721	59,400	34,610	64,120	48,210
1:30	85	10	53,631	32,492	61,200	35,200	64,100	49,530
1:30	85	15	55,304	33,715	63,100	35,870	66,680	50,870
1:30	85	20	56,114	33,340	63,140	36,070	67,100	51,930
1:30	85	30	56,300	33,760	63,990	36,700	67,120	52,460

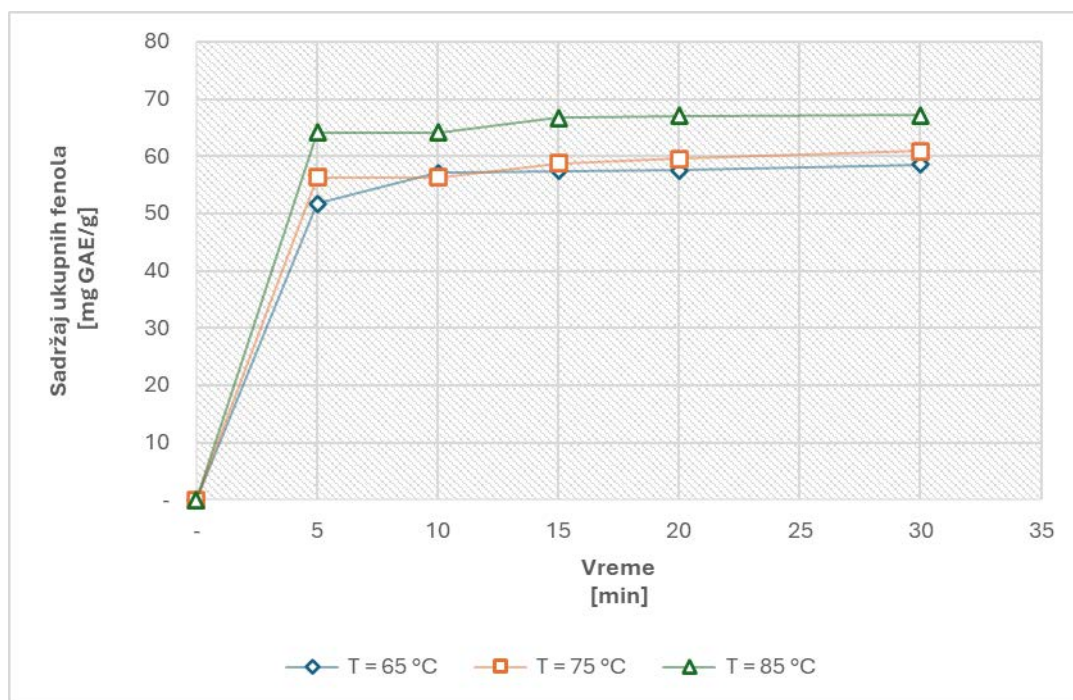
4.3.1. Uticaj temperature i vremena ekstrakcije

Povišenje temperature sa 65 na 85 °C dovelo je do značajnog porasta prinosa bioaktivnih jedinjenja kod svih uzoraka. Ovaj fenomen se može objasniti povećanom rastvorljivošću fenolnih jedinjenja i smanjenjem viskoznosti rastvarača na višim temperaturama, što olakšava njihovu difuziju iz čvrste matrice kafe u vodenu sredinu.

Kada je u pitanju uticaj vremena, uočava se da se najveći deo fenola i flavanoida ekstrahuje već u prvih 15 do 20 minuta. Na primer, kod Uzorka 3 pri S/L odnosu 1:30 i temperaturi od 85 °C, sadržaj fenola raste sa 64,120 mg GAE/g (5 min) na 67,120 mg GAE/g (30 min), što ukazuje na to da produžavanje vremena nakon postizanja dinamičke ravnoteže nema značajan ekonomski efekat na prinos.

Kako bi se jasnije prikazao ovaj trend, na Slici 7 predstavljena je promena sadržaja ukupnih fenola za Uzorak 3 pri optimalnom S/L odnosu faza 1:30.

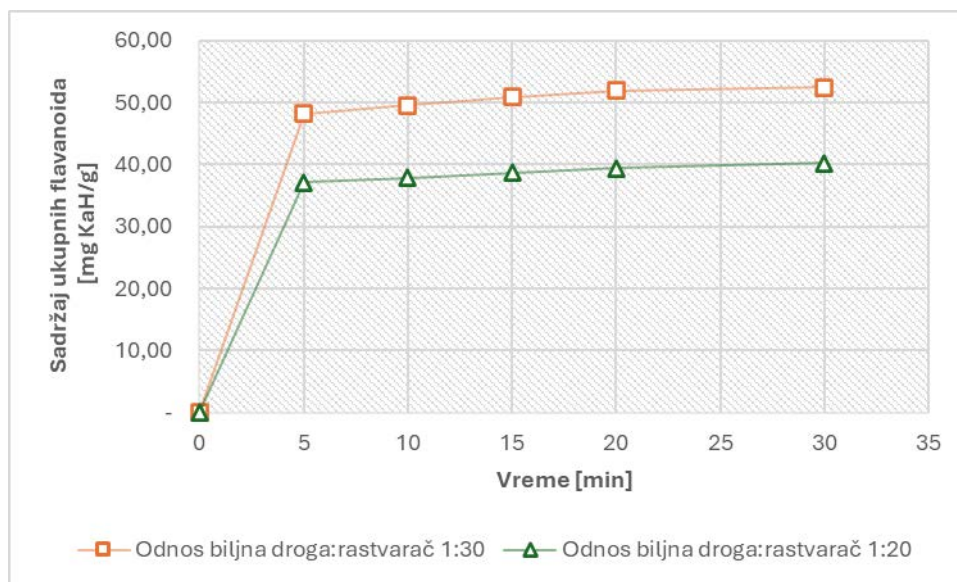
Na osnovu grafičkog prikaza (Slika 7) jasno se uočava da na 85°C sadržaj ukupnih fenola značajno odskoče od nižih temperatura, potvrđujući da je termička energija ključni faktor za razbijanje ćelijske matrice kafe i oslobađanje fenolnih jedinjenja. Takođe, sa slike se jasno može uočiti da se nakon 20 minuta ekstrakcije ulazi u zonu zasićenja, gde dalji utrošak vremena i energije ne rezultuje srazmernim povećanjem prinosa.



Slika 7. Uticaj temperature i vremena na prinos ukupnih fenola (TPC) za Uzorak 3 (odnos S/L faza 1:30)

4.3.2. Uticaj odnosa faza (S/L odnos)

Odnos biljna droga:rastvarač pokazao je presudan uticaj na efikasnost procesa. Povećanje zapremine rastvarača sa 1:20 na 1:30 rezultovalo je višim vrednostima TPC i TFC kod svih merenja. Veća količina rastvarača obezbeđuje strmiji gradijent koncentracije, što ubrzava prenos mase. Maksimalne vrednosti flavonoida zabeležene su kod Uzorka 3 pri odnosu 1:30 i temperaturi od 85°C, gde je sadržaj dostigao 52,460 mg KaH/g.



Slika 8. Uticaj odnos S/L faza i vremena na prinos ukupnih flavonoida (TFC) za Uzorak 3 ($T = 85^{\circ}\text{C}$)

1.1 4.4. Specifičnosti uzoraka u korelaciji sa granulometrijom

Granulometrijski sastav polaznog materijala pokazao se kao primarni faktor koji određuje brzinu kojom fenolna jedinjenja prelaze u rastvor. Uzorak 1, koji karakteriše vrlo fina mlevenost sa

medijanom $D_x(50) \approx 20 \mu\text{m}$ i izrazito uskom raspodelom $D_x(90) \approx 29,7 \mu\text{m}$, pruža najveću specifičnu površinu za kontakt sa rastvaračem. To objašnjava izrazito strm uspon krive ekstrakcije u prvih 5 minuta kod ovog uzorka, gde se dostiže skoro 90% maksimalnog prinosa.

Nasuprot tome, Uzorak 2 i Uzorak 3 imaju znatno krupnije čestice ($D_x(50) \approx 78$ i $110 \mu\text{m}$ respektivno), što teoretski predstavlja veći difuzioni otpor. Kod krupnijih čestica put koji molekuli polifenola moraju preći iz unutrašnjosti matrice do površine je duži, što se manifestuje kroz sporije dostizanje ravnotežnog stanja. Međutim, rezultati pokazuju da krupnija mlevenost ne limitira finalni prinos, već samo usporava kinetiku, što je posebno korigovano primenom viših temperatura.

4.5. FTIR spektroskopija kao indikator kvantitativnog bogatstva

Iako su položaji karakterističnih pikova na FTIR spektrima gotovo identični, varijacije u njihovim intenzitetima pružaju ključ za razumevanje zašto je Uzorak 3 postigao najbolje rezultate uprkos nepovoljnijem (krupnijem) granulometrijskom sastavu.

1. Hlorogenske kiseline i polifenoli: Šira i intenzivnija traka na $\approx 3300 \text{ cm}^{-1}$ kod Uzorka 3 direktno korelira sa najvišim izmerenim sadržajem ukupnih fenola $67,120 \text{ mg GAE/g}$ i flavonoida $52,46 \text{ mg KaH/g}$. Ovo ukazuje na to da Uzorak 3 inicijalno poseduje najveći bioaktivni potencijal, verovatno usled specifičnog geografskog porekla ili blažeg režima prženja koji je sačuvao polifenolnu strukturu.
2. Strukturni polisaharidi: Pik na $\approx 1300 \text{ cm}^{-1}$ je najizraženiji kod Uzorka 3, što sugeriše viši sadržaj strukturnih ugljenih hidrata. Iako krupne, ove čestice su pod uticajem temperature od 85°C verovatno postale dovoljno porozne da omoguće visoku iscrpljenost droge.
3. Lipidna frakcija: Niži intenzitet pikova na ≈ 2924 i 1745 cm^{-1} kod Uzorka 1 u poređenju sa Uzorkom 3 može ukazivati na razliku u sorti kafe (veći udeo Robuste kod Uzorka 1), što dodatno utiče na različito ponašanje polifenola tokom ekstrakcije.

5. Zaključak

Na osnovu sprovedenog istraživanja karakterizacije uzoraka kafe i optimizacije procesa ekstrakcije bioaktivnih jedinjenja, mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Fizičko-hemijska karakterizacija: FTIR spektroskopija potvrdila je prisustvo ključnih funkcionalnih grupa karakterističnih za polifenole, kofein i lipide kod sva tri ispitivana uzorka, ukazujući na hemijsku srodnost sirovina uprkos različitom tržišnom poreklu. Granulometrijska analiza otkrila je značajne razlike u stepenu usitnjenosti, pri čemu je Uzorak 1 imao najfiniju strukturu, dok su Uzorci 2 i 3 pokazali bimodalnu raspodelu sa znatno krupnijim česticama.
2. Uticaj procesnih parametara: Temperatura i odnos faza (čvrsto:tečno) identifikovani su kao dominantni faktori koji utiču na prinos ekstrakcije. Povišenje temperature sa 65 na 85°C i povećanje zapremine rastvarača na odnos $1:30$ konzistentno su doveli do povećanja sadržaja ukupnih fenola (TPC) i flavonoida (TFC).
3. Kinetika ekstrakcije: Utvrđeno je da se proces ekstrakcije odvija ubrzano u prvih $15\text{--}20$ minuta, nakon čega sistem teži stanju dinamičke ravnoteže. Produžavanje maceracije na 30 minuta rezultuje samo minimalnim povećanjem prinosa, što ukazuje na to da su kraći vremenski intervali ekonomski opravdani za postizanje visokih koncentracija bioaktivnih materija.
4. Optimalni uslovi: Maksimalne vrednosti bioaktivnog potencijala zabeležene su kod Uzorka 3 pri temperaturi od 85°C , vremenu ekstrakcije od 30 min i odnosu faza $1:30$. U ovim

uslovima postignut je sadržaj fenola od 67,120 mg GAE/g i maksimalni sadržaj flavonoida od 52,460 mg KaH/g.

Istraživanje je pokazalo da hemijski sastav i udeo određenih sorti u mešavini (Arabika/Robusta) imaju presudniji uticaj na antioksidativni kapacitet nego sama fina granulometrija. Dobijeni rezultati pružaju jasne smernice za optimizaciju pripreme napitaka od kafe u cilju maksimalnog iskorišćenja njenih zdravstvenih benefita, prvenstveno kroz kontrolu temperature i odnosa biljna droga:rastvarač.

6. Literatura

- [1] **International Coffee Organization**, *Coffee Report and Outlook*, International Coffee Organization, London, United Kingdom, 2023.
- [2] **Esler, M.**, *Coffee Drinking Then and Now: Research Continues to Better Understand This Ubiquitous Beverage*, *Clinical Autonomic Research*, 33 (2023), pp. 613–615.
- [3] **McLellan, T. M., Caldwell, J. A., Lieberman, H. R.**, *A Review of Caffeine's Effects on Cognitive, Physical and Occupational Performance*, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 71 (2016), pp. 294–312.
- [4] **Safe, S., Kothari, J., Hailemariam, A., Upadhyay, S., Davidson, L. A., Chapkin, R. S.**, *Health Benefits of Coffee Consumption for Cancer and Other Diseases and Mechanisms of Action*, *International Journal of Molecular Sciences*, 24 (2023), pp. 2706.
- [5] **Ungvari, Z., Kunutsor, S. K.**, *Coffee Consumption and Cardiometabolic Health: A Comprehensive Review of the Evidence*, *GeroScience*, 46 (2024), pp. 6473–6510.
- [6] **Mohamed, A. I., Erukainure, O. L., Salau, V. F., Islam, M. S.**, *Impact of Coffee and Its Bioactive Compounds on the Risks of Type 2 Diabetes and Its Complications: A Comprehensive Review*, *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 18 (2024), pp. 103075.
- [7] **Sutphin, G. L., Bishop, E., Yanos, M. E., Moller, R. M., Kaeberlein, M.**, *Caffeine Extends Life Span, Improves Healthspan, and Delays Age-Associated Pathology in *Caenorhabditis Elegans**, *Longevity & Healthspan*, 1 (2012), pp. 9.
- [8] **Machado, F., Gómez-Domínguez, I., Hurtado-Ribeira, R., Martin, D., Coimbra, M. A., del Castillo, M. D., Coreta-Gomes, F.**, *In vitro Human Colonic Fermentation of Coffee Arabinoxylan and Melanoidin-Rich Fractions*, *International Journal of Biological Macromolecules*, 275 (2024), pp. 133740.
- [9] **Ciudad-Mulero, M., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Murai, T., Matsuda, S.**, *The Chemopreventive Effects of Chlorogenic Acids, Phenolic Compounds in Coffee, Against Inflammation, Cancer, and Neurological Diseases*, *Molecules*, 28 (2023), pp. 2381.
- [10] **Román, G. C., Jackson, R. E., Gadhia, R., Román, A. N., Reis, J.**, *Mediterranean Diet: The Role of Long-Chain ω -3 Fatty Acids and Polyphenols in Prevention of Neurological Diseases*, *Revue Neurologique*, 175 (2019), pp. 724–741.
- [11] **Zidan, N. S., Omran, A. M. E., Rezk, S. M., Atteia, H. H., Sakran, M. I.**, *Anti-Alzheimer's Disease Potential of Arabian Coffee versus Date Palm Seed Extract in Male Rats*, *Journal of Food Biochemistry*, 46 (2022), pp. e14017.
- [12] **Wang, C., Zhou, C., Guo, T., Jiaerken, Y., Yang, S., Huang, P., et al.**, *Association of Coffee Consumption and Striatal Volume in Patients with Parkinson's Disease*, *CNS Neuroscience & Therapeutics*, 29 (2023), pp. 2800–2810.
- [13] **Surma, S., Sahebkar, A., Banach, M.**, *Coffee or Tea: Anti-Inflammatory Properties in Cardiovascular Disease Prevention*, *Pharmacological Research*, 187 (2023), pp. 106596.

- [14] **Gonzalez-Burgos, E., Es-Safi, N. E., Chapple, B., Woodfin, S., Moore, W.,** *Coffee-Derived Polyphenols and Their Role in Type 2 Diabetes*, *Molecules*, 29 (2024), pp. 751.
- [15] **Chung, H. K., Nam, J. S., Lee, M. Y., Kim, Y. B., Won, Y. S., Song, W. J., et al.,** *Coffee Consumption and Incidence of Fatty Liver Disease*, *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 30 (2020), pp. 1653–1661.
- [16] **Nigra, A. D., De Almeida Bauer Guimarães, D., Prucca, C. G., Freitas-Silva, O., Teodoro, A. J., Gil, G. A.,** *Antitumor Effects of Robusta Coffee Extracts*, *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021 (2021).
- [17] **Al-Brakati, A., Albarakati, A. J. A., Daabo, H. M. A., Baty, R. S., Salem, F. E. H., Habotta, O. A., et al.,** *Neuromodulatory Effects of Green Coffee Bean Extract*, *Metabolic Brain Disease*, 35 (2020), pp. 1175–1187.
- [18] **Cämmerer, B., Kroh, L. W.,** *Antioxidant Activity of Coffee Brews*, *European Food Research and Technology*, 223 (2006), pp. 469–474.
- [19] **Baskaran, K., Radhakrishnan, M.,** *High-Pressure Extraction of Bioactive Compounds from Green Coffee Beans*, *Journal of Food Process Engineering*, 47 (2024), pp. e14551.
- [20] **Farah, A., Donangelo, C. M.,** *Phenolic Compounds in Coffee*, *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18 (2006), pp. 23–36.
- [21] **Aborziza, M., Amalia, R., Zuhrotun, A., Kusaira, N., Ikram, K., Novitasari, D., Muchtaridi, M.,** *Coffee Bean Constituents as Chemopreventive Agents*, *Molecules*, 29 (2024), pp. 3302.
- [22] **Santanatoglia, A., Angeloni, S., Fiorito, M., Fioretti, L., Ricciutelli, M., Sagratini, G., et al.,** *Quantification of Organic Acids and Caffeine in Espresso Coffee*, *Journal of Food Composition and Analysis*, 125 (2024), pp. 105732.
- [23] **Barrea, L., Pugliese, G., Frias-Toral, E., El Ghoch, M., Castellucci, B., Chapela, S. P., et al.,** *Coffee Consumption, Health Benefits and Side Effects*, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63 (2023), pp. 1238–1261.
- [24] **Dong, R., Zhu, M., Long, Y., Yu, Q., Li, C., Xie, J., et al.,** *Green Coffee Bean Components and Thermal Contaminants*, *Food Research International*, 167 (2023), pp. 112700.
- [25] **Król, K., Gantner, M., Tatarak, A., Hallmann, E.,** *Polyphenols in Coffee Beans: Effect of Roasting and Storage*, *European Food Research and Technology*, 246 (2020), pp. 33–39.
- [26] **Baite, T. N., Mandal, B., Purkait, M. K.,** *Extraction of Coffee and Tea*, in: *Extraction Processes in the Food Industry*, Elsevier, 2024, pp. 247–277.
- [27] **Leszczyńska, T., Leszczyńska, L., Kapusta-Duch, J., Oliveira, A., Wołosiak, R., Pakosz, P., et al.,** *Antioxidant Activity of Coffee Components*, *Applied Sciences*, 13 (2023), pp. 2057.
- [28] **Therdthatha, P., Jareontanahun, N., Chaisuwan, W., Yakul, K., Paemanee, A., Manassa, A., et al.,** *Production of Functional Coffee Beans*, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53 (2023), pp. 102869.
- [29] **Stojanović, Z., Marković, S., Uskoković, D.,** *Merenje raspodele veličina čestica metodom difrakcije laserske svetlosti*, *Novi materijali*, 19 (2010), pp. 5.
- [30] **Jović, B.,** *Infracrvena spektroskopija*, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2021.
- [31] **International Organization for Standardization,** *ISO 14502-1: Determination of Total Polyphenols in Tea*, ISO, Geneva, Switzerland, 2005.
- [32] **Smolinski-Savi, P., Dos Santos, L., Goncalves, A., Biesek, S., Lima, C.,** *Analysis of Total Flavonoids in Fruits and Vegetables*, *Demetra*, 12 (2017), pp. 275–288.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.077>

*plamenogasitelj,
stabilnost, jednobazni barut,
kalijum sulfat, nitroestri*

KOLIKO PLAMENOGASITELJI MENJAJU STABILNOST JEDNOBAZNIH BARUTA?

*Key words:
flame retardant, stability,
single-base propellant, potassium
sulfate, nitric esters*

HOW MUCH DO FIRE RETARDANTS AFFECT THE STABILITY OF SINGLE-BASE PROPELLANTS?

Mladen BUGARČIĆ*

* m.bugarcic@itnms.ac.rs

„Milan Blagojević“ – Namenska AD, Lučani,
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd
ORCID: 0000-0002-6119-4414

Janko ŽIVANIĆ

Larar LAPČEVIĆ

Aleksandar JOVANOVIĆ

„Milan Blagojević“ – Namenska AD, Lučani
„Milan Blagojević“ – Namenska AD, Lučani
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd
ORCID: 0000-0001-9867-9282

Dimitrije ANĐIĆ

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd
ORCID: 0009-0001-6824-5202

Andela SIMONOVIĆ

Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd
ORCID: 0000-0003-4026-5647

Jovica NEŠIĆ

Ministarstvo odbrane Republike Srbije, Vojnotehnički institut, Beograd
ORCID: 0000-0002-0941-2445

Plamenogasitelji, pojedine kalijumove soli, koriste se kao aditivi radi smanjenja bljeska na ustima cevi. Uticaj se zasniva na inhibiciji postplamenih reakcija, odnosno na vezivanju reaktivnih radikala u gasnoj fazi i usporavanju sekundarnih lančanih reakcija sagorevanja, čime se smanjuje intenzitet vidljivog plamena. Brojni primeri iz prakse, kao i dostupni literaturni podaci, ukazuju da prisustvo kalijum-sulfata u barutnoj masi nepovoljno utiče na hemijsku stabilnost jednobaznih baruta. U ovom radu analiziraće se uticaj sastava barutne mase i tehnološkog postupka prerade na krajnju hemijsku stabilnost tri jednobazna baruta različite namene, NC-151, NC-48 i NCD-27, kojima je zajedničko prisustvo određene količine kalijum-sulfata. Poređenjem njihovog hemijskog sastava, sadržaja stabilizatora i ključnih faza tehnološke obrade biće razmotreno na koji način sastav i procesni parametri utiču na hemijsku stabilnost jednobaznih baruta. Procena hemijske stabilnosti biće izražena parametrom Bergmann–Junk, a Dobijeni rezultati su interpretirani u skladu sa dostupnim teorijskim postavkama i specifičnostima proizvodnog procesa, sa ciljem identifikacije ključnih parametara koji utiču na hemijsku stabilnost jednobaznih baruta koji sadrže kalijum sulfat kao plamenogasitelj..

Flame retardants, particularly certain potassium salts, are used as additives to reduce muzzle flash. Their effect is based on the inhibition of post-flame reactions, i.e., on the scavenging of reactive gas-phase radicals and the suppression of secondary combustion chain reactions, thereby reducing the intensity of visible flame. Numerous practical examples, as well as available literature data, indicate that the presence of potassium sulfate in the propellant composition adversely affects the chemical stability of single-base propellants. This paper analyzes the influence of propellant composition and processing technology on the final chemical stability of three single-base propellants of different applications, NC-151, NC-48, and NCD-27, all of which contain a certain amount of potassium sulfate. By comparing their chemical composition, stabilizer content, and the key stages of technological

processing, the study examines how compositional and process parameters affect the chemical stability of single-base propellants. The assessment of chemical stability will be expressed by the Bergmann–Junk parameter, and the obtained results will be interpreted in accordance with the available theoretical principles and the specific features of the manufacturing process, with the aim of identifying the key parameters affecting the chemical stability of single-base propellants containing potassium sulfate as a flame retardant.

1. Introduction

Since the introduction of smokeless propellants in the late nineteenth century, the reduction of muzzle flash has remained an important technological requirement, particularly for ammunition intended for night firing and for systems where visual signature must be minimized. Among the additives historically used for this purpose, potassium salts occupy a special place. Early French practice linked the use of potassium hydrogen tartrate with anti-flash formulations [1, 2], while later patent and technical literature documented the application of potassium sulfate as a conventional flame retardant in propellant charges [3, 4]. In parallel with their beneficial effect on flash reduction, however, these additives gradually came to be recognized as components that may also influence the chemical stability of the propellant system itself [5–7].

The flame-retarding action of potassium salts is explained by the fundamental chemistry of high-temperature combustion. In the flame zone and in post-flame reactions, potassium salts react with the highly reactive H and OH radicals responsible for sustaining secondary combustion, thereby terminating the radical propagation steps that maintain this process [8, 9]. Through reactions of this type, the overall radical pool is reduced, post-flame oxidation is inhibited, and the intensity of visible muzzle flash decreases.

At the same time, the chemical stability of single-base propellants is a complex property governed by a broad set of mutually related factors, including the chemical composition of the propellant matrix, the nature and content of stabilizers, grain geometry, the degree of residual acidity, solvent removal efficiency, and the thermal history of processing. Recent studies on the stability assessment of single-base propellants confirm that composition, grain characteristics, and the degree of prior decomposition strongly affect long-term behavior during storage [10–12]. From a formulation standpoint, potassium sulfate is especially important because it has long been regarded as a traditional flame-retarding additive, yet practical experience and available technical literature indicate that its presence may be accompanied by unfavorable effects on chemical stability [5, 6]. In other words, the reduction of muzzle flash may be achieved at the expense of a lower resistance of the propellant to chemical degradation, depending on both composition and process conditions.

For this reason, the influence of flame retardants on propellant stability cannot be interpreted only through the presence or absence of a given additive. It must also be considered through the full technological route by which the gelatinized nitrocellulose (NC) mass is processed into the final grain. The sequence of gelatinization, shaping, solvent removal, thermal treatment, and final polishing may alter the distribution of components within the grain and affect the rate at which destabilizing processes develop during storage. Consequently, a meaningful assessment of the role of potassium sulfate requires simultaneous consideration of both compositional parameters and production processing history.

The present paper addresses this issue through a comparative analysis of three single-base propellants of different applications, designated NC-151, NC-48, and NCD-27, which all contain potassium sulfate in their composition. By comparing their chemical composition, stabilizer content, and

key stages of technological processing, the paper aims to identify the parameters that most strongly govern the final chemical stability of these materials. Stability will be evaluated using the Bergmann–Junk parameter, and the results will be interpreted in the light of available theoretical principles and manufacturing-specific features. The main goal is to define the most significant compositional and technological factors by which the chemical stability of single-base propellants containing potassium sulfate as a flame retardant can be controlled and improved.

1.1. Theoretical assumptions

The theoretical starting point of this study is that the chemical stability of single-base propellants is not determined solely by the intrinsic reactivity of NC, but also by the combined effect of formulation variables and processing history, especially the presence of residual solvents, phlegmatizers and other substances. Tomaszewski, Cieślak, and Zygmunt showed that processing solvents remaining in smokeless powders significantly affect the thermal decomposition behavior of NC, with residual water exerting the strongest destabilizing effect [13]. Wei et al. further demonstrated that humectants such as water and ethanol modify the decomposition behavior and fire risk of NC [14], while Zhang et al. showed that the choice of solvent system influences the thermo-stability of NC gun propellants; notably, their data indicate that the diethyl ether/ethanol (DEE/EtOH) system gives the lowest onset decomposition temperature among the compared solvent systems [15]. Taken together, these results suggest that the boiling and desolventization stage cannot be regarded as a purely physical operation, because the nature and removal efficiency of volatile components may significantly affect the later thermal behavior and stability reserve of the propellant grain.

From the standpoint of inorganic additives, the key mechanistic framework is provided by Katoh et al., who showed that near-neutral salts, including K_2SO_4 , slightly shorten the induction time of NC heat release, and that this effect depends on salt solubility. Their interpretation was that such salts increase the boiling point of water, reduce its evaporation from the NC matrix, and thereby accelerate hydrolytic degradation [5]. Our interpretation doesn't align with this hypothesis, but the study itself is very valuable since it determines induction time period for numerous inorganic salts including K_2SO_4 . In the context of the present study, this finding is particularly important because it links the destabilizing effect of potassium sulfate not to a simple catalytic action, but to its influence on the physicochemical environment within the propellant matrix during processing and early decomposition.

2. General technological procedure

The general manufacturing process of single-base propellants begins with the loosening and proportioning of water-wet NC. This is followed by alcoholization, typically carried out using a hydraulic press, after which the alcoholized NC is subjected to gelatinization in kneaders, where diethyl ether (DEE) is added in order to obtain a homogeneous colloided propellant mass. The resulting mass is then press-molded and cut into the desired grain geometry, followed by transfer of the propellants to chambers for preliminary solvent removal.

From this stage onward, the technological route differs depending on the propellant type. In the case of large-grain propellants, such as NCD-27, solvent removal is performed by blowing inertized air through the grains, this procedure is followed by boiling after which the propellant is dried (caisson technology), finally the propellant is polished and sieved. For some fine-grain propellants, or for propellants whose chemical composition does not permit boiling, such as NC-151, solvent removal is carried out in a vacuum chamber. In the case of NC-48, the pressed propellant, after preliminary solvent removal, is introduced directly into water and then boiled to remove the remaining solvent. The propellant is subsequently dried and polished using a polyester-based polishing agent. In order

to obtain grains with the required granulometric density and a smooth polished surface the NC-48 propellant is re-polished and finally sieved.

Thus, although the initial and final stages of production are generally common for single-base propellants, the solvent-removal step represents the key technological difference that may significantly affect the final properties and stability of the propellant.

3. Materials and methods

The chemical stability of the investigated single-base propellants was determined by the classical Bergmann–Junk method using the Schulze–Tiemann subgroup for volumetric determination of evolved nitric oxide. Since the tested propellant's grains NCD-27, NC-151 and NC-48, are larger size, the samples were chopped prior to analysis. The original grains were chopped into smaller pieces of approximately 2.0×2.5 mm and sieved through 2.5×2.0 mm sieves, while the fraction retained on the 2.0 mm sieve was selected for testing. Approximately 5.0 ± 0.01 g of the prepared sample was weighed into heating tubes of 220 ± 5 mm length and 20 mm diameter, after which an absorption nozzle was attached. Before heating, the prepared samples were dried at 100 °C for 5 h and then allowed to cool to room temperature in a desiccator for about 4 h [16].

For the Bergmann–Junk test, the absorbent used for nitrogen oxide collection was 3% hydrogen peroxide with a small addition of solid MnO_2 . The absorbent was carefully introduced through the absorption nozzle into the heating tube containing the examined sample, and the assembled apparatus was then heated in a thermoblock at 132 °C for 5 h. After heating, the apparatus was allowed to cool to room temperature, and the absorbent solution in the heating tube was replaced without disconnecting the heating tube from the absorption nozzle. The resulting solution was then subjected to classical analytical filtration in order to obtain the filtrate for nitric oxide determination [16, 17].

In the Schulze–Tiemann subgroup, the filtrate was transferred into an acidic reaction medium and mixed with KMnO_4 , FeCl_2 , and technical HCl . The resulting mixture was placed in a round-bottom flask connected to the gas-measuring assembly. Upon heating, nitric oxide was released and passed through the system into a gas burette initially immersed in 30% sodium hydroxide solution. The burette was then transferred into water, and the gas volume was read. A blank test was carried out in the same manner using 3% H_2O_2 without sample. The measured gas volume was corrected for the blank (equation 1). Particular care was taken during transfer of the gas burette from the NaOH solution to water, since this step is critical for minimizing interference from atmospheric gases. The final result was expressed as $\text{cm}^3 \text{ NO}$ per 5 g of propellant and used for comparative evaluation of the chemical stability of the tested samples (equation 2).

$$V_1 = \frac{(B_0 - W) \cdot V_B \cdot 273}{760 \cdot T} \quad (1)$$

$$V_{\text{NO(propellant)}} = \frac{(B_0 - W) \cdot 2V_T \cdot 273}{760 \cdot T} - V_1 \quad (2)$$

V_1 (cm^3) – corrected volume of NO gases for blank test;

B_0 (mbar) – the barometric pressure calculated on the standard pressure and temperature;

W (mbar) – the saturation vapor pressure of water at room temperature;

V_B (cm^3) – the volume of NO gases from blank test experiment;

T (K) – measured temperature during experiment;

$V_{\text{NO(propellant)}}$ (cm^3) – corrected volume of NO gases from test experiment;

V_T (cm^3) – the volume of NO gases from test experiment

Samples of the three propellants were taken from finished production series of each single-base powder. For each propellant, seven different series were analyzed. Unless otherwise stated, all chemicals used for determination of the Bergmann–Junk parameter were of analytical grade.

4. Results and discussion

In the Table 1 are given corrected volumes of NO gas evolved during standardized Bergmann–Junk (BJ) procedure.

*Table1: Bergmann–Junk parameter (cm³ NO/ 5g of propellant)
for NCD-27, NC-151 and NC-48*

NCD-27							
s.A	s.B	s.C	s.D	s.E	s.F	s.G	mean value
5.32	5.84	5.38	5.28	5.28	6.93	5.06	5.58±0.64
NC-151							
s.A	s.B	s.C	s.D	s.E	s.F	s.G	mean value
5.18	4.08	5.11	4.77	4.00	3.05	4.82	4.43±0.76
NC-48							
s.A	s.B	s.C	s.D	s.E	s.F	s.G	mean value
7.21	6.16	6.30	10.56	11.34	7.67	5.81	7.91±2.20

As shown in Table 1, the Bergmann–Junk (BJ) parameter varies considerably among different series of propellant NC-48, whereas the scatter is markedly lower for NCD-27 and, especially, for NC-151. This behavior is consistent with the technological route described in Section 2, where NC-48, after preliminary solvent removal, is introduced directly into water and subjected to boiling. According to empirical production experience, the BJ value increases during the boiling stage and usually reaches its maximum during the final boiling regime, when the water temperature attains the highest value prescribed by the technological procedure. For that reason, the BJ parameter is determined after the final boiling stage in order to assess whether the propellant is suitable for further processing. In later stages of manufacture, the BJ value tends to decrease, which may be attributed to the stabilizing effect of diphenylamine, the conventional stabilizer used in many single-base propellants, including the three materials examined here [11,12,16].

Available literature provides a plausible explanation for this behavior. The stability of nitrocellulose-based propellants is strongly influenced by formulation variables, solvent content, residual moisture, and the applied technological procedure [11–15]. In particular, the presence of residual processing solvents and water has been shown to affect the decomposition behavior of NC, while increased moisture content promotes hydrolytic degradation and shifts the system toward lower thermal stability [10,13–15]. This effect appears to be most pronounced in NC-48, where NC, residual solvent, and water are simultaneously present during boiling. For practical industrial application, particular attention should be paid to the boiling stage of NC-48 processing, especially during the initial boiling regimes when the solvent content inside the propellant grain is still relatively high. The obtained results suggest that careful control of the water temperature increase, particularly during the early stages of boiling, may represent an important process measure for reducing BJ parameter vari-

ability and preserving the chemical stability of the propellant. The situation becomes even more important when K_2SO_4 is also present in the grain. Therefore, the present results suggest that K_2SO_4 does not necessarily destabilize NC on its own, but its destabilizing contribution becomes significantly more pronounced when the propellant matrix contains elevated solvent content and is simultaneously exposed to water during processing. This interpretation is supported by the behavior of NC-151, which contains a high amount of K_2SO_4 (47.0 ± 1.0 wt.% [12]) but exhibits much smaller BJ variation than NC-48, indicating that the technological environment in which the salt is present is at least as important as its concentration. By contrast, in NCD-27, where the grain contains dinitrotoluene and dibutyl phthalate, the variability of BJ is substantially reduced. Besides facilitating gelatinization, these additives likely improve the protection of the NC matrix against the combined influence of water and flame retardant, thereby reducing the extent of destabilization during processing. In this sense, the results in Table 1 indicate that the final chemical stability of single-base propellants is governed not only by the presence of flame retardants, but by the combined action of composition, solvent-removal history, water exposure, and gelatinization formulation additives [5,11–15].

5. Conclusions

The obtained results indicate that the chemical stability of single-base propellants is determined by the combined influence of composition and technological processing. The highest variability of the Bergmann–Junk parameter was observed for NC-48, which is consistent with its technological route involving direct contact with water during boiling in the presence of residual solvents. In contrast, NCD-27 and NC-151 showed lower variation, indicating that the presence of gelatinization and/or phlegmatization additives and the absence of such unfavorable processing conditions improve stability behavior. The results further suggest that potassium sulfate should not be considered an independently dominant destabilizing factor; instead, its negative influence becomes critical when combined with high solvent content and direct water contact during processing. Therefore, the final chemical stability of single-base propellants depends on the interaction between flame retardant content, solvent-removal history, water exposure, and the presence of formulation components that protect the nitrocellulose matrix.

6. Acknowledgements

The authors would like to express sincere gratitude to all colleagues who have worked in the production laboratory over the years, whose practical experience, dedication, and everyday engagement have significantly contributed to the understanding and control of propellant quality. Special appreciation is extended to those colleagues who routinely performed numerous Bergmann–Junk tests, thereby providing an invaluable basis for the assessment of chemical stability in daily practice. The authors also gratefully acknowledge **Milan Blagojević – Namenska AD** for its continuous support and for enabling further research in the field of single-base propellants.

7. References

- [1] **Bergman, Y.**, Development and production of smokeless military propellants in France, 1884–1918. Tel Aviv: Senate of Tel-Aviv University, 2008.
- [2] **Bret, P.** Managing Chemical Expertise: The Laboratories of the French Artillery and the Service des Poudres. In: MACLEOD, Roy and JOHNSON, Jeffrey Allan (eds.), *Frontline and Factory: Comparative Perspectives on the Chemical Industry at War, 1914–1924*. Online. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. p. 203–219. ISBN 978-1-4020-5490-7.

- [3] **Woodbridge, R. G.**, Propellant powder. US 1,888,847. 29 December 1931. United States of America.
- [4] **Woodbridge, R. G.**, Flashless powder charge. US 2,050,871. 11 August 1936. United States of America.
- [5] **Katoh, K., Higashi, E., Nakano, K., Ito, S., Wada, Y., Kasamatsu, J., Miya, H., Yamamoto, M., and Wada, Y.**, Thermal behavior of nitrocellulose with inorganic salts and their mechanistic action. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. October 2010. Vol. 35, no. 5, p. 461–467. DOI 10.1002/prop.200900074. 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [6] **Li, W., Wang, B., Zhang, J., Li, S., Xu, W., Liang, J., Fan, W., Ding, Y., Xiao, Z. and Zhou, J.**, Regulating the Thermal Behavior of Nitrocellulose by Stable Incorporation of a Green Supramolecular Salt. *Polymer Degradation and Stability*. 1 February 2024. Vol. 220. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110636.
- [7] **Maksimović, P. V.** Tehnologija baruta i eksploziva. Online. 1. Zagreb : Tehnički školski centar JNA, 1968. Available from: https://books.google.rs/books?id=P_doSAAACAAJ
- [8] **Babushok, V. I., Linteris, G. T., Hoorelbeke, P., Roosendans, D. and Van Wingerden, K.**, Flame Inhibition by Potassium-Containing Compounds. *Combustion Science and Technology*. 2 December 2017. Vol. 189, no. 12, p. 2039–2055. DOI 10.1080/00102202.2017.1347162.
- [9] **Cohen, A. and Decker, L.**, Chemical mechanism for secondary flash suppression. Symposium (International) on Combustion. Online. 1981. Vol. 18, no. 1, p. 225–231. DOI [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(81\)80027-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(81)80027-6).
- [10] **Chalghoum, F., Tarchoun, A. F., Abdelaziz, A., boukeciat, H., Hanafi, S., Saber, M. W., Chelouche, S., Benziane, M. and Trache, D.**, Influence of moisture content on the thermal decomposition kinetics of smokeless gunpowders. *FirePhysChem*. 1 August 2025. Vol. 5, no. 4, p. 313–322. DOI 10.1016/j.fpc.2024.11.003
- [11] **Rusly, S. N. A., Jamal, S. H., Samsuri, A., Mohd Noor, S. A. and Abdul Rahim, K. S.**, Stabilizer selection and formulation strategies for enhanced stability of single base nitrocellulose propellants: A review. 1 March 2024. KeAi Communications Co.
- [12] **Djokić, M. M., Bajić, Z. J. and Ignjatović, V. D.** Towards the reliable chemical stability testing of the single base gunpowder using a microcalorimetry method. *Military Technical Courier/Vojnotehnicki glasnik*. 2024. Vol. 72, no. 3, p. 1395–1413. DOI 10.5937/vojtehg72-51113.
- [13] **Tomaszewski, W., Cieřlak, K. and Zygmunt, A.**, Influence of processing solvents on decomposition of nitrocellulose in smokeless powders studied by heat flow calorimetry. *Polymer Degradation and Stability*. 2015. Vol. 111, p. 169–175. DOI 10.1016/j.polymdegradstab.2014.11.010.
- [14] **Wei, R. C., Huang, S. S., Wang, Z., He, Y., Yuen, R. and Wang, J.**, Estimation on the Safe Storage Temperature of Nitrocellulose with Different Humectants. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1 November 2018. Vol. 43, no. 11, p. 1122–1128. DOI 10.1002/prop.201800149.
- [15] **Zhang, X., Lei, M., Ren, J., Li, Z., Duan, X., Shen, J. and Pei, C.**, Influence of solvents on solubility, processability, thermostability, and mechanical properties of nitrocellulose gun propellants. *Cellulose*. 1 February 2025. Vol. 32, no. 3, p. 1539–1556. DOI 10.1007/s10570-025-06377-2.
- [16] **Rakić, M., Krstović, M., Dimić, M. and Fidanovski, B.**, Classical methods of Chemical stability: Comparison of analyses for gunpowders. *Scientific Technical Review*. 2021. Vol. 71, no. 1, p. 25–29. DOI 10.5937/str2101025r.

-
- [17] **Chebbah, M., Tarchoun, A. F., Benaliouche, F., Abdelaziz, A. and Trache, D.**, Advancing nitrocellulose thermal stability through the incorporation of ion-exchanged ZSM-5 zeolite for enhanced performance. *FirePhysChem.* 1 June 2025. Vol. 5, no. 3, p. 209–222. DOI 10.1016/j.fpc.2024.09.006.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.085>

Ključne reči:
brza identifikacija polimera;
test gorenja;
procena tipa polimera

IDENTIFIKACIJA POLIMERNIH MATERIJALA I ELASTOMERA NA BAZ BRZIH METODA PROCENE GUSTINE I TESTA GORENJA

Key words:
Rapid identification of polymers;
burning test; evaluation
of polymer type

IDENTIFICATION OF THERMOPLASTIC POLYMER MATERIALS BASED ON FLOATHING AND BURNING TEST METHODS

Matilda LAZIĆ

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Srbija
ORCID: 0009-0000-9174-554X

Dragan HALAS*

* draganhalas@gmail.com

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu, Zrenjanin, Srbija
ORCID: 0009-0005-1426-0326

Aleksandar DEDIĆ

Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0001-6120-6414

Duško SALEMOVIĆ

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu,
Zrenjanin, Srbija

Jelena BERA

Samostalna radnja za proizvodnju sirove gume Edos,
Edvin Bera PR, Zrenjanin

U radu je izvršena preliminarana identifikacija odabranih polimernih materijala i elastomera na bazi ispitivanja njihovog ponašanja u otvorenom plamenu kao i na bazi procene gustine (plutanje/tonjenje) u odgovarajućoj tečnosti, uz primenu brzih metoda identifikacije. Pretpostavljeno je da se na osnovu jednostavnih nestandardnih testova, brzih metoda identifikacije, može izvršiti procena vrste materijala od koje su izrađeni krajnji proizvodi od polimera/elastomera, a da dobijeni rezultati mogu odstupati od literaturnih vrednosti za čiste polimere/kaučuk. Na osnovu identifikovanih karakteristika prema primenjenim metodama, može se smatrati da su ispitivani uzorci izrađeni od sledećih materijala: ABS kaučuk, PET, PS, PP. Modifikacija osnovnog polimera u procesu kompaundiranja polimernog materijala utiče na promenu ispitivanih svojstava u odnosu na vrednosti za čiste komponente.

In this paper, a preliminary identification of the type of polymer materials from which samples of commercial polymer products were made was performed. The burning test was used to examine the behavior of the samples in an open flame. The method of flotation of samples in water was used to estimate the density of the samples from the tested series. It was assumed that additives for plastics cause deviations of the formulated plastics in relation to the expected behaviors shown in the literature for the basic polymer. It was estimated that the samples from the tested series, according to both applied methods, were made of thermoplastic polymer materials based on: HPP; PET, HIPS, ABS. Testing samples of commercial products made of thermoplastic materials are widely used for the production of various packaging due to the satisfactory application properties formed by the processing of the basic polymer, that is, by the formulation of modern types of polymer materials.

1. Introduction

Modern formulations of materials based on thermoplastic polymers are widely used in all industrial branches. In accordance with their improved qualitative and application properties adapted

to the requirements of industrial markets and environmental acceptability, they occupy a very important place in application. Because industrial products made from thermoplastic materials can be recycled [1, 2] they can very often be preliminary identified in landfills by quick methods, in order to increase the efficiency of their recycling. From the practical point of view, the above justifies the choice of the topic of this work.

Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) plastic is known for its excellent impact resistance, making it suitable for applications that require durability and toughness. ABS plastic is used to produce a wide range of products across various industries. Some common industries and types of products made out of ABS plastic include: consumer electronics, automotive parts, toys and games, household appliances, medical devices and equipment, sports and recreation equipment [3].

Polyethylene Terephthalate (PET) is a dimensionally stable thermoplastic with excellent machining characteristics that is transparent, lightweight, high tensile strength, semi-crystalline, virtually shatterproof, gas barrier, and solvent resistant. It is generally considered as inert and safe plastic, and highly recyclable. At present it is the most generally used thermoplastic polymer in the world. It is widely used as a packaging material in the food and beverage industries. It is also used to make fibers, pharmaceuticals, and make-up. With its lightweight, durable, and versatile properties, it has become an essential substance in the modern society [4].

Polystyrene (PS), a widely used synthetic aromatic polymer, is integral to industries such as packaging, construction, and medical equipment. General Purpose PS (GPPS), Expanded PS (EPS), High Impact PS (HIPS), and Syndiotactic PS (SPS) are some of the industrial important variants [5]. The Recycling of PS has been considered as a major strategy employed to reduce heavy load of plastic waste from environment but saddled with unlimited challenges [6].

Polypropylene (PP) is one of the most commonly used thermoplastics in the world. PP uses range from plastic packaging, plastic parts for machinery and equipment and even fibers and textiles [7]. PP is classified into three main types based on its chemical structure and properties [8]:

- Homopolymer (HPP). It is the most prevalent sort of market share is between 65% and 75%. Uses: Injection-molded items, fibers, sheets, and containers;
- Random Copolymer (RCP). Uses: In flexible containers that need clarity and transparent films (cast films);
- Polypropylene Impact Copolymer (ICP). Applications are ideal for impact-prone containers and automotive uses.

Quick methods for the identification of polymeric materials are simple tests that do not require a standardized method and procedure of sample preparation or the latest generation testing equipment. In this way, they allow only an assessment or a preliminary determination of the type of polymer material from which the examined samples were made [9,10]. The quick methods are applied in cases where only an assessment of the type of material from which the product is made is sufficient (for example: used packaging, etc.). This gives them an advantage of application in the separation of polymer materials for recycling at landfills and the like.

In this paper, a preliminary identification of the type of polymer materials from which samples of commercial polymer products were made was performed. The burning test was used to examine the behavior of the samples in an open flame. The method of flotation of samples in water was used to estimate the density of the samples from the tested series. It was assumed that additives for plastics cause deviations of the formulated plastics in relation to the expected behaviors shown in the literature

for the basic polymer. It was assumed that the samples from the tested series, according to both applied methods, were made of thermoplastic polymer materials based on: HPP; PET, HIPS, ABS [9], [10], [11].

2. Experimental part

2.1. Material

A series of 4 samples was used for testing using the burning test and the floating/sinking test in the corresponding liquid. The following samples of finished products made of polymer materials were examined: a glass of sour-milk product (sample 1); still water bottle (sample 2); bottle of personal hygiene product (sample 3); small toy (sample 4). The description of the tested samples is shown in Table 1.

Based on the reading numbers/labels from samples 1-3 (in accordance with recycling codes) from the literature [9,10] it was assumed that these are made of polymer materials based on: PS, PET, PP. The read data served as a guide for the examination of samples by selected, quick methods of analysis.

In the case of sample 4, the manufacturer's data [11] served as a guide for identification.

Table 1. Baseline data for evaluating the type of material in the tested series of samples

<i>Sample</i>	<i>Appearance/description of the sample</i>	<i>Visual description of the sample</i>	<i>Manufacturer label [9] or information [11] with a description</i>	<i>Density, g/cm³ [9] literature value for base polymer</i>	<i>A guide to determining the type of material</i>
Sample 1	sour-milk packaging products	milky white. It is not transparent, without press	6 – PS/HIPS	1,05 PS/HIPS	PS/HIPS
Sample 2	still water bottle	completely transparent, without press	1 - PET	1,35	PET
Sample 3	packaging - a bottle of personal hygiene products	It is not transparent, colored, without press	5 - PP	0,905	PP
Sample 4	Small toy - classic Lego brick	of hard plastic, red colored	ABS	1,05 copolymer	ABS

2.2. Methods

The testing of a series of samples using the burning test was carried out in the laboratories of the Technical College of Applied Sciences in Zrenjanin. The burning test does not require the application of standardized sample preparation methods [9,10]. In order to prepare, pieces of samples 1-3 of adequate size were cut to be introduced into the flame. Sample 4 was of a suitable size and shape so that it could be introduced into an open flame using tweezers without preparing the test tube. Each sample was individually introduced into the open flame of a Bunsen burner. The gas supply to the Bunsen burner was reduced to a minimum, to obtain a weak flame, for easier observation of changes in the sample. The behavior of tested samples in an open flame was observed: combustibility in/outside the flame; possibility of formation of drops during burning or melting of plastic material; the smell of steam after removing the flame; appearance of the residue after the test [9,10].

The flotation method was used to estimate the density of the samples from the tested series [9]. The method involves immersing the samples in the selected test liquid and observing the changes: the sample floats in the test liquid close to the mouth, swims below the surface of the test liquid/sinks to the bottom of the container with the test liquid. Based on the literature values of the density of samples from the tested series [9] for the test liquid of generalized approximate density, water was selected. The method is applicable because, according to literature data [10], the samples from the examined series do not dissolve in water, do not swell in water, and are in a compact-solid (non-foamed) state. Water was poured into a transparent test container and each individual sample was completely immersed in water using a glass rod (so that it was fully wetted). After removing the stick, the sample was left in a container of water to observe its behavior. The test was performed at 20°C using distilled water.

3. Results and discussion

The results of testing a series of samples using the burning test are shown in Table 2.

Table 2. Results of assessment of the type of polymer material using the burning test

Sample	Flammability and flame appearance	The smell of released gases	Appearance of the remains after burning	Assessment of the type of Polymer material
Sample 1	It turns on and off. It burns with a flickering flame. Yellow to dark black. Elongated flame, very sooty.	Styrene-like, aromatic odor.	burnt, black residue.	PS/HIPS
Sample 2	bright flame, crackles, goes out.	On the gas and sour.	Burned.	PET
Sample 3	It ignites and continues to burn after being taken out of the flame. Yellow with a blue circle at the beginning of burning.	Faint smell.	Burned out. No falling drops.	PP
Sample 4	Similar to PS.	Irritating.	Burnt and melted.	ABS

The results of the evaluation of the type of polymer material using the method of flotation of samples in water are given in Table 3.

Sample 1 is made of high toughness polystyrene (HIPS), that is, of GPPS, which is modified with polybutadiene chains. Modification of GPPS is carried out in order to achieve the required mechanical properties for use as packaging, for food products [12] (properties: dimensional stability, stiffness, etc.). Based on the above, it is considered that sample 1 has been preliminarily identified as a thermoplastic material: HIPS.

Sample 2 is made of PET. Transparent PET is a dimensionally stable, light, strong thermoplastic polymer, with excellent barrier properties against gases and external influences [4]. It is easily molded into standard bottles by blowing, for example, still water. It should be emphasized that in the case of the production of transparent PET, the polymerization reaction of the polymer is conducted in such a way as to obtain a polymer with a purely amorphous structure, which gives it the required possibility of application.

Table 3. The results of the evaluation of the type of polymer material using the method of flotation of samples in water

Sample	Density, g/cm ³ [9] literature value for base polymer		Assessment of the type of polymer material
Sample 1	1,05 PS/HIPS	Maintained on the surface, sub-merged.	PS/HIPS
Sample 2	1,35	Sinking to the bottom.	PET
Sample 3	0,905	Floats on the surface.	PP
Sample 4	1,05 Copolymer	Maintained on the surface, sub-merged.	ABS

Sample 3 is made of HPP because it is extensively used for making opaque (milky-white) packaging [13] e.g. for food and chemical products. HPP It is a standard thermoplastic material with satisfactory stiffness and barrier properties for the production of standard packaging. It is easily processed and shaped by injection molding and blowing for the production of e.g. bottle of standard quality.

It can be considered that sample 4 is made of ABS, which is a copolymer of acrylonitrile and styrene, which is modified with polybutadiene chains; but also with the addition of additives during the formulation of the material (during the processing of the basic polymer). It is stated in accordance with the manufacturer's data and the type/purpose of the selected test samples [3,11].

The results confirmed the initial estimates of the type of material of the samples (according to the recycling label/manufacturer's information) used in this test.

It should be emphasized that certain deviations were observed in the behavior of the series of tested samples in an open flame, compared to the behavior of pure polymers. According to the obtained results of the application of both test methods, the influence of additions to thermoplastic polymer materials on the change in the flammability of the starting polymers was confirmed. Additives in plastic masses affect the possibility of identification of polymer materials by burning test, which is in accordance with previous tests for certain materials from the tested series. [14].

The floating test of the samples in water confirmed the results of the burning test for the samples from the tested series.

4. Conclusion

According to the results of the tests using selected quick identification methods, the assumption that the samples of the final polymer products are made of thermoplastic polymer materials based on: HIPS, PET, HPP, ABS has been confirmed.

The presence of additives in plastic masses in the series of tested samples interferes to a lesser extent with the preliminary identification of the type of polymer material. The processing of the basic polymer in order to produce thermoplastic polymer materials of a defined purpose, enables obtaining a new class of material in relation to the basic/pure polymer, which results in differences in behavior in relation to the basic polymer.

The further course of work could include the study of the behavior of the samples during the pyrolytic test, consideration of the influence of the type of processing method on the possibility of evaluating the type of polymer materials using quick identification methods and similar.

5. References

- [1] **Young, R. J., P. A. Lovel**, *Introduction of Polymers, 1st Edition*, CRC Press/Taylor and Francis Group, USA, 2017.
- [2] **Larson, E. R.**, *Thermoplastic Material Selection, A Practical Guide*, 1st Edition, Elsevier/William Andrew, 2015.
- [3] *******, Brochure, *ABS Plastic: Understand the Key Benefits and Applications*, Proto labs, Inc., 2026.
- [4] **Kumar Mohajan, H. K.**, Polyethylene Terephthalate (PET): An Overview on Production, Consumption, and Recycling, *Art and Society*, 4 (2025), 6, pp. 30-35.
- [5] **Singh, A., A. Chauhan, R. Gaur**, A Review - A comprehensive review on the synthesis, properties, environmental impacts, and chemiluminescence applications of polystyrene (PS), *Discover Chemistry*, 2 (2025), 47, pp. 1-31.
- [6] **Salisu, A., Y.S. Maigari**, Polystyrene and its Recycling: A Review, *Proceedings of Materials Science and Technology Society of Nigeria (MSN), Kaduna State Chapter*, Kaduna State, Nigeria, 2021.
- [7] *******, Brochure, *What are the common uses of polypropylene plastic*, Adreco Plastics Ltd., 2022.
- [8] **Al-Zuhairi, Z. F., Ali A. A. Al-Zubiedy**, Recycling Polypropylene from waste Polymers: A Review, *System Safety: Human - Technical Facility – Environment*, 7 (2025), 1, pp. 431-442.
- [9] **Vujković, I., D. Stoiljković, S. Đilas**, *Rapid identification of polymeric materials*, Poli, Novi Sad, 2000.
- [10] **Braun, D.**, *Simple Methods for Identification of Plastics (with the Plastic Identification Table by Shechtling H.)*, 5th edition, Hanser Publishers, Munich, Germany, 2013.
- [11] *******, Brochure, *Materials in LEGO® bricks and elements*, Lego®, Denmark, 2026.
- [12] *******, Info-book, *High-Impact Polystyrene (HIPS): Definition, Properties, and Uses*, Oxmetry, 2025.
- [13] **Sin. L. T., B. S. Tueen**, *Plastics and Sustainability - Practical Approaches*, Elsevier, 2023.
- [14] **Lazić, M., D. Halas, A. Dedić, D. Salemović**, Rapid identification of polymer materials based on acrylonitrile butadiene styrene rubber using the burning test and behavior in an open flame, *Proceedings of the 36th International Process Industry Congress - Processing 23*, pp. 175-181.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.085>

Ključne reči:

fontanski sloj; cevni umetak;
fluido-dinamika; pad pritiska;
maseni protok čestica

Key words:

spouted bed; draft tube;
fluid dynamics; pressure drop;
particle mass flow rate

Dunja ŠIJAKOVIĆ*

* dsijakovic@tmf.bg.ac.rs

Katarina ŠUĆUROVIĆ

Tatjana

KALUĐEROVIĆ RADOIČIĆ

Nevenka

BOŠKOVIĆ-VRAGOLOVIĆ

UTICAJ VISINE CENTRALNE CEVI NA HIDRODINAMIKU U FONTANSKOM SLOJU SA CEVNIM UMETKOM

EFFECT OF CENTRAL TUBE HEIGHT ON HYDRODYNAMICS IN A DRAFT-TUBE SPOUTED FLUID BED

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0009-0007-5728-9713

Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd

ORCID: 0000-0001-9587-2773

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0003-4294-0343

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-3365-6052

Fontanski sloj predstavlja efikasan sistem za kontakt gas–krupne čestice sa širokom primenom u hemijskoj industriji. Posebno mesto zauzima fontanski sloj sa cevni umetkom, koji kombinuje prednosti pakovanog sloja sa karakterističnim fontanskim režimom strujanja, omogućavajući bolju kontrolu procesnih parametara i veću efikasnost sistema. U ovom radu prikazano je eksperimentalno ispitivanje fluido-dinamike u laboratorijskoj koloni sa fontanskim slojem i cevni umetkom. Eksperimentalna instalacija obuhvata kolonu sa ugrađenim mernim mestima za pritisak duž centralne cevi (p_1 – p_6) i u anularnom prostoru (pA_1 i pA_2). Na dnu kolone nalaze se dva seta mlaznica za kontrolisano uvođenje vazduha u sistem: kompresor obezbeđuje strujanje vazduha kroz centralnu cev, dok ventilator omogućava protok kroz anularni prostor. Ispitivanja su izvedena korišćenjem sfernih staklenih čestica, pri čemu je variran protok vazduha kroz centralnu cev i anulus. Posebna pažnja posvećena je ispitivanju uticaja visine centralne cevi, koja je podešavana na 3, 4,5, 6 i 8 cm. Analizirani su profili pritiska i maseni protok čestica kao ključni fluido-dinamički parametri. Rezultati pokazuju da visina centralne cevi značajno utiče na hidrodinamičko ponašanje i stabilnost sistema. Niže pozicije centralne cevi (3–4,5 cm) obezbeđuju stabilniji rad, manji pad pritiska i jednostavniju regulaciju procesa. Poređenjem četiri ispitivane konfiguracije utvrđeno je da smanjenje visine centralne cevi dovodi do poboljšanja ukupne efikasnosti sistema. Dobijeni rezultati potvrđuju da fontanski sloj sa cevni umetkom predstavlja efikasnu tehniku za procese kontakta gas–čestice, uz mogućnost optimizacije kroz izbor odgovarajućih geometrijskih parametara.

A spouted bed represents an efficient gas–coarse particle contact system with wide application in the chemical industry. In particular, a spouted bed with a draft tube (central tube insert) combines the advantages of packed beds with the characteristic spouting regime, enabling improved control of process parameters and enhanced operational efficiency. In this study, an experimental investigation of fluid dynamics in a laboratory-scale spouted bed column with a draft tube was performed. The experimental setup consisted of a column equipped with pressure measurement ports located along the central tube (p_1 – p_6) and in the annular region (pA_1 and pA_2). Air was introduced into the system through two sets of nozzles at the bottom of the column: compressed air supplied the central tube, while a fan provided airflow through the annular space. Experiments were conducted using spherical

glass particles, with systematic variation of airflow rates through both the central tube and the annulus. The influence of central tube height on system performance was investigated for four configurations: 3, 4.5, 6, and 8 cm. Key fluid-dynamic parameters, including pressure profiles and particle mass flow rate, were measured and analyzed. The results demonstrate that the central tube height has a significant impact on the hydrodynamic behavior and stability of the spouted bed. Lower central tube positions (3–4.5 cm) resulted in more stable operation, lower pressure drop, and improved process controllability. Comparative analysis of the four tested configurations indicates that reduced central tube height enhances overall system efficiency. These findings confirm that spouted beds with draft tubes represent a highly effective technique for gas–solid contact processes, with potential for optimization through appropriate geometric configuration.

1. Uvod

Fontanski sloj predstavlja jedan od efikasnih sistema za kontakt gasa-krupne čestice sa širokom primenom u hemijskoj industriji [1,2]. Sistemi sa pakovanim slojem čestica koriste se u brojnim industrijskim procesima, omogućavajući intenzivan kontakt između faza [3]. U tom kontekstu, fontanski sloj sa cevnom umetkom predstavlja savremeno rešenje koje kombinuje principe pakovanog sloja sa karakterističnim „fontanskim“ efektom, obezbeđujući dobru kontrolu procesnih parametara i visoku efikasnost u operacijama kao što su kataliza, sušenje i mikroinkapsulacija [4,5]. Poseban značaj ovih sistema ogleda se u mogućnosti obrade različitih tipova čestica, uključujući nepravilne, sitne i lepljive materijale, što ovu oblast čini aktuelnom i istraživački relevantnom [2].

Uprkos značajnom broju istraživanja, i dalje postoje nedovoljno razjašnjeni aspekti uticaja konstruktivnih i operativnih parametara na rad fontanskog sloja sa cevnom umetkom [4,5]. Posebno se izdvajaju uticaji visine centralne cevi i raspodele protoka između centralne cevi i anularnog prostora na fluidodinamičke karakteristike sistema. Dosadašnja istraživanja su se pretežno fokusirala na osnovne radne režime, dok je optimizacija ovih parametara sa aspekta energetske efikasnosti i stabilnosti rada ostala nedovoljno ispitana, čime se otvara prostor za dodatna istraživanja.

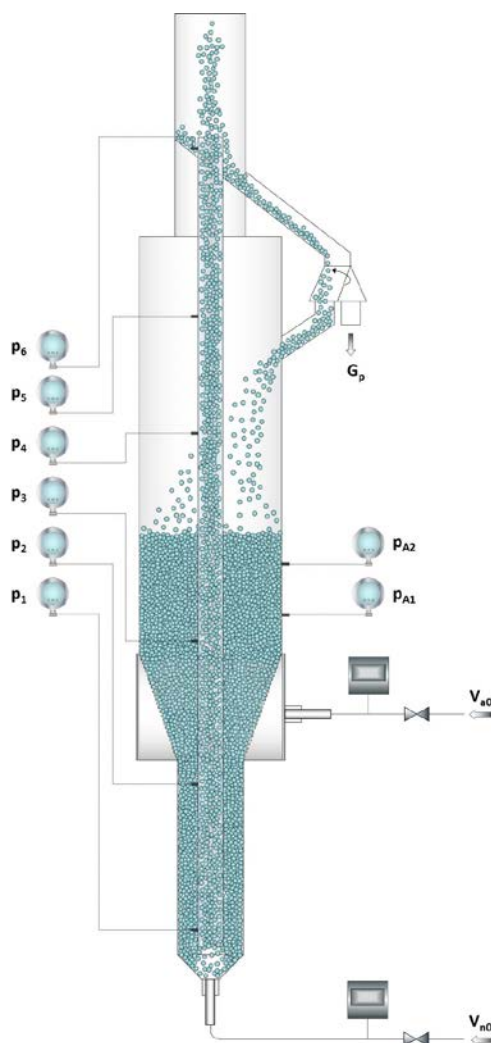
Predmet ovog rada je eksperimentalno ispitivanje uticaja visine centralne cevi i raspodele protoka gasa kroz centralnu cev i anularni prostor na fluidodinamičke parametre fontanskog sloja sa inertnim česticama. Cilj istraživanja je određivanje optimalnih uslova rada sistema u cilju postizanja stabilnog fontanskog režima i efikasnog iskorišćenja energije. Istraživačka pitanja obuhvataju uticaj visine cevi na profil pritiska i stabilnost sloja, kao i uticaj raspodele protoka na maseni protok čestica i ukupnu efikasnost procesa. Polazi se od hipoteze da postoji optimalna kombinacija ovih parametara koja omogućava stabilan rad i poboljšane performanse sistema.

Očekuje se da rezultati istraživanja omoguće jasnije razumevanje međusobnog uticaja ispitivanih parametara i definišu optimalne operativne uslove. Dobijeni zaključci mogu imati značajnu primenu u unapređenju industrijskih procesa, posebno u operacijama kao što je sušenje, kroz razvoj efikasnijih i ekonomičnijih sistema.

2. Materijali i metode

2.1. Opis aparature

Eksperimenti su izvedeni u koloni sa fontanskim slojem i cevnom umetkom, sa ciljem ispitivanja uticaja visine centralne cevi na fluido-dinamičke karakteristike sistema [3,4,7,10]. Šematski prikaz eksperimentalne kolone dat je na slici 1, dok su osnovne geometrijske i merne karakteristike sistema opisane u nastavku.



Slika 1. Šematski prikaz fontanskog sloja sa cevnim umetkom

Kolona prečnika 10,4 cm sastoji se od centralne cevi visine 154 cm, spoljašnjeg prečnika 20 mm i unutrašnjeg prečnika 15 mm, kroz koju se vazduh uvodi pomoću mlaznice, i anularnog prostora koji se formira između cevi i zida kolone. Na dnu anularnog prostora, koji je konusnog oblika, postavljene su mlaznice za uvođenje vazduha, čime se omogućava nezavisna kontrola strujanja u oba dela sistema.

Radi praćenja raspodele pritiska, duž centralne cevi postavljeno je šest mernih mesta (p_1 – p_6), dok su u anularnom prostoru definisane dve merne tačke (p_{A1} i p_{A2}), što je prikazano na slici 1, a njihove tačne pozicije date su u tabeli 1.

Tabela 1. Položaj senzora

Oznaka senzora pritiska	Položaj senzora u odnosu na dno kolone
P1	2 cm
P2	17 cm
P3	32 cm
P4	72 cm
P5	112 cm
P6	152 cm

Snabdevanje sistema vazduhom realizovano je pomoću kompresora za centralnu cev i ventilatora za anularni prostor, pri čemu su protoci mereni rotametrima i označeni kao V_{n0} i V_{a0} , respektivno. Na ovaj način omogućena je precizna kontrola ulaznih procesnih parametara [1].

Strujanje vazduha kroz centralnu cev indukuje transport čestica sa dna kolone, pri čemu se formira fontanski sloj [2,5,8]. Čestice se nakon uzlaznog kretanja vraćaju u anularni prostor kroz povratnu cev, gde je, pomoću klapne, omogućeno njihovo izdvajanje iz sistema i određivanje mase-nog protoka, označenog kao G_p .

Kao čvrsta faza korišćene su inertne čestice – staklene sfere prečnika 2 mm, čije su karakteristike prikazane u tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike čestica u sloju

<i>Prečnik čestica, d_p [mm]</i>	<i>Masa čestica, m [kg]</i>	<i>Gustina čestica, ρ_p [kg/m³]</i>	<i>Brzina minimalne fluidizacije, U_{mF} [m/s]</i>
2	5646,27	2500	1,15983

2.2. Postupak rada

Eksperimentalni rad podeljen je u četiri seta, pri čemu svaki set odgovara različitoj visini centralne cevi (3 cm, 4,5 cm, 6 cm i 8 cm), čime je omogućena analiza uticaja ovog geometrijskog parametra na ponašanje sistema [3].

Tokom izvođenja eksperimenata, protok vazduha kroz centralnu cev održavan je konstantnim za zadatu vrednost, dok je protok kroz anularni prostor postepeno povećavan u opsegu od 0 do 40 m³/h, što je omogućilo sistematsko ispitivanje uticaja oba strujna toka. Za svaku vrednost protoka kroz anularni prostor vršena su merenja pritiska pomoću digitalnih senzora, nakon čega je određivana masa čestica izdvojenih iz sistema u vremenskom intervalu od 5 s, čime je izračunavan maseni protok čestica. Na taj način su za svaku radnu tačku simultano određivani hidrodinamički i transportni parametri sistema [4].

U okviru svakog seta eksperimenata, za protoke kroz centralnu cev u opsegu od 15 do 25 m³/h, varirani su protoci kroz anularni prostor, pri čemu je najveći broj kombinacija ostvaren za najmanju visinu centralne cevi (3 cm). Sa povećanjem visine centralne cevi dolazi do smanjenja broja stabilnih radnih režima, budući da pri niskim protocima ne dolazi do formiranja fontanskog sloja, dok se pri visokim protocima javlja klipno strujanje [2,5,9].

Svi eksperimenti izvedeni su u stacionarnim uslovima, pri čemu je opisani postupak omogućio prikupljanje podataka neophodnih za određivanje profila pritisaka u centralnoj cevi i anularnom prostoru, kao i za analizu masenog protoka čestica u sistemu.

3. Rezultati i diskusija

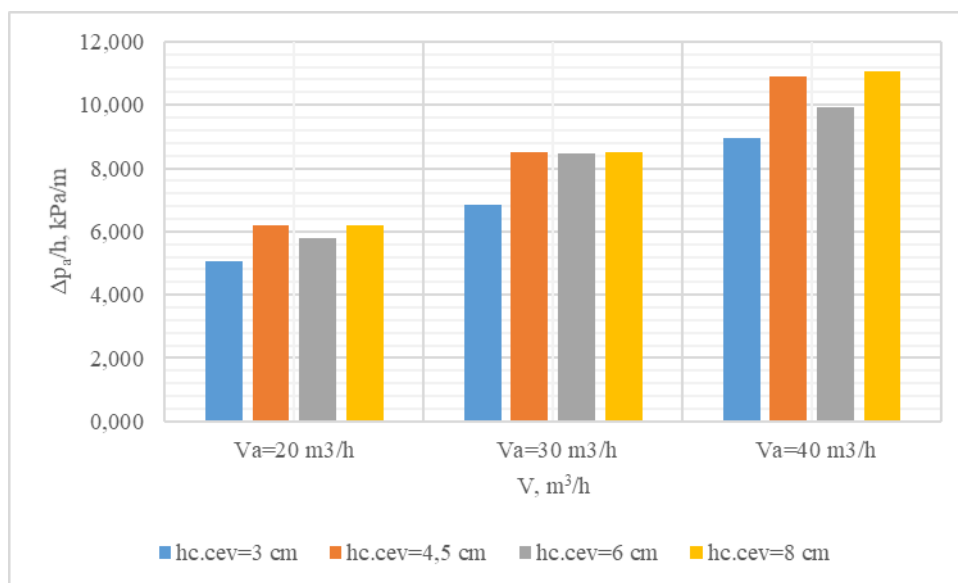
3.1. Rezultati

Eksperimentalni podaci obrađeni su u softverskom paketu Excel, pri čemu su određeni podužni padovi pritiska u anularnom prostoru i centralnoj cevi, kao i maseni protok čestica. Pad pritiska izražen je kao razlika pritisaka između odgovarajućih mernih tačaka normalizovana njihovim međusobnim rastojanjem, dok je maseni protok čestica određen kao odnos izmerene mase i vremena isticanja.

U cilju reprezentativnog prikaza rezultata izdvojene su slike 2–4, koje prikazuju uticaj visine centralne cevi na ključne procesne parametre pri stabilnim radnim režimima.

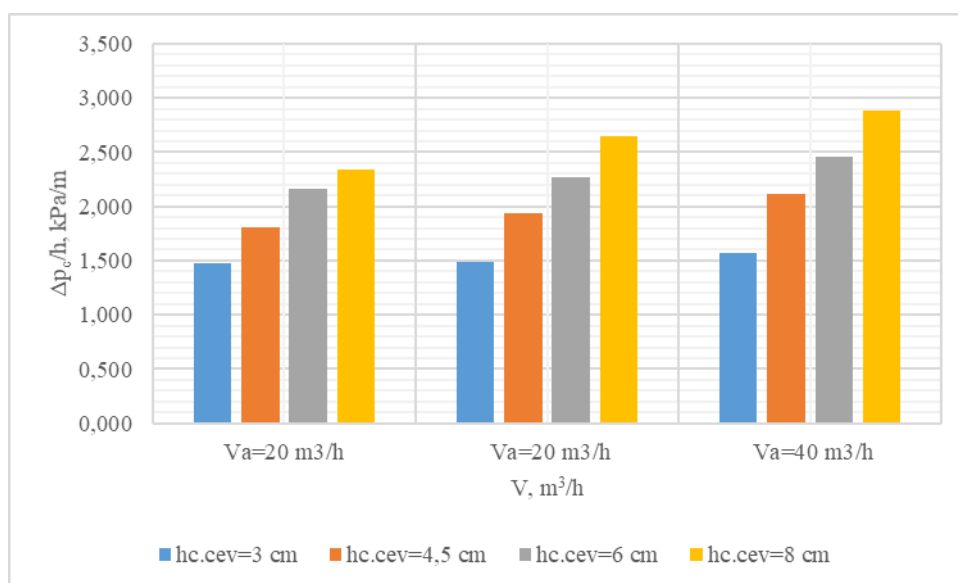
Na slici 2. prikazan je uticaj visine centralne cevi na pad pritiska u anularnom prostoru. Uočava se da sa povećanjem visine dolazi do porasta pada pritiska do približno 4,5 cm, nakon čega dalji

porast visine nema značajan uticaj na posmatrani parametar. Istovremeno, pad pritiska pokazuje izraženu zavisnost od protoka kroz anularni prostor, sa monotonim porastom u celom ispitivanom opsegu [1,7].



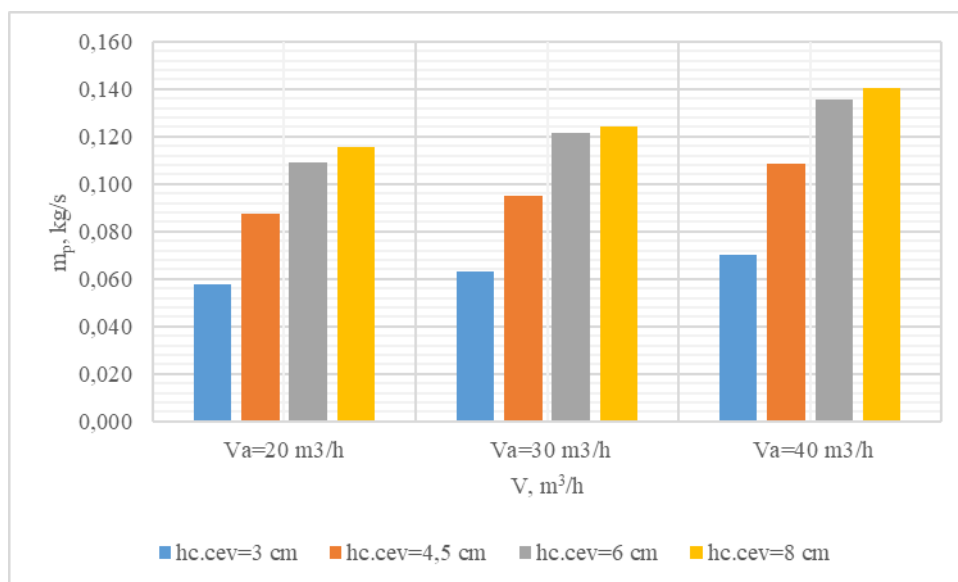
Slika 2. Grafički prikaz uticaja visine centralne cevi na pad pritiska u anulusu

Na slici 3. prikazan je uticaj visine centralne cevi na pad pritiska u centralnoj cevi. Rezultati ukazuju na postepeno povećanje podužnog pada pritiska sa povećanjem visine, što upućuje na promene u hidrodinamičkom režimu i intenzitetu interakcije između fluida i čestica unutar cevi [3,4,10].



Slika 3. Grafički prikaz uticaja visine centralne cevi na pad pritiska u centralnoj cevi

Na slici 4. prikazan je uticaj visine centralne cevi na maseni protok čestica. Uočava se porast masenog protoka sa povećanjem visine, uz tendenciju asimptotskog ponašanja pri većim visinama, gde razlike između 6 i 8 cm postaju zanemarljive.



Slika 4. Grafički prikaz uticaja visine centralne cevi na maseni protok čestica

3.2. Diskusija

Dobijeni rezultati ukazuju da su hidrodinamičke karakteristike fontanskog sloja dominantno određene međusobnim odnosom protoka kroz centralnu cev i anularni prostor, dok visina centralne cevi ima sekundarni, ali ne zanemarljiv uticaj.

Pad pritiska u anularnom prostoru pokazuje ograničenu osetljivost na promenu visine centralne cevi. Nakon određene geometrijske konfiguracije (~4,5 cm), dalji porast visine ne dovodi do značajnih promena, što sugerise da je strujanje u anularnom prostoru prvenstveno kontrolisano ulaznim protokom, a ne geometrijom umetka [1,2]. Ovakvo ponašanje je u skladu sa očekivanom dominacijom spoljnog strujanja u određivanju ukupnog hidrauličkog otpora sistema.

Nasuprot tome, pad pritiska u centralnoj cevi pokazuje izraženiju zavisnost od visine. Povećanje visine dovodi do produženja zone interakcije između gasne i čvrste faze, čime se povećava disipacija energije i ukupni hidraulički otpor [3]. Ovo ukazuje na značaj unutrašnje cirkulacije čestica i intenziteta dvofaznog strujanja u centralnoj zoni.

Maseni protok čestica raste sa povećanjem visine centralne cevi, ali sa smanjenjem intenziteta rasta pri većim visinama. Uočeno asimptotsko ponašanje ukazuje na postojanje ograničenja u transportnom kapacitetu sistema, koje je verovatno povezano sa stabilnošću fontane i prelaskom ka nepovoljnim režimima strujanja (klipno strujanje) [2,5,8,9].

Sa aspekta optimizacije procesa, pad pritiska i maseni protok predstavljaju suprotstavljene kriterijume. Povećanje protoka vazduha unapređuje transport čestica, ali istovremeno povećava energetske gubitke. Stoga optimalni radni uslovi podrazumevaju kompromis između maksimalnog transporta čestica i minimalnog energetskog utroška.

Rezultati ukazuju da povećanje visine centralne cevi iznad određene vrednosti ne donosi proporcionalno poboljšanje performansi, što je od značaja pri projektovanju i skaliranju sistema sa fontanskim slojem.

4. Zaključci

Analizom eksperimentalnih rezultata utvrđeno je da se pri najmanjem rastojanju centralne cevi od dna kolone (3 cm) ostvaruje stabilan režim vertikalnog toka uz najmanji potreban protok gasa kroz centralnu cev. U tim uslovima zabeleženi su i najmanji ukupni pad pritiska i najmanji maseni protok

čestica. Povećanjem visine centralne cevi dolazi do porasta pada pritiska i masenog protoka čestica, ali i potrebe za većim protocima gasa radi uspostavljanja stabilnog fontanskog režima.

Manje rastojanje cevi od dna pogoduje radu sistema sa aspekta niže potrošnje energije i manjeg pada pritiska. Sa druge strane, povećanje rastojanja omogućava veći maseni protok čestica, što može biti prednost u procesima gde je potreban veći kapacitet. Međutim, pri veoma visokim protocima dolazi do nestabilnog režima strujanja, koji je teško kontrolisati. Takođe je pokazano da povećanje protoka kroz anulus omogućava stabilan rad i pri nižim protocima kroz centralnu cev. Profili pritiska ukazuju na rastući trend duž cevi, sa izraženijim gradijentom u njenom početnom delu.

Rezultati ovog rada doprinose boljem razumevanju uticaja visine centralne cevi i raspodele protoka na fluidodinamičke karakteristike fontanskog sloja sa cevnom umetkom. Posebno je pokazano da iznad određene visine (oko 6 cm) dalji porast visine nema značajan uticaj na ključne parametre.

Dobijeni rezultati ukazuju da nije neophodno koristiti veća rastojanja centralne cevi, jer se slični efekti postižu i pri manjim visinama uz nižu energetska potrošnju. Identifikovani su optimalni radni uslovi: visina centralne cevi od 4,5 cm, protok kroz centralnu cev od 20 m³/h i varijabilni protoci kroz anulus u opsegu 4–40 m³/h, za čestice prečnika 2 mm. Ovi uslovi obezbeđuju dobar balans između stabilnosti procesa, pada pritiska i masenog protoka.

Rezultati predstavljaju osnovu za dalje optimizacije i primenu u industrijskim uslovima, posebno u procesima gde je važna kontrola stabilnosti i efikasnosti, kao što je sušenje čvrstih materijala. Buduća istraživanja mogu biti usmerena na različite tipove čestica i širi opseg operativnih uslova u cilju dodatnog unapređenja performansi sistema.

5. Spisak oznaka i skraćenica

d_p – prečnik inertne čestice (volumenski), m

G_p – maseni protok inertnih čestica u cevnom umetku, kg/s

m – masa inertnih čestica u sloju, kg

U_{mF} – površinska brzina fluida u stanju minimalne fluidizacije, m/s

V_{a0} – zapreminski protok vazduha na ulazu u anularni deo sloja, m³/s

V_{n0} – zapreminski protok vazduha na mlaznici na ulazu u sloj, m³/s

ρ_p – gustina inertnih čestica, kg/m³

6. References

- [1] **Kunii, D., O. Levenspiel**, Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 1991.
- [2] **Mathur, K. B., N. Epstein**, Spouted Beds, Academic Press, New York, USA, 1974.
- [3] **Grbavčić, Ž. B., Vuković, D. V., Garić-Grulović, R. V., Hadžismajlović, Dž. E., Littman, H., Morgan, M. H.**, Fluid flow pattern and solids circulation rate in a spout-fluid bed with draft tube, Canadian Journal of Chemical Engineering, 70 (1992), pp. 895–904.
- [4] **Wu, F., X. Che, Z. Huang, H. Duan, X. Ma, W. Zhou**, Numerical study on the gas-solid flow in a spouted bed installed with a controllable nozzle and a swirling flow generator, ACS Omega, 5 (2020), 2, pp. 1014–1024.
- [5] **Epstein, N., Grace, J. R.**, Spouting of Particulate Solids, Handbook of Powder Science and Technology, Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA, 1984, pp. 507–536.
- [6] **Grbavčić Ž. B.**, Ispitivanje mehanike fontanskog sloja niskog pada pritiska sa kontrolisanim kretanjem čestica, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, 1989.

-
- [7] **Mollick, P. K.**, Critical assessment of performance of a draft tube configured in a spouted bed for various fluid–particle properties, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58 (2019), 42, pp. 19670–19680.
 - [8] **Tellabide, M., I. Estiati, A. Pablos, H. Altzibar, R. Aguado, M. Olazar**, Minimum spouting velocity of fine particles in fountain confined conical spouted beds, *Powder Technology*, 374 (2020), pp. 597–608.
 - [9] **Moradkhani, M. A., S. H. Hosseini, M. Olazar, H. Altzibar, M. Valizadeh**, Estimation of the minimum spouting velocity and pressure drop in open-sided draft tube spouted beds using genetic programming, *Powder Technology*, 387 (2021), pp. 363–372.
 - [10] **Brito, R. C., M. Tellabide, A. Atxutegi, I. Estiati, J. T. Freire, M. Olazar**, Draft tube design based on a borescopic technique in conical spouted beds, *Advanced Powder Technology*, 32 (2021), 11, pp. 4420–4431.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.099>

Ključne reči:

azo boje; UV-Vis spektroskopija;
solvatohromizam; tautomerija;
kiselo-bazna ravnoteža

NOVE AZO BOJE IZVEDENE IZ PIRIDONA: SINTEZA, STRUKTURNA KARAKTERIZACIJA I SOLVATOHROMNA SVOJSTVA

Key words:

azo dyes; UV-Vis spectroscopy;
solvatochromism; tautomerism;
acid-base equilibrium

NOVEL PYRIDONE-DERIVED AZO DYES: SYNTHESIS, STRUCTURAL CHARACTERIZATION, AND SOLVATOCHROMIC PROPERTIES

Luka MATOVIĆ*

* lmatovic@tmf.bg.ac.rs

Vojkan STAMENKOVIĆ

Jelena LAĐAREVIĆ

Nemanja TRIŠOVIĆ

Anita LAZIĆ

Aleksandra MAŠULOVIĆ

Dušan MIJIN

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0003-4945-7776

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-5554-7295

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-9231-4810

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0003-4855-3782

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0002-5279-7694

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0001-5691-2971

Azo boje predstavljaju najznačajniju klasu organskih boja zahvaljujući svojoj strukturnoj raznovrsnosti, podesivim svojstavima i širokom spektru primena u različitim naučnim i industrijskim oblastima. Heterociklične azo boje predstavljaju značajnu potklasu ovih jedinjenja, pri čemu se posebno izdvajaju azo boje na bazi piridona zbog jednostavne sinteze, visoke funkcionalnosti i visokih vrednosti molarog ekstinkcionog koeficijenta (ϵ). U ovom radu izvršena je sinteza i detaljna karakterizacija dva nova molekula azo boja izvedenih iz piridona. Boje su dobijene reakcijom diazotovanja anilina i 4-aminofenola, a zatim reakcijom diazo-kuplovanja sa novim 4-(piridin-3-il)-6-hidroksi-3-cijano-2-piridonom. Oba jedinjenja su okarakterisana temperaturom topljenja, ATR-FTIR i ^1H NMR spektroskopijom. UV-Vis spektroskopija korišćena je za ispitivanje solvatohromnih i tautomernih svojstava ovih jedinjenja u setu rastvarača različite polarnosti. Pored toga, ispitivano je i dejstvo pH vrednosti rastvarača na tautomernu ravnotežu ovih jedinjenja (kiselo-bazna ravnoteža).

Azo dyes are widely recognized as the most significant class of organic colorants due to their extensive structural diversity, tunable properties, and a wide range of applications across multiple scientific and industrial fields. Heterocyclic azo dyes constitute a notable subclass of these compounds, with pyridone-based azo dyes being especially significant, due to their straightforward synthetic route, functionality, and a high molar extinction coefficient (ϵ). In this paper, two novel pyridone-derived azo dye molecules were synthesized and thoroughly characterized. The dyes were obtained by a diazotation reaction of aniline and 4-aminophenol, and subsequent diazo-coupling reaction with a novel 4-(pyridin-3-yl)-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone. All compounds were characterized by melting point, ATR-FTIR, and ^1H NMR spectroscopy. The UV-Vis spectroscopy was employed to inve-

stigate the solvatochromic and tautomeric properties of these compounds in a set of solvents of different polarity. In addition, the influence of the solvent's pH value on tautomeric equilibrium was investigated (acid-base equilibrium).

1. Introduction

Azo dyes comprise the most extensive and versatile class of organic colorants, owing to their distinctive chemical structures and electronic properties, which enable a wide range of applications in scientific and industrial domains. In addition to their most common use in textile dyeing industry, they are utilized in optoelectronics, optical storage devices, laser technology, non-linear optics (NLO), as photosensitizers in dye-sensitized solar cells (DSSC), food and cosmetic industry, among others [1,2]. Moreover, numerous azo dyes display significant biological activities, thereby extending their applicability in pharmaceutical and biomedical fields [3]. Heterocyclic azo derivatives are of great importance, since the incorporation of the heterocyclic moiety in the azo dye structure enhances the physicochemical properties of the molecule, including thermal and chemical stability and coloring efficiency. Among these derivatives, azo dyes obtained from a 2-pyridone moiety, as a nitrogen-containing heterocycle, are of particular significance. The introduction of this electron-rich fragment extends the π -conjugation, thereby modulating the electronic structure and enhancing the light-absorption behavior (optical and photophysical features) of an azo dye molecule. Pyridone-based azo dyes exhibit higher coloring strength, brighter hues, and improved fastness properties compared with their carbocyclic analogues. In addition to their wide-ranging industrial applications, these compounds have also been reported to exhibit various biological and pharmacological activities [4-10]. In this paper the multistep synthetic route, characterization, solvatochromic behavior, and acid-base tautomeric equilibria of two novel pyridone-derived azo dye molecules, designated as **A1** and **A2**, were presented (Figure 1). The azo dyes were obtained by initial diazotation reaction of aniline and 4-aminophenol, and by subsequent diazo-coupling reaction of formed diazonium salts with a novel 4-(pyridin-3-yl)-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone. Solvatochromic behavior was investigated by the means of UV-Vis spectroscopy in a set of eight solvents of diverse polarity, namely dimethylformamide (DMF), dimethyl sulfoxide (DMSO), methanol, ethanol, acetonitrile, ethyl-acetate, acetone, and chloroform (**A1**), whereas the tautomeric equilibria in an acid/basic medium were investigated by incorporation of hydrochloric acid (HCl) and potassium hydroxide (KOH) and triethylamine (TEA) in ethanol, methanol, chloroform, and DMF solutions of obtained azo dyes.

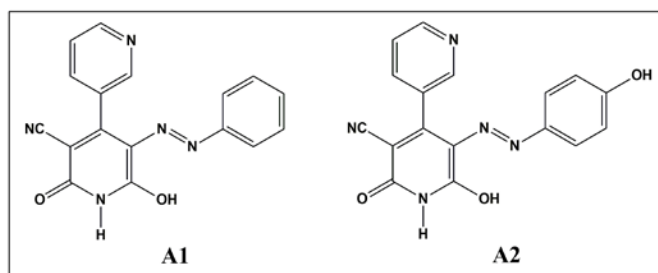


Figure 1. The structures of newly synthesized azo dyes **A1** and **A2**

2. Experimental

All chemicals employed in this study were of reagent grade, obtained from Aldrich, Merck, Fisher Chemical, Fluka, and Baker, and used without further purification. The azo dyes were synthesized *via* modified procedures. Firstly, the ethyl-nicotinate was obtained starting from nicotinic acid, followed by Claisen condensation reaction to afford keto ester, namely 3-oxo-3-(pyridin-3-yl)

propanoate (**B**). In the next step, condensation of the resulting keto ester with cyanoacetamide yielded 4-(pyridin-3-yl)-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone (**Pyr**), which was subsequently subjected to diazo coupling reaction with selected diazonium salts, **S1** and **S2**, to give novel azo dyes **A1** and **A2**, respectively (Figure 2). All final compounds were characterized *via* melting points, elemental analysis, ATR-FTIR, and ^1H NMR spectroscopy. The melting points were taken using *Stuart SMP30* apparatus. The elemental analysis was performed using *Vario EL III* elemental analyzer. The ATR-FTIR spectra were recorded using *Thermo Scientific Nicolet iS10* spectrophotometer, in $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ domain. The ^1H NMR spectra of dyes were obtained by *Bruker Ascend 400* spectrometer in deuterated chloroform (CDCl_3), whereby the chemical shifts are displayed in ppm units, regarding tetramethylsilane (TMS) as an internal standard. The UV-Vis spectra were collected by *UV-Vis 1700 Shimadzu* spectrophotometer, at the room temperature, in $220\text{--}750\text{ nm}$ range.

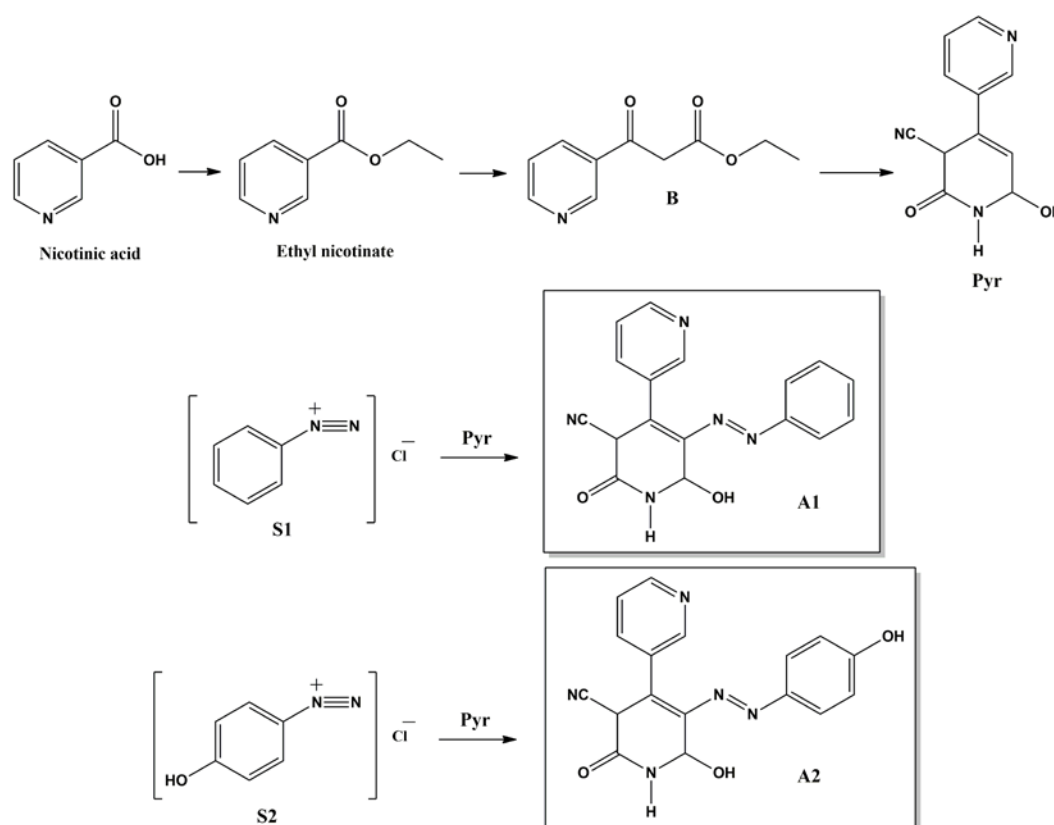


Figure 2. Schematic representation of the reaction path for obtaining **A1** and **A2** azo dyes

2.1. Synthesis of ethyl nicotinate

The titled compound was synthesized according to a modified literature procedure [11]. In a round bottom flask, 4.0 g (32.5 mmol) of nicotinic acid and 12.72 ml (218 mmol) of an absolute ethanol were added. The resulting suspension was stirred at a room temperature for 10 minutes. Subsequently, 5.65 ml (102 mmol) of a concentrated sulfuric acid was added dropwise, and the resulting mixture was vigorously stirred under reflux for five hours. After approximately an hour, a clear solution was obtained. After the reaction was completed, the resulting mixture was poured onto ice, and the pH was adjusted to 10-11 using 10% aqueous solution of potassium carbonate (K_2CO_3). The resulting mixture was extracted with diethyl ether, and dried over magnesium sulfate, after which the excess of solvent was evaporated under the reduced pressure. The obtained ethyl nicotinate was pale-yellow oil, and was used without further purification. Yield was 84%.

2.2. Synthesis of 3-oxo-3-(pyridin-3-yl)propanoate (**B**)

The titled compound was obtained by a modified literature procedure [12]. In a round bottom flask, filled with 160 ml of an absolute ethanol, 6.5 g (280 mmol) of sodium was carefully added and let to stir for an hour and a half. Afterwards, the solvent was removed under reduced pressure. To the well-dried sodium ethoxide, 50 ml of ethyl acetate was added, followed by addition of a solution of ethyl nicotinate (4.26 g, 28.2 mmol) dissolved in ethyl acetate (30 mL). The resulting mixture was vigorously stirred under reflux for 16 hours. After completion of the reaction, 85 ml of water was added in the reaction mixture, and the pH of extracted aqueous layer was set to 5. The aqueous layer was extracted with diethyl ether, and the organic layer was dried over anhydrous MgSO_4 , filtrated, after which the excess of solvent was removed in vacuo. The obtained product was yellow oil, which was purified by column chromatography (hexanes:ethyl acetate = 2:1), to give 79.04 % yield of 3-oxo-3-(pyridin-3-yl)propanoate (**B**).

2.3. Synthesis of 4-(pyridin-3-yl)-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone (**Pyr**)

4-(pyridin-3-yl)-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone was synthesized according to an optimized literature method [13]. A mixture of 2.66 g (13.4 mmol) of 3-oxo-3-(pyridin-3-yl)propanoate (**B**), 1.16 g (13.4 mmol) of acetamide, 0.93 g (16.51 mmol) of KOH, and 30 ml of absolute methanol was placed in a round bottom flask, and energetically stirred under reflux for 30 hours. After the reaction was completed, the resulting mixture was filtered and the precipitate was washed with small portion of cold methanol, and recrystallized from aqueous media. The filtrate was acidified using the concentrated HCl, after which precipitate was filtered and left to dry. The obtained 4-(pyridin-3-yl)-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone (**Pyr**) was yellow-ocher in color, with yield 20%.

2.4. Synthesis of 4-(pyridin-3-yl)-5-phenyldiazenyl-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone (**A1**)

Aniline (18.6 μl , 0.2 mmol) was dissolved in 2 ml of a 1M aqueous HCl solution, and the resulting mixture was cooled to $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. To this solution, 1 ml of the previously cooled aqueous solution of NaNO_2 (13.82 mg, 0.2 mmol) was added dropwise, keeping the temperature in the $0\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ range. The resulting diazonium salt solution was stirred for 45 minutes and then subsequently added dropwise to the cooled solution of 4-(pyridin-3-yl)-6-hydroxy-3-cyano-2-pyridone (50 mg, 0.2 mmol), KOH (11.24 mg, 0.2 mmol) in 3 ml of water, keeping the temperature in the $0\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ range. Afterwards, the pH was adjusted to 10, and the resulting mixture was stirred in an ice bath for 3 hours, followed by an additional 1 hour at the room temperature. The formed precipitate was filtered, washed with cold water, and recrystallized from 96% ethanol to afford an orange powder in 32% yield. $\text{C}_{17}\text{H}_{11}\text{N}_5\text{O}_2$; $T_m = 258\text{--}264\text{ }^{\circ}\text{C}$; ATR-FTIR (ν/cm^{-1}): 3378.52, 3131.87, 2964.02, 2205.19, 1619.51, 1588.87, 1509.07, 1473.00, 1454.81, 1373.41, 1255.63, 1027.72, 899.09, 750.66; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$, δ/ppm): 10.37 (1H, s, NH, 2-pyridone), 8.55–8.54 (1H, d, $J_1 = 3.6\text{ Hz}$, 3-pyridyl), 8.47–8.46 (1H, d, $J_2 = 2\text{ Hz}$, 3-pyridyl), 7.74–7.72 (1H, d, $J = 7.6\text{ Hz}$, 3-pyridyl), 7.44–7.41 (1H, dd, $J = 4.8\text{ Hz}$, 3-pyridyl), 7.27–7.23 (2H, m, phenyl), 7.14–7.10 (3H, m, phenyl).

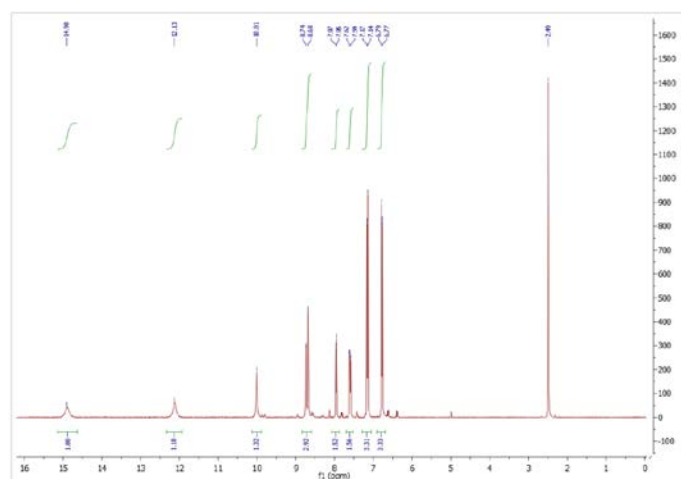


Figure 5. The representation of the ^1H NMR spectrum of **A2**

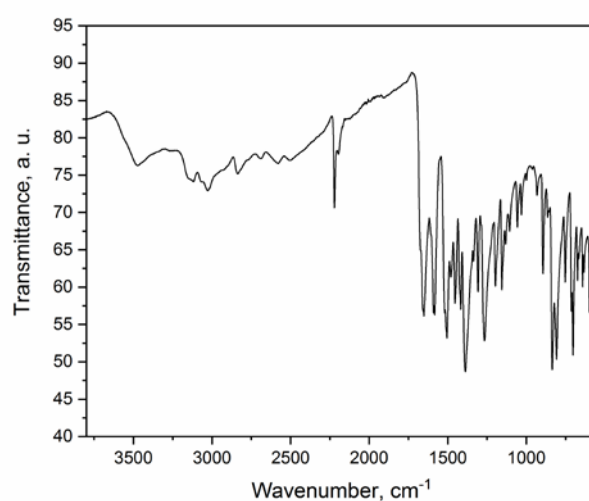


Figure 6. The representation of the ATR-FTIR spectrum of **A2**

3. Results and discussion

Due to a presence of an auxochrome (**A1** contains one while **A2** contains two hydroxyl groups) in the *ortho*-position to the azo linkage, the synthesized azo dyes theoretically exhibit azo-hydrazone tautomerism. The possible tautomeric and anionic forms of synthesized azo dyes are depicted in Figure 7. Determination of tautomers of pyridone azo dyes in both the solid state and solution phase is very important from both the theoretical and practical standpoints, since the tautomers have different physicochemical properties, and therefore optical features and dyeing abilities. Furthermore, the tautomeric equilibrium is strongly influenced by external factors, particularly the nature of the solvent, the pH of the medium, and temperature. Solvent properties such as polarity, hydrogen-bonding ability, and dielectric constant can preferentially stabilize one tautomer over another, thereby shifting the equilibrium. Similarly, the pH of the environment plays a crucial role by promoting protonation or deprotonation processes, while temperature can influence both the thermodynamics and kinetics of interconversion, all leading to changes in the tautomeric equilibrium. In addition, a formation of an intramolecular hydrogen bond could occur in both tautomers of **A1** and **A2** (Figure 7), forming a six-membered pseudo ring, which results in enhanced planarity and π -electron delocalization contributing to stability of these molecules [14–18]. Therefore, a comprehensive understanding of all factors above is essential for predicting and controlling the distribution of tautomeric species in different systems. To investigate

the relation between the electronic structure and optical properties of **A1** and **A2**, the solvatochromic analysis was performed in a set of solvents differing in nature. Furthermore, the acid-base tautomeric equilibria were investigated in three solvents of different polarity under acidic and basic conditions.

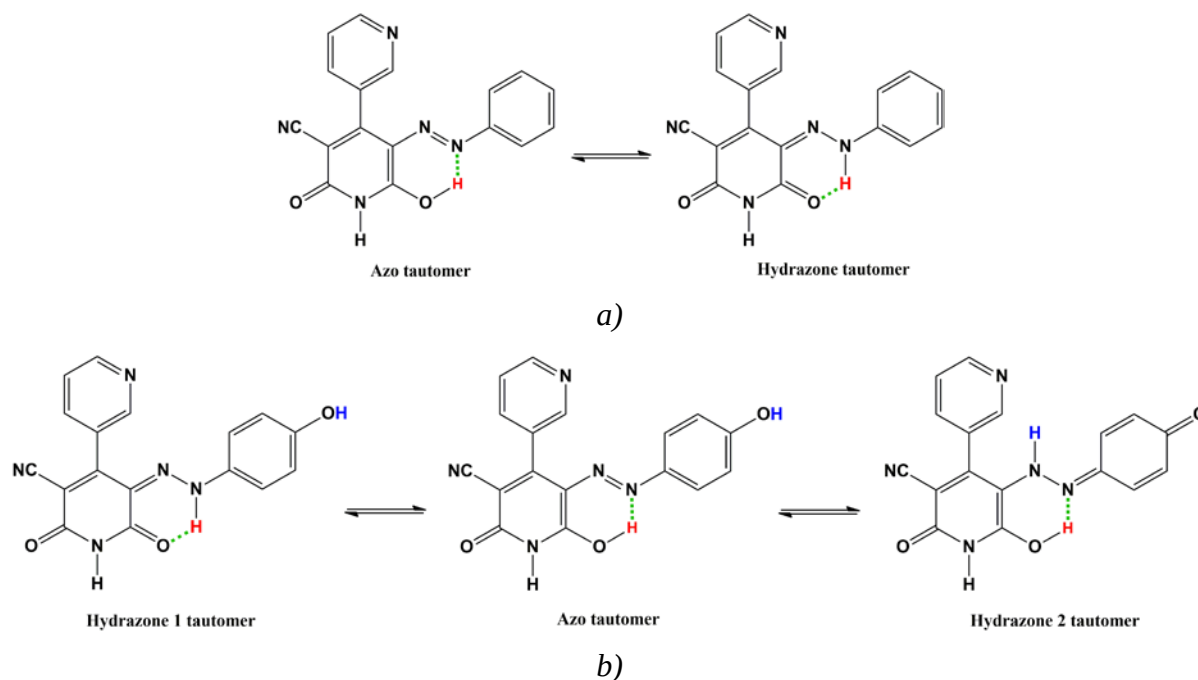


Figure 7. The presentation of azo-hydrazone tautomerism of: a) **A1** and b) **A2** azo dye

3.1. Solvatochromic analysis of **A1** and **A2** azo dyes

The absorption spectra of azo dyes were recorded at the room temperature in eight solvents of different polarity: DMSO, DMF, methanol, ethanol, acetonitrile, ethyl acetate, acetone, and chloroform (**A1**) (Figure 7). The solvatochromic analysis for **A2** dye in chloroform is excluded, due to poor solubility of this compound. The concentration of all solutions was uniform (1×10^{-4} M). The absorption maxima (λ_{max}) and molar extinction coefficient (ϵ) values of **A1** and **A2** are given in Table 1.

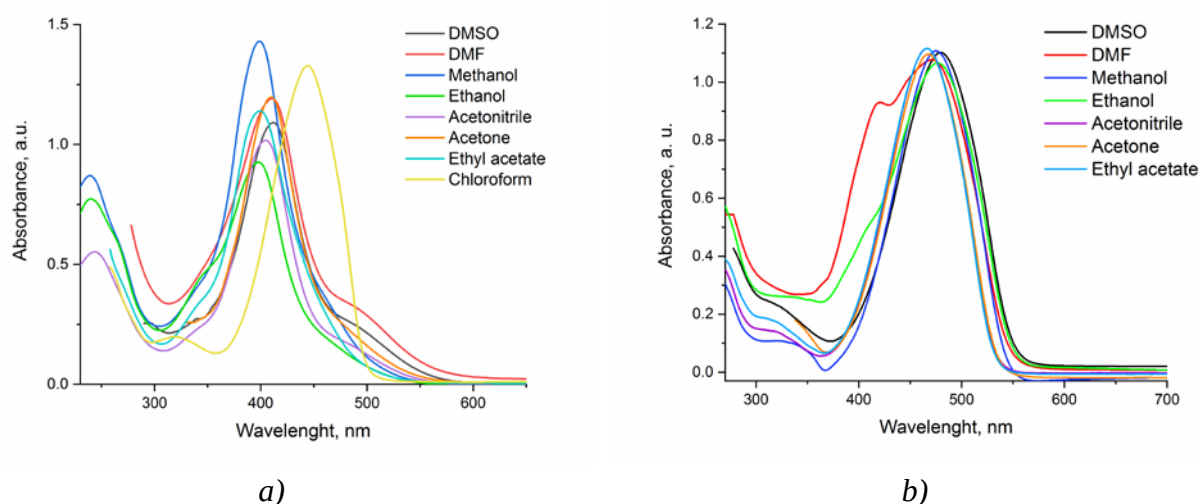


Figure 8. The representation of the UV-Vis spectra of azo dyes a) **A1** and b) **A2** in selected solvents

From Figure 8a could be noticed that **A1** exhibits a prominent solvent-dependent behavior. The absorption band in the higher energy region of the spectrum (360–290 nm), can be attributed to the weaker $\pi \rightarrow \pi^*$ transitions, associated with lone pairs on the nitrogen and carbonyl oxygen atoms. An

intensive absorption bands in approximately 340–440 nm range in all selected solvents can be assigned to an electronic transition with significant intramolecular charge transfer (ICT) character, arising from the extended conjugation between the electron-donating phenolic moiety and the electron-accepting pyridone fragment [19,20]. The highest bathochromic shift could be noticed in chloroform as a non-polar aprotic solvent (444 nm), which could imply that intermolecular solvation is weak, allowing the molecule to maintain a more planar and conjugated structure. This enhances π -electron delocalization and stabilizes the excited state, resulting in the largest bathochromic shift. This could also suggest the preferential stabilization of a less polar, hydrazone form through intramolecular hydrogen bonding (Figure 7). In addition, the induced hypsochromic shift could be observed by polar protic solvents, including methanol and ethanol (Figure 8a), likely due to intermolecular hydrogen bonding that disrupts intramolecular interactions within the dye molecules. Furthermore, the slightly hypsochromic shift of the absorption maxima could be noticed in polar aprotic solvents DMF, DMSO, acetonitrile, and ethyl acetate, which can be attributed to their strong dipolarity/polarizability and an ability to stabilize the excited state *via* specific solute-solvent interactions. Furthermore, the main absorption band of the **A1** dye exhibit a noticeable shoulder on the lower energy (higher wavelength) side in DMF, DMSO, and acetonitrile, while pronounced shoulders on the higher energy side (lower wavelength) of the absorption peak could be observed in ethyl acetate, methanol, and ethanol. These results demonstrate that all synthesized dyes could exhibit tautomeric property, and that both solvent polarity and hydrogen-bonding characteristics play a crucial role in governing the electronic structure and spectral properties of the dye. All these results, combined with the experimentally obtained ATR-FTIR and ¹H NMR data, suggest that azo dye **A1** predominantly exists in the azo tautomeric form in solution.

In contrast to **A1**, azo dye **A2** displayed a broader, but yet well-structured absorption bands in 350–560 nm region, which could correspond to the ICT electronic transition (Figure 8b). The absorption bands of lower intensity in the higher energy region of the spectrum (280–350 nm) could be ascribed to the weaker $\pi \rightarrow \pi^*$ electronic transitions [19,20]. An exception is noted in ethanol and DMF, where distinct shoulders and band-splitting appear on left side of the main absorption band, suggesting the equilibrium of multiple tautomeric and/or hydrogen-bonded species. By comparing the UV-Vis spectra and values of **A1** and **A2** dyes, it could be noticed that **A2** exhibits a larger bathochromic shifts than **A1** in the corresponding solvents, whereby the largest bathochromic shift could be noticed in DMSO (479.5 nm). This stems from the fact that the introduction of the hydroxyl group to the para-position to the azo linkage in **A2** extends the conjugation and increases electron density on the system (push-pull effect), therefore reducing the energy gap between the ground and excited states of the **A2** molecule, which in result exerts the bathochromic shift. Given that **A2** possesses two hydroxyl groups in its structure, the formation of two hydrazone tautomers is plausible (Figure 7). In both hydrazone tautomers (as well as in azo tautomer), a formation of six-membered pseudo ring could occur, *i.e.* the intramolecular hydrogen bond, which contributes to better stabilization of these molecules. The carbonyl oxygen is a stronger hydrogen-bond acceptor than nitrogen of the imino linkage due to its higher electron density and polarization, so the formed hydrogen bond $C=O \cdots H-N$ in hydrazone 1 tautomer will be stronger (more polar) than $C=N \cdots H-O$ formed in hydrazone 2 tautomer (Figure 7). This results in shifting the equilibrium to more stabilized hydrazone 1 molecule. Azo dye **A2** displayed a slight hypsochromic shifts in the rest of the selected solvents. The largest blue shift regarding the absorption maximum obtained in DMSO was observed in acetonitrile and ethyl acetate (466.5 nm). This could suggest that these solvents do not stabilize the excited state more efficiently than the ground state, which appears to be preferentially stabilized by moderate solvent polarity and/or hydrogen-bonding interactions. Azo dye **A2** showed poor solubility in chloroform,

which was expected due its greater polarity compared with compound **A1**; therefore analysis in this solvent was excluded. All these findings, along with the experimentally obtained ATR-FTIR and ^1H NMR data, could suggest that azo dye **A2** predominantly exist as hydrazone tautomer in solution.

Table 1. The absorption maxima and molar extinction coefficient values of **A1** and **A2** azo dyes

	A1		A2	
	λ_{max}	ε , $\text{dm}^3/(\text{mol}\times\text{cm})$	λ_{max}	ε , $\text{dm}^3/(\text{mol}\times\text{cm})$
DMSO	412	2727.5	479.5	2755
DMF	410.5	2977.5	471	2692.5
Methanol	398.5	3575	475	2770
Ethanol	398	2315	476.5	2665
Acetonitrile	404.5	2542.5	466.5	2790
Ethyl acetate	399.5	2850	466.5	2790
Acetone	410	2992.5	468	2740
Chloroform	444	3322.5	Excluded	

3.2. The investigation of acid-base equilibrium of **A1** and **A2** azo dyes

To further investigate the nature, and the occurrence of specific tautomeric and anionic forms, the synthesized compounds were dissolved in an acidic (HCl) and a basic medium (KOH and TEA) in three solvents, namely: methanol, chloroform, and DMF. The acid-base analysis of **A2** dye was not performed in chloroform due to its poor solubility. Triethylamine was added in DMF and chloroform solutions as an alternative to KOH, due to the poor solubility of KOH in these media.

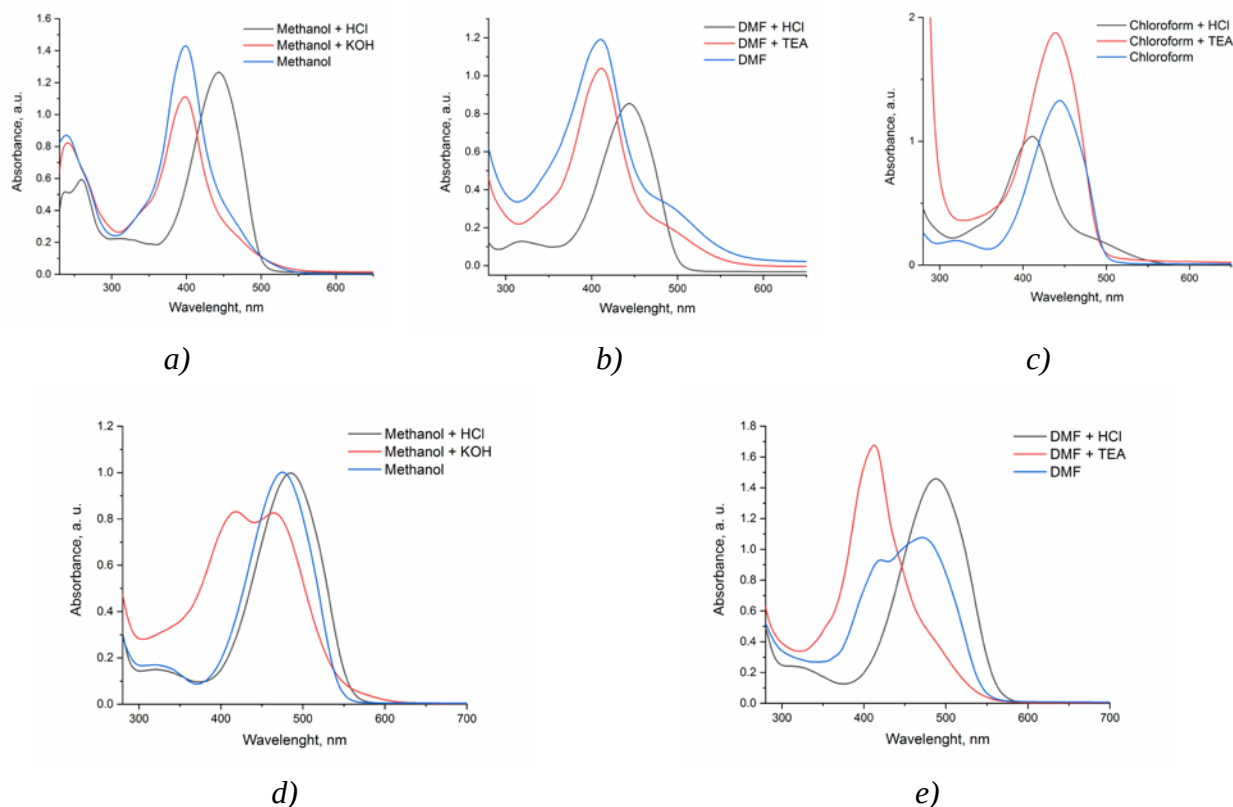


Figure 9. Presentation of the UV-Vis spectra of synthesized azo dyes in selected solvents in an acidic and a basic media of **A1** (a, b, and c) and **A2** (d and e)

From Figure 9 could be noticed that upon adding KOH and TEA in DMF and methanol solutions of **A1** no substantial change in the absorption maxima occurred. A negligible hypsochromic shift accompanied by a slight alteration of an absorbance band from the left side of the absorption maximum could be observed in chloroform. The absence of prominent spectral changes upon addition of mentioned bases suggests that the **A1** is likely present in azo (deprotonated) form under these conditions (Figure 10). In contrast, the addition of HCl in DMF and methanol solutions induced the significant bathochromic shift, while in chloroform the hypsochromic shift occurred. The significant red shift in DMF and methanol upon acid addition suggests that the protonated form (hydrazone tautomer) of **A1** is more dominant in these media. On the other hand, the blue shift in chloroform might indicate the reduced stabilization of the protonated species in a nonpolar environment, *i.e.* the presence of sole azo tautomer. As for **A2**, the addition of HCl into DMF solution induced a bathochromic shift of the absorption band, suggesting stabilization and predominance of the hydrazone tautomer. In contrast, the addition of TEA caused a hypsochromic shift, indicating a displacement of the tautomeric equilibrium toward the azo form. In methanol solution of **A2**, the addition of HCl resulted in the equilibrium of these tautomeric forms, while the addition of KOH slightly red-shifted the absorption maximum, implying predominance of the hydrazone form in both neutral and acidic media (Figure 10).

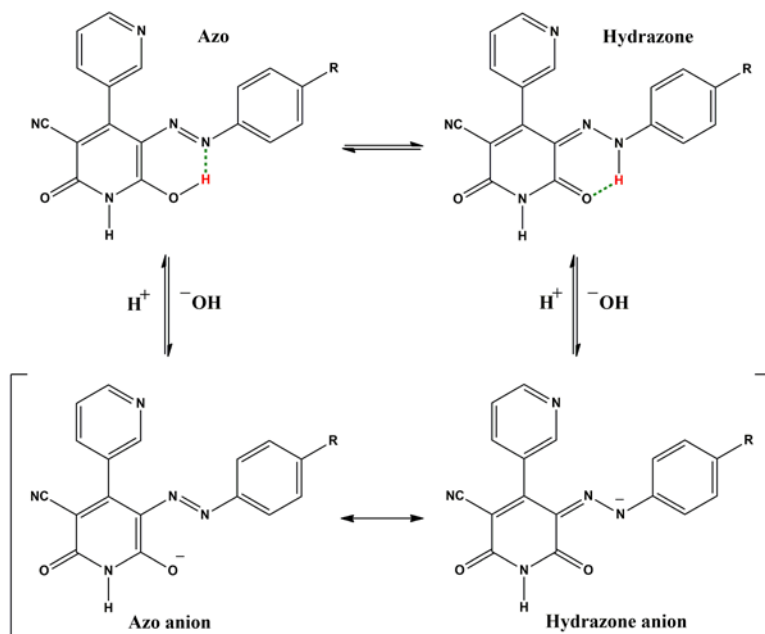


Figure 10. The representation of possible anionic forms of hydrazone 1 tautomer of synthesized azo dyes (the similar scheme could be depicted for hydrazone 2 tautomer); *R*: H (**A1**), OH (**A2**)

4. Conclusion

In this paper, the synthesis, characterization and solvatochromic analysis of two novel azo dyes, designated as **A1** and **A2**, were performed. Solvatochromic investigations demonstrated that the electronic structure and tautomeric equilibria of the synthesized pyridone-based azo dyes are strongly influenced by solvent polarity and hydrogen-bonding ability. Both **A1** and **A2** exhibited pronounced intramolecular charge-transfer absorption bands. **A1** showed more pronounced solute-solvent interactions, indicating the predominance of the azo tautomer in all solvents except in chloroform, whereas the solvatochromic behavior of **A2** suggested the predominance of the hydrazone form in all solvents, except DMF. The observed spectral shifts further indicated that intramolecular hydrogen bonding and the formation of six-membered pseudo rings substantially contribute to the stabilization of the dye

molecules. The experimentally obtained ATR-FTIR and ^1H NMR data supports the solvatochromic analysis, suggesting that **A1** predominantly exists in the azo tautomeric form, while **A2** preferentially adopts the hydrazone tautomeric form due to the additional hydroxyl substituent and enhanced push-pull conjugation. Acid-base studies additionally revealed that protonation favors the hydrazone form, whereas basic conditions shift the equilibrium toward the azo form, depending on the solvent environment. These findings provide valuable insight into the structure-property relationships of pyridone azo dyes and may contribute to the rational design of azo-based chromophores with tunable optical properties.

5. Abbreviations

ATR-FTIR	– Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared (spectroscopy)
DMF	– Dimethylformamide
ICT	– Intramolecular Charge Transfer
^1H NMR	– Proton Nuclear Magnetic Resonance
TEA	– Triethylamine
UV-Vis	– Ultraviolet-Visible (spectroscopy)
λ_{max}	– Absorbance maximum
ε	– Molar extinction coefficient

6. Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-33/2026-03/200287, 451-03-34/2026-03/200135 and 451-03-33/2026-03/200026).

7. References

- [1] **Patil, P. S., N. Sekar**, Photostable thiophene-based heterocyclic azo dyes: Synthesis, characterization, photophysical analysis, dyeing study, fastness, UPF, thermal stability, and antibacterial activity, *Journal of Molecular Liquids*, 423 (2025), 126997.
- [2] **Salaman, M., Abdul J., Salma F., Idrees B., Muhammad S. K. R.**, New heterocyclic azo-disperse dyes; their synthesis, characterization, application, photo physical properties and solvatochromic studies, *Journal of Molecular Structure*, 1287 (2023), 135664.
- [3] **Alsantali, R. I., Q. A. Raja, A. Y.A. Alzahrani, A. Sadiq, N. Naeem, E. U. Mughal, M. M. Al-Rooqi, N. El Guesmi, Z. Moussa, S. A. Ahmed**, Miscellaneous azo dyes: a comprehensive review on recent advancements in biological and industrial applications, *Dyes and Pigments*, 199 (2022), 110050.
- [4] **Maliyappa, M.R., J. Keshavayya, M.S. Sudhanva, I. Pushpavathi, V. Kumar**, Heterocyclic azo dyes derived from 2-(6-chloro-1,3-benzothiazol-2-yl)-5-methyl-2,4-dihydro-3H-pyrazol-3-one having benzothiazole skeleton: Synthesis, structural, computational and biological studies, *Journal of Molecular Structure*, 1247, (2022), 131321.
- [5] **Karci, F., F. Karci, A. Demirçali, M. Yamaç**, Synthesis, solvatochromic properties and antimicrobial activities of some novel pyridone-based disperse disazo dyes, *Journal of Molecular Liquids*, 187 (2013), pp. 302-308.
- [6] **Belowar, S., A. Jalil**, Recent advancements in the chemistry of 1,3,4-Thiadiazole ring-containing azo dyes, *Next Materials*, 11 (2026), 101794.

- [7] **Tadić, J., J. Ladarević, Ž. Vitnik, V. Vitnik, T. Stanojković, I. Matić, D. Mijin**, Novel azo pyridone dyes based on dihydropyrimidinone skeleton: Synthesis, DFT study and anticancer activity, *Dyes and Pigments*, 187 (2021), 109123.
- [8] **Ghanavatkar, C. W., V. Mishra, N. Sekar**, Benzothiazole-pyridone and benzothiazole-pyrazole clubbed emissive azo dyes and dyeing application on polyester fabric: UPF, biological, photophysical and fastness properties with correlative computational assessments, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 230 (2020), 5, 118064.
- [9] **Mašulović, A., J. Ladarević, J. Lović, V. Vitnik, Ž. Vitnik, M. Avramov Ivić, D. Mijin**, Comparative experimental and DFT study of the electrochemical oxidation of azo pyridone dyes, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 983 (2025), 119043.
- [10] **Sorokin, S. P., M Y. Ievlev, O V. Ershov**, 2-Pyridone-based stilbazoles containing cyano and trifluoromethyl acceptors: Synthesis and fluorescence properties in solutions and in solid state, *Dyes and Pigments*, 219 (2023), 111581.
- [11] **Clarke, K., K. Rothwell**, A Kinetic Study of the Effect of Substituents on the Rate of Formation of Alkylpyridinium Halides in Nitromethane Solution, *Journal of the Chemical Society*, 1960, pp. 1885–1895.
- [12] **Brown, B. B., K. S. Rehder**, Prenylation Inhibitors and Methods of Their Synthesis and Use, WO 2004/016592, PCT/US2003/024985, 2003.
- [13] **Hurtado-Rodríguez, D., A. Salinas-Torres, H. Rojas, D. Becerra, J.-C. Castillo**, Bioactive 2-pyridone-containing heterocycle syntheses using multicomponent reactions, *Royal Society of Chemistry Advances*, 12 (2022), pp. 35158–35176
- [14] **Dračínský, M., L. Čechova, P. Hodgkinson, Prochazkova, Z. Janeba**, Resonance-assisted stabilisation of hydrogen bonds probed by NMR spectroscopy and path integral molecular dynamics, *Chemical Communications*, 51 (2015), 13986.
- [15] **Yaman, M., E. Özsoy, M. Yahya, H. Tezcan**, Spectroscopic determination of the acidity constants and the effects of pH, temperature and solvents on the tautomerism of 1-substituted phenyl-3,5-diphenylformazans, *Chemical Physics*, 573 (2023), 111979.
- [16] **Kaştaş G., Ç. A. Kaştaş, A. Tabak**, Investigation of molecular structure and solvent/temperature effect on tautomerism in (E)-4,6-dibromo-3-methoxy-2-[(p-tolylimino)methyl]phenol, a new thermochromic Schiff base, by using XRD, FT-IR, UV-vis, NMR and DFT methods, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 222 (2019), 117198.
- [17] **Ghanadzadeh G. A., M. Moghadam, M.S. Zakerhamidi, E. Moradi**, Solvatochromism, tautomerism and dichroism of some azoquinoline dyes in liquids and liquid crystals, *Dyes and Pigments*, 92 (2012), 3, pp. 1320–1330.
- [18] **Ozen, A. S., P. Doruker, V. Aviyente**, Effect of cooperative hydrogen bonding in azo-hydrazone tautomerism of azo dyes, *Journal of Physical Chemistry A*, 111 (2007), 51, pp. 13506–14.
- [19] **De Melo, C. E. A., Celso R. N., Leandro G. N., Felipe S. S. S., Robson da S. O., Giovanni F. C., Vanderlei G. M.**, Solvatochromism of new substituted 4-[(E)-(4-nitrophenyl)diazenyl] phenolate dyes, *Journal of Molecular Liquids*, 301 (2020), 112330.
- [20] **Ladarević, J., Bojan B., Luka M., Biljana B. N., Dušan Mijin**, Role of the bifurcated intramolecular hydrogen bond on the physicochemical profile of the novel azo pyridone dyes, *Dyes and Pigments*, 162 (2019), pp. 562–572.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.111>

Ključne reči:

azo boje; UV-Vis spektroskopija;
solvatohromizam; tautomerija;
kiselo-bazna ravnoteža

Key words:

azo dyes; UV-Vis spectroscopy;
solvatochromism; tautomerism;
acid-base equilibrium

SINTEZA, KARAKTERIZACIJA I TAUTOMERIJA NOVE AZO BOJE NA BAZI OROTIČNE KISELINE

THE SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND SOLVATOCHROMIC PROPERTIES OF NOVEL AZO DYE BEARING OROTIC ACID CORE

Luka MATOVIĆ*

*lmatovic@tmf.bg.ac.rs

Vojkan STAMENKOVIĆ

Jelena LAĐAREVIĆ

Nemanja TRIŠOVIĆ

Anita LAZIĆ

Aleksandra MAŠULOVIĆ

Dušan MIJIN

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0003-4945-7776

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-5554-7295

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-9231-4810

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0003-4855-3782

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0002-5279-7694

Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0001-5691-2971

Sinteza azo boja koje u svojoj strukturi sadrže heterociklična jedinjenja postala je predmet sve većeg interesovanja poslednjih godina, prvenstveno zbog širokog spektra bioloških i farmakoloških aktivnosti ovih jedinjenja. Pored ovoga, heterociklične azo boje nalaze primenu kao fluorescentni materijali, nelinearni optički (NLO) materijali drugog reda, kao i komponente tečnih kristala. Takođe, uvođenje heterocikličnih jedinjenja u molekule azo boja omogućava modifikaciju njihovih elektronskih i optičkih svojstava, čime se povećava intenzitet boje i poboljšava efikasnost bojenja. Značajnu podklasu heterocikličnih jedinjenja predstavljaju derivati pirimidina koji ispoljavaju raznovrsna fiziološka i biološka svojstva. Orotična kiselina (vitamin B13) ima ključnu ulogu u biosintezi pirimidina i često se uključuje u formulacijama dijetetskih suplemenata i multivitamina. Orotična kiselina takođe nalazi primenu u raznim jonoizmenjivačkim procesima, očuvanju hrane, a koristi se i kao biokatalizator u medicini. U ovom radu prikazana je sinteza i detaljna karakterizacija nove azo boje dobijene iz 5-aminoorotične kiseline. Ova azo boja je sintetizovana konvencionalnim reakcijama diazotovanja i diazo-kuplovanja, a okarakterisana je temperaturom topljenja, ATR-FTIR i ¹H NMR spektroskopijom. Da bi se ispitala veza između molekulske strukture i optičkog svojstva sintetizovanog jedinjenja, sprovedena je solvatohromna analiza u setu rastvarača različite polarnosti. Pored toga, UV-Vis spektroskopijom je ispitana zavisnost tautomerne ravnoteže od pH vrednosti rastvarača (kiselo-bazna ravnoteža).

The synthesis of heterocycle-containing azo dyes and their derivatives has attracted increasing attention in recent years, primarily due to their diverse biological and pharmacological activities, in addition to their applications as fluorescent materials, second-order nonlinear optical (NLO) materials, components of liquid crystals, etc. Also, heterocyclic moieties are incorporated into azo dye chromophores to modulate their electronic and optical characteristics, thereby enhancing color intensity and overall dyeing performance. Pyrimidine derivatives represent an important subclass of

these compounds, exhibiting diverse physiological and biological effects, among which orotic acid (vitamin B13), a uracil-derived compound, plays an essential role in pyrimidine biosynthesis and is widely incorporated into dietary supplements and multivitamin preparations. Besides, applications of orotic acid also expand to ion-exchange processes, food preservation, and as a biocatalyst in medical applications. In this paper, the synthesis and thorough characterization of a novel azo dye derived from 5-aminoorotic acid was presented. This azo dye was synthesized through conventional synthetic methods via diazotation and subsequent diazo-coupling reactions, and it is characterized by melting point, ATR-FTIR, and ¹H NMR spectroscopy. To investigate the relationship between molecular structure and optical behavior, the solvatochromic analysis was conducted in a set of solvents differing in polarity. Likewise, the UV-Vis spectroscopy was performed to assess the dependence of tautomeric equilibrium on the pH of the solvent (acid-base equilibrium).

1. Introduction

In recent years, the incorporation of heterocyclic moieties into the azo dye structure has become a prominent strategy in the design of high-performance disperse dyes, owing to their enhanced chemical and thermal stability, but also improved dyeing performance when compared with their carbocyclic derivatives including improved depth of shade, greater color intensity, enhanced brightness, and superior fastness [1–4]. In addition, azo dyes obtained from nitrogen-containing heterocyclic scaffolds are extensively utilized in various industrial applications such as second-order non-linear optics (NLO), liquid crystal components, as fluorescence materials, in diverse electrochemical processes, etc. [5,6]. Furthermore, these compounds have been documented to exhibit diverse pharmacological and biological activities, including antimicrobial, anti-inflammatory, antimalarial, antioxidant, anti-tumor, anticancer, antifungal, antiviral, anticonvulsant, antidiabetic, antitubercular, analgesic properties, and chemosensing activities [7–9]. Among these compounds, pyrimidine derivatives constitute a significant subclass, exhibiting diverse physiological and biological activities. The integration of a pyrimidine scaffold, conjugated with an azo linkage offers a versatile approach to the design of novel chromophores with modulatable optical and photophysical properties. Pyrimidine-based azo dyes have already demonstrated a range of promising applications, including dye-sensitized solar cells (DSSC), organic photovoltaics, and organic light-emitting diodes. Moreover, the pyrimidine unit can influence interactions with electrophilic substrates and facilitate targeted binding, sensing, and recognition in biological systems. Orotic acid (6-carboxyuracil), commonly referred to as vitamin B13, is a crucial intermediate in pyrimidine biosynthesis. Besides its broad use in multivitamin and dietary supplement products, this molecule has found applications in the vast pharmaceutical and biological domains [10–14]. In this paper a novel azo dye molecule derived from 5-aminoorotic acid, namely 5-((2-hydroxynaphthalen-1-yl)diazenyl)-2,6-dioxo-1,2,3,6-tetrahydropyrimidine-4-carboxylic acid (Figure 1) was synthesized and thoroughly characterized *via* melting point, elemental analysis, ATR-FTIR, and ¹H NMR spectroscopy. The UV-Vis spectrometry was utilized to study the solvatochromatic property in eight solvents differ in polarity, namely ethanol, methanol, dimethyl sulfoxide (DMSO), dimethylformamide (DMF), ethyl acetate, acetonitrile, acetone, and chloroform. Furthermore, the acid–base tautomeric equilibrium was investigated in acidic media using hydrochloric acid (HCl) and in basic media using potassium hydroxide (KOH) and triethylamine (TEA) in three solvents: methanol, chloroform, and DMF.

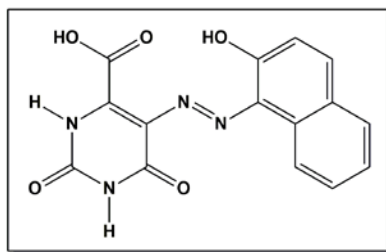


Figure 1. The structure of synthesized azo dye derived from orotic acid (**OrAD**)

2. Experimental

All chemicals used in this study were of reagent grade, purchased from Aldrich, Merck, Fisher Chemical, Fluka, and Baker, and used without further purification. The titled compound was synthesized by conventional diazotation and diazo-coupling reaction (Figure 2). In the first step, the diazotation of 5-aminoorotic acid afforded corresponding diazonium salt (**A**), which was subsequently coupled with 2-hydroxynaphthalen (**B**), yielding 5-((2-hydroxynaphthalen-1-yl)diazenyl)-2,6-dioxo-1,2,3,6-tetrahydropyrimidine-4-carboxylic acid, designated as **OrAD** (Figure 1). The synthesized azo dye was characterized by melting point, elemental analysis, ATR-FTIR, and ^1H NMR spectroscopy. The melting points were taken using *Stuart SMP30* apparatus. The elemental analysis was performed using *Vario EL III* elemental analyzer. The ATR-FTIR spectra were recorded using *Thermo Scientific Nicolet iS10* spectrophotometer, in $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ domain. The ^1H NMR spectra of dyes were obtained by *Bruker Ascend 400* spectrometer in deuterated chloroform (CDCl_3), whereby the chemical shifts are displayed in ppm units, regarding tetramethylsilane (TMS) as an internal standard. The UV-Vis spectra were collected by *UV-Vis 1700 Shimadzu* spectrophotometer, at the room temperature, in $280\text{--}700\text{ nm}$ range.

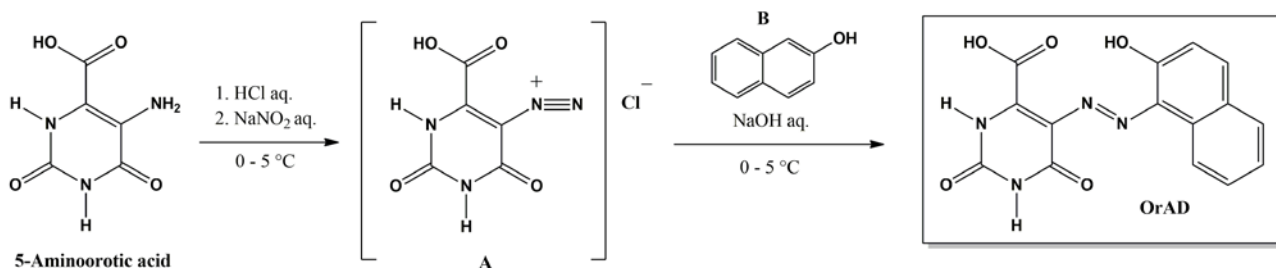


Figure 2. Schematic presentation of **OrAD** synthesis

2.1. Synthesis of 5-((2-hydroxynaphthalen-1-yl)diazenyl)-2,6-dioxo-1,2,3,6-tetrahydropyrimidine-4-carboxylic acid

5-Aminoorotic acid (0.428 g, 2.5 mmol) was suspended in 100 mL of approximately 1 M aqueous HCl. Due to its poor solubility, 3 mL of acetonitrile was added to obtain a clear solution, after which the mixture was cooled to subzero temperature. To this solution, 1 mL of the previously cooled aqueous solution of NaNO_2 (0.21 g, 3 mmol) was added dropwise, keeping the temperature in the $0\text{--}5\text{ }^\circ\text{C}$ range. The resulting diazonium salt solution was stirred for 45 minutes and then subsequently added dropwise to the cooled solution of 2-naphthol (0.36 g, 2.5 mmol), NaOH (0.2 g, 5 mmol) in 5 mL of water, keeping the temperature in the range of $0\text{--}5\text{ }^\circ\text{C}$. Afterwards, the pH was adjusted to 9, using 10% aqueous solution of NaOH and the resulting mixture was stirred in an ice bath for 3 hours, followed by an additional 1 hour at the room temperature. The formed precipitate was filtered, rinsed with cold water, and recrystallized from 96% ethanol to afford dark red powder in 40% yield. $\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}_5$; $T_m = 281\text{--}283\text{ }^\circ\text{C}$; ATR-FTIR (ν/cm^{-1}): 3186.22, 3062, 65, 1711.57, 1647.35, 1620.80,

1588.90, 1558.77, 1526.88, 1429.74, 1402.87, 1213.62, 1068.06, 1034.69, 969.14, 835.39; ^1H NMR (400 MHz, $\text{DMSO}-d_6$, δ/ppm): 15.20 (1H, s, NH hydrazone), 14.03 (1H, s, COOH), 10.17 (1H, s, NH, uracil), 10.09 (1H, s, NH, uracil), 7.64–7.52 (6H, m, 2-naphthol).

3. Results and discussion

The synthesized orotic acid-based azo dye (**OrAD**) can theoretically exhibit multiple tautomeric equilibria that significantly influence its structural and spectroscopic behavior. In particular, two distinct types of tautomeric equilibria may be occurring within this molecule: azo-hydrazone (Figure 3) and lactam-lactim equilibria (Figure 4). The azo-hydrazone tautomerism involves the reversible proton transfer between the azo nitrogen and an adjacent heteroatom, resulting in an inter-conversion between the $-\text{N}=\text{N}-$ (azo) form and the $-\text{NH}-\text{N}=-$ (hydrazone) form, often stabilized by intramolecular hydrogen bonding and conjugation with the coupling unit. In parallel, the lactam-lactim tautomerism of orotic acid moiety arises from proton transfer between the nitrogen atom and the carbonyl oxygen within the pyrimidine ring, yielding equilibrium between the energetically favored lactam (keto) structure and the less stable lactim (enol) form. There is also a possible existence of dilactim (di-enol) structure, but this tautomer is energetically and thermodynamically unfavorable because the amide carbonyl system in lactam tautomer is strongly stabilized by the resonance where a lone pair of electrons on a nitrogen atom delocalizes into the antibonding orbital of an adjacent carbonyl group ($n(\text{N}) \rightarrow \pi^*(\text{C}=\text{O})$), giving a highly favorable electronic structure. Although the enolic forms may benefit from altered conjugation patterns and possible intramolecular hydrogen bonding (Figure 4), these effects are insufficient to compensate for the loss of amide resonance stabilization, rendering the lactam tautomer thermodynamically preferred. The relative stability, and therefore the tautomeric equilibria of azo-hydrazone and lactam-lactim tautomers, depends strongly on the solvent environment *i.e.* solvent-solute interactions, hydrogen-bonding capability, and electronic substituent effects, with polar and protic media generally favoring the hydrazone and lactim forms due to enhanced stabilization via hydrogen bonding. The coexistence and interplay of these tautomeric forms contribute to the complexity of the electronic structure, often manifested in broadened absorption bands and solvent-dependent spectral shifts.

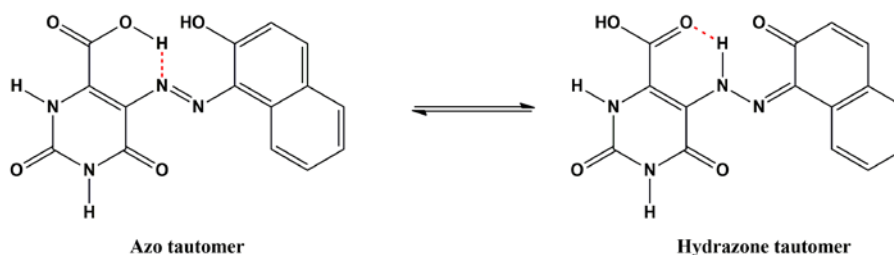


Figure 3. The presentation of azo-hydrazone tautomerism in **OrAD**

According to the experimentally obtained ATR-FTIR data for **OrAD**, two distinct absorption bands at 1647 and 1620 cm^{-1} could be assigned to carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) stretching vibrations. This feature is characteristic of the diketo (lactam) tautomer of the neutral orotic acid moiety (in pure solvent and in solid state), indicating that lactim form is negligible under the examined conditions (room temperature) [15,16]. In addition, the broad band observed in 3000–3500 cm^{-1} region, coupled with intense absorption bands at 1525.71 and 1588.66 cm^{-1} could suggest the $\text{N}-\text{H}$ and $\text{C}=\text{N}/\text{C}-\text{N}$ coupled vibrations of the hydrazone tautomer, respectively, and therefore its dominance in solid form. These spectroscopic data are consistent with literature reports, where hydrazone tautomers of azo dyes bearing adjacent carbonyl groups are stabilized via intramolecular hydrogen bonding [17,18]. However, due

to the inherent overlap of vibrational modes in conjugated azo-hydrazone systems, further spectroscopic studies are required to confirm the tautomeric distribution.

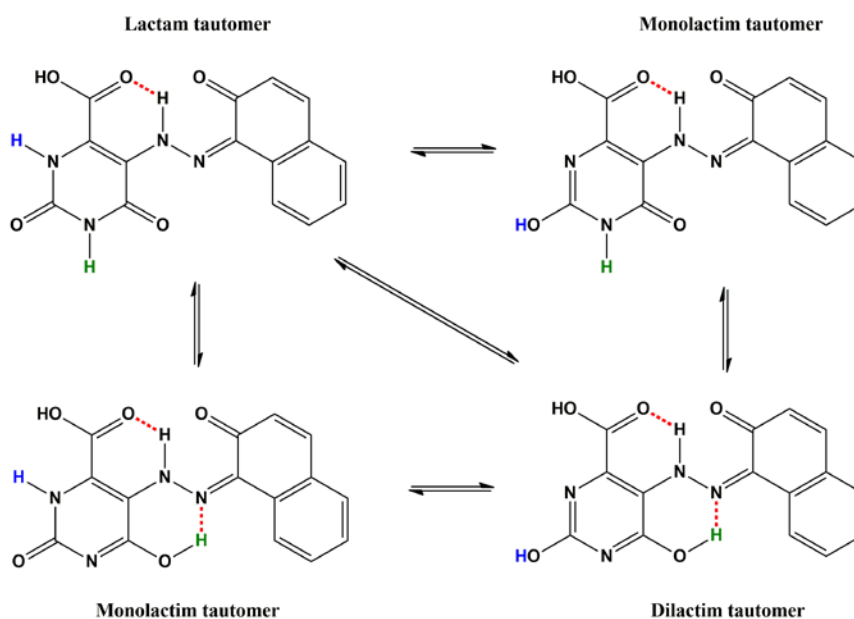


Figure 4. The presentation of lactam-lactim tautomerism in **OrAD** (the equilibrium is depicted for the lactam hydrazone tautomer; the similar scheme could be displayed for the lactam azo tautomer)

3.1. The solvatochromic analysis of **OrAD**

The absorption spectra of **OrAD** were recorded at the room temperature in eight solvents of varying polarity and hydrogen-bonding ability, including DMSO, DMF, methanol, ethanol, acetonitrile, ethyl acetate, acetone, and chloroform (Figure 5). The concentration of all solutions was uniform (1×10^{-4} M). The absorption maxima (λ_{max}) and molar extinction coefficient (ϵ) values are given in Table 1.

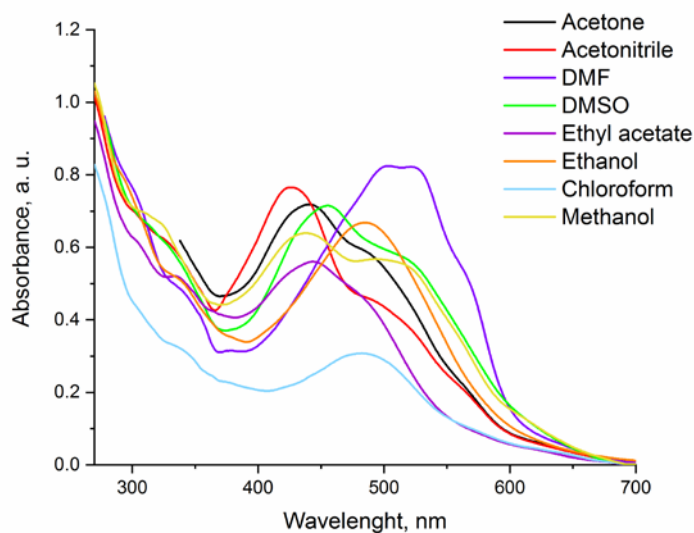


Figure 5. Presentation of the UV-Vis spectra of **OrAD** molecule in selected solvents

The UV-Vis absorption spectra of the **OrAD** dye exhibits several overlapping electronic transitions with pronounced solvatochromic behavior (Figure 5). The high-energy band in the UV region

(approx. 250–350 nm) is attributed to localized $\pi \rightarrow \pi^*$ transitions within the aromatic framework of the 2-naphthol and orotic acid moieties, which remain relatively insensitive to solvent effects due to their predominantly localized character. A broad and intense absorption band (approx. 350–600 nm) might constitute two electronic transitions, namely $n \rightarrow \pi^*$ transitions involving the lone pairs of the azo nitrogen and carbonyl functionalities of the orotic acid, and an intramolecular charge-transfer transition (ICT) between electron-donating (2-naphtholic) and electron-accepting (orotic acid) fragments (push-pull structure). The position and intensity of these bands vary significantly with solvent polarity and hydrogen-bonding ability, indicating strong stabilization of the charge-separated excited state in polar protic and aprotic media. This behavior is further influenced by tautomeric equilibria (azo-hydrazone and lactam-lactim) and possible intramolecular hydrogen bonding, which modulate the extent of π -conjugation and, consequently, the ICT character of the dye (Figure 4). Overall, the observed spectral features confirm a highly conjugated push-pull system with pronounced solvent-dependent electronic delocalization.

*Table 1. The representation of absorption maxima ($\lambda_{\max}$) and molar extinction coefficient (ϵ) values of **OrAD** azo dye*

	$\lambda_{\max}$	ϵ , dm ³ /(mol×cm)
DMSO	455.5	1847.5
DMF	503.5	2135
	521.5	2130
Methanol	438	1887.5
	493	1710
Ethanol	485	1720
Acetonitrile	426	2127.5
Acetone	441	1920
Ethyl acetate	443	1490
Chloroform	482.5	955

The UV-Vis absorption spectra of the investigated azo dye exhibit a pronounced solvatochromic response across the studied solvent series, indicating a strong sensitivity of the electronic transition to the surrounding medium (Figure 5). The highest value of absorption maxima is observed in DMF (503.5 and 521.5 nm), suggesting the strongest stabilization of the excited state in this solvent. This behavior is consistent with an electronic transition featuring significant intramolecular charge-transfer (ICT) character, where the excited state is more polar than the ground state and is therefore preferentially stabilized by polar aprotic solvation, likely through dipolar interactions rather than hydrogen-bond donation. The notable hypsochromic shift could be observed in DMSO (455.5 nm). Despite the high polarity index, this might indicate that the solvatochromic property of **OrAD** in this solvent is primarily governed by solute-solvent interactions rather than sole dielectric effects. Protic polar solvents such as methanol and ethanol induce slight hypsochromic shifts, with methanol exhibiting two absorption bands at 438 and 493 nm and ethanol showing a maximum at 485 nm. Chloroform also displays a slight blue-shifted absorption at 482.5 nm despite its low polarity, implying specific solute-solvent interactions beyond simple dipolar stabilization. In contrast, acetonitrile, acetone, and ethyl acetate exhibit prominent hypsochromic shift of the absorption maxima at 426,

441, and 443 nm, respectively, indicating a limited ability to stabilize the charge-transfer excited state. Although acetonitrile and acetone are classified as polar aprotic solvents, their interactions with the **OrAD** might be predominantly governed by nonspecific dipolar effects, as both lack hydrogen-bond donor capability and display weaker donor-acceptor interactions compared to DMF and DMSO. Ethyl acetate further reduces the extent of excited-state stabilization. In addition to the pronounced dual-band feature observed in DMF and methanol, it could be noticed that the absorption bands also exhibit distinct shoulders on the higher-wavelength side of the ICT absorption band. This spectral behavior is evident in all investigated solvents except ethanol and chloroform, suggesting the presence of a more complex ground- and/or excited-state equilibrium in these media. Furthermore, the observed band broadening and partial spectral splitting is indicative to the possible coexistence of different tautomeric forms in solutions (Figures 3 and 4). The identification of tautomers in both the solid state and in solution is of considerable importance from both theoretical and practical perspectives, as different tautomers exhibit distinct physicochemical properties and, consequently, optical characteristics.

3.2. The acid-base equilibrium analysis of **OrAD**

The tautomeric equilibrium of the **OrAD** is strongly influenced by the acidity and basicity of the medium, owing to the presence of multiple protonation sites and the possibility of azo-hydrazone as well as lactam-lactim interconversion (Figures 3 and 4). Under acidic conditions, protonation of the azo nitrogen is favored, which stabilizes the hydrazone-type tautomer through enhanced charge delocalization across the azo linkage and adjacent heterocyclic framework. Furthermore, the formation of pseudo six-membered ring could occur, which contributes to the stability of this tautomer *via* formation of intramolecular hydrogen bond (Figure 3). The intramolecular hydrogen bonding competes between the carbonyl oxygen of the carboxylic group and that of the 2-naphthol moiety. However, the carboxylic carbonyl oxygen is expected to dominate as the hydrogen-bond acceptor due to its stronger δ^- character, higher localized electron density, and reduced π -delocalization compared to the more conjugated naphthalene carbonyl site. In contrast, basic environments promote deprotonation of the phenolic OH group of the 2-naphthol moiety and potentially the lactam NH groups of the orotic acid fragment, facilitating the formation of anionic species and favoring the azo form with extended π -conjugation. These deprotonation processes increase electron density within the molecule and alters the intramolecular hydrogen-bonding feature, thereby shifting the tautomeric equilibrium. There is formation of a six-membered pseudo ring in the azo tautomer as well, but it is more favorable in hydrazone tautomer, due to the greater polarity of the $\text{HO}-\text{C}=\text{O}\cdots\text{H}-\text{N}$ interaction and the superior hydrogen-bond accepting ability of the carbonyl oxygen compared to the hydroxyl oxygen ($\text{O}=\text{C}-\text{OH}$) and nitrogen in azo tautomer (Figure 3). It is important to emphasize that this represents only a small fraction of the possible hydrogen-bonding interactions that may be established within this molecule. Owing to the presence of multiple donor and acceptor sites, including heteroatoms of the pyrimidine core as well as peripheral functional groups, a diverse and complex network of intra- and intermolecular hydrogen-bonding motifs can be formed, including formation of bifurcated intramolecular hydrogen bonds within lactim tautomers (Figure 4). Consequently, the distribution of potential tautomers of **OrAD** is governed by a delicate interplay between protonation-deprotonation processes and resonance stabilization.

To get insight of the nature, and the occurrence of specific tautomeric forms, the synthesized compound was dissolved in an acidic (HCl) and a basic medium (KOH, TEA) in three solvents, namely: methanol, chloroform, and DMF. Triethylamine was added in DMF and chloroform solutions as an alternative to KOH, due to the poor solubility of KOH in these media.

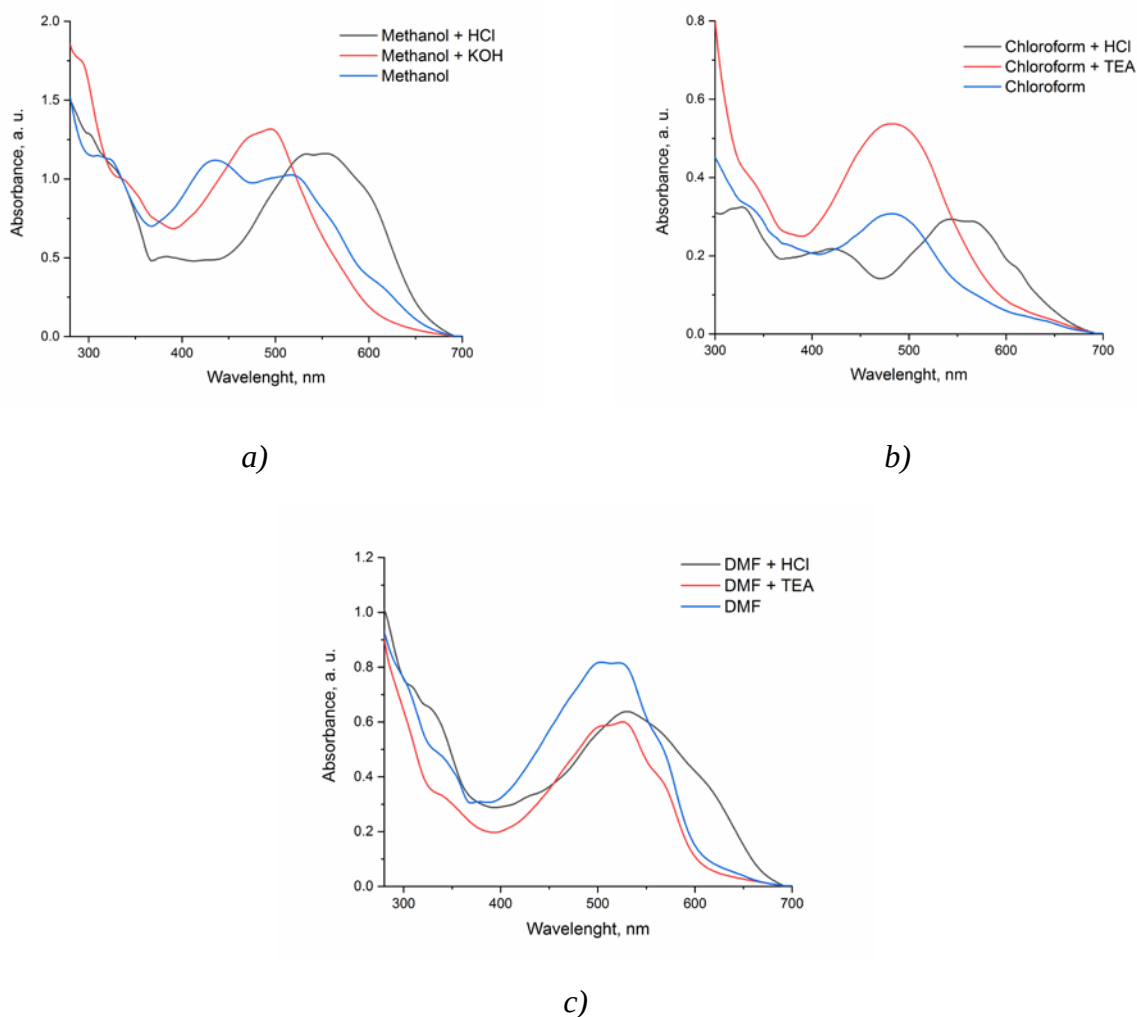


Figure 6. Presentation of the UV-Vis spectra of **OrAD** dye in selected solvents in an acidic and a basic media

From Figure 6 could be noticed that upon adding TEA in DMF and chloroform solutions of **OrAD**, no substantial change in the absorption spectra occurred. A slight alteration of a shoulder from the right side of the absorption maximum could be observed in DMF. The absence of prominent spectral changes upon addition of mentioned bases suggests that deprotonation of **OrAD** does not significantly affects the electronic structure, likely due to strong intramolecular hydrogen bonding and stabilization of a dominant hydrazone tautomer. This is in consistency with the experimentally obtained ATR-FTIR and ^1H NMR data. In contrast, the addition of KOH in methanol solution of **OrAD** significantly altered the absorption band. The addition of HCl to all solutions resulted in an alternation of the shape as well as in a bathochromic shift of the main absorption band. The significant bathochromic shift occurred in methanol and chloroform solutions compared to the DMF solution, which can be attributed to protonation of the chromophoric system in these media, most likely at the azo nitrogen. This also implies that the protonated form (hydrazone tautomer) of **OrAD** is more dominant in these media, which is consistent with the experimentally yielded ATR-FTIR and ^1H NMR data.

4. Conclusion

In this paper, the synthesis, characterization, and solvatochromic analysis of novel 5-((2-hydroxynaphthalen-1-yl)diazenyl)-2,6-dioxo-1,2,3,6-tetrahydropyrimidine-4-carboxylic acid, designated as **OrAD**, was presented. It was found that OrAD, as a highly conjugated push–pull system, exhibits pronounced solvatochromism arising from a complex interplay of solvent effects, tautomeric equilibria, and intramolecular hydrogen bonding. Spectral features such as broadening, shoulders, and partial splitting of the absorption bands further support the coexistence of multiple tautomeric forms. The combined ATR-FTIR, ^1H NMR and UV-Vis spectroscopic analysis suggested that the synthesized azo dye predominantly exists in the hydrazone tautomeric form in solid form and solution, while the orotic acid moiety remains in its diketo (lactam) configuration in pure solvent and in solid form. The most pronounced absorption band can be attributed to an intramolecular charge-transfer (ICT), where the most pronounced bathochromic shift of an absorption maximum was observed in DMF, indicating efficient stabilization of a polar excited state. Deviations from polarity trends, particularly in DMSO and less interactive aprotic solvents, highlight the importance of specific solute-solvent interactions beyond dielectric effects. Acid-base studies further support solvent-dependent tautomeric equilibria, with significant bathochromic shifts in acidic media implying the dominance of hydrazone tautomer and lactam-lactim equilibria, while there were no significant changes in basic media.

5. Abbreviations

ATR-FTIR	– Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared (spectroscopy)
DMF	– Dimethylformamide
ICT	– Intramolecular Charge Transfer
^1H NMR	– Proton Nuclear Magnetic Resonance
TEA	– Triethylamine
UV-Vis	– Ultraviolet-Visible (spectroscopy)
λ_{max}	– Absorbance maximum
ε	– Molar extinction coefficient

6. Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-33/2026-03/200287, 451-03-34/2026-03/200135 and 451-03-33/2026-03/200026).

7. References

- [1] Ali, A. A., M. A. Ismail, W. E. Elgammal, A. Belal, A. J. Obaidullah, A. K. Khalil, G. A. M. Elhagali, M. S. A. El-Gaby, Novel Azo dyes containing a hydrazide-hydrazone moiety for dyeing polyester fabric, *Scientific Reports*, 15 (2025), 4360.
- [2] El-Rahman, M. A., A. Z. Omar, A. R. Kandeel, E. A. Hamed, M. A. El-Atawy, R. M. Keshk, Synthesis, characterization, and polyester dyeing performance of azo barbituric and thiobarbituric acid disperse dyes, *Scientific Reports*, 15 (2025), 13410.
- [3] Salman, M., A. Jabbar, S. Farooq, I. Bashir, M. Sohail, K. Rafiq, New heterocyclic azo-disperse dyes; their synthesis, characterization, application, photo physical properties and solvatochromic studies, *Journal of Molecular Structure*, 1287 (2023), 135664.

- [4] **Parameshwarappa, S., K. T. Chinnagiri, R. K. T. Chinnagiri, N. Swamy**, Sulfamethazine-based azo dyes: synthesis, structural, electrochemical and fluorescence studies, *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 200 (2025), 12, pp. 973–984
- [5] **Maliyappa, M. R., J. Keshavayya, N. M. Mallikarjuna, I. Pushpavathi**, Novel substituted aniline based heterocyclic dispersed azo dyes coupling with 5-methyl-2-(6-methyl-1, 3-benzothiazol-2-yl)-2, 4-dihydro-3H-pyrazol-3-one: Synthesis, structural, computational and biological studies, *Journal of Molecular Structure*, 1205 (2020), 127576.
- [6] **Prashantha, A. G., J. Keshavayya, R. A. Shoukat Ali**, Synthesis, spectral characterizations and biological applications of novel 3-[(E)-(4, 6-dihydroxy pyrimidin-5-yl)diazenyl]-4-methylbenzoic acid azo Dye and their derivatives, *Results in Chemistry*, 3 (2021), 100110.
- [7] **Mezgebe, K., E. Mulugeta**, Synthesis and pharmacological activities of azo dye derivatives incorporating heterocyclic scaffolds: a review, *RSC Advances*, 12 (2022), 40, pp. 25932-25946.
- [8] **Patil, P. S., N. Sekar**, Photostable thiophene-based heterocyclic azo dyes: Synthesis, characterization, photophysical analysis, dyeing study, fastness, UPF, thermal stability, and antibacterial activity, *Journal of Molecular Liquids*, 423 (2025), 126997.
- [9] **El-Qaliei, M. I. H. M., Sayed A. S. Mousa, E. A. Ishak, H. M. D. Nasr, M. F. Hussein, A. M. A. Hassane**, Synthesis, characterization, antimicrobial, antioxidant activities, and *in silico* study of new azo disperse dyes containing pyrazole and pyrazolo[1,5-*a*]pyrimidine rings, *Bull. Chem. Soc. Ethiop.*, 39 (2025), 7, pp. 1411-1424.
- [10] **Guerroudj, A. R., E. U. Mughal, N. Naeem, A. Sadiq, J. H. Al-Fahemi, B. H. Asghar, N. B., A. Chouaih, S. A. Ahmed**, Exploring Pyrimidine-Based azo Dyes: Vibrational spectroscopic Assignments, TD-DFT Investigation, chemical Reactivity, HOMO-LUMO, ELF, LOL and NCI-RDG analysis, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 313 (2024), 124093.
- [11] **Mughal, E. U., Q. A. Raja, A. Yahya A. Alzahrani, N. Naeem, A. Sadiq, E. Bozkurt**, Pyrimidine-based azo dyes: Synthesis, photophysical investigations, solvatochromism explorations and anti-bacterial activity, *Dyes and Pigments*, 220 (2023), 111762.
- [12] **Baumeister, A., S. E. Vogelmann, L. Fischer**, Concentration and purification of orotic acid directly from whey with an expanded bed adsorption system, *Journal of Chromatography A*, 1006 (2003), 1–2, pp. 261-265.
- [13] **Elroby, S. A., K. H. Aloufi, S. G. Aziz, A. Jedidi, W. I. Hassan, O. I. Osman**, Substituent effect on the intramolecular hydrogen bond and the proton transfer process in pyrimidine azo dye: A computational study, *Results in Chemistry*, 6 (2023), 101034.
- [14] **Amaral, L. M. P. F., P. Szternier, V. M. F. Morais, M. D. M. C. Ribeiro da Silva, M. A. V. Ribeiro da Silva**, Energetic characterization of uracil derivatives: Orotic and isoorotic acids, *Thermochimica Acta*, 683 (2020), 178474.
- [15] **Maltese, M., S. Passerini, S. Nunziante-Cesaro, S. Dobos, L. Harsányi**, Infrared levels of monomeric uracil in cryogenic matrices, *Journal of Molecular Structure*, 116 (1984), pp. 49-65.
- [16] **Yamada, M., I. Honma**, An Anhydrous Proton Conductor Based on Lactam-Lactim Tautomerism of Uracil, *ChemPhysChem*, 5 (2004), pp. 724-728.
- [17] **Gholipour, A., R. Sadat Neyband, S. Farhadi**, NMR investigation of substituent effects on strength the intramolecular hydrogen bonding interaction in X-phenylhydrazones switches: A theoretical study, *Chemical Physics Letters*, 676 (2017), pp. 6–11.
- [18] **Xin Su, X., M. Lõkov, A. Kútt, I. Leito, I. Aprahamian**, Unusual para-substituent effects on the intramolecular hydrogen-bond in hydrazone-based switches, *Chemical Communications*, 48 (2012), 10490-10492.

Originalni naučni rad

Ključne reči:

*mašinsko učenje; fizički informisane
neuronske mreže; neuronski operatori;
digitalni blizanci; prenos toplote*

Key words:

*machine learning; physics-informed
neural networks; neural operators;
digital twin; heat transfer*

Andrija PETROVIĆ*

* andrija.petrovic@fon.bg.ac.rs

OD REGRESIJE DO NEURONSKIH OPERATORA: PREGLED METODA MAŠINSKOG UČENJA U PROCESNOJ INDUSTRIJI SA PRIMENAMA U DIGITALNIM BLIZANCIMA

**FROM REGRESSION TO NEURAL OPERATORS:
A REVIEW OF MACHINE LEARNING METHODS FOR
PROCESS INDUSTRY, WITH DIGITAL-TWIN APPLICATIONS**

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka,
Department of Business Systems Organization, Beograd
ORCID: 0000-0003-4516-495X

Simulacija složenih procesnih jedinica u realnom vremenu — peći, razmenjivača toplote i reaktora — dugo je bila rezervisana za skupe PDE solve i CFD alate. S druge strane, čisto crno-kutijski modeli mašinskog učenja često su krhki i fizički nekonzistentni. Ovaj rad daje pristupačan pregled metoda mašinskog učenja (ML) koje su danas relevantne za procesnu industriju, pri čemu se kao zajednički primer u celom radu koristi prenos toplote. Pregled počinje od klasične statistike i regresije, koje već decenijama čine osnovu mekih senzorskih merenja. Zatim se obrađuju nadgledano i nenadgledano učenje za detekciju anomalija (na primer, prljanje razmenjivača toplote), kao i duboko učenje za prognozu složenih vremenskih serija u nelinearnim termičkim postrojenjima. Glavni doprinos rada je sistematizacija nove generacije fizički informisanih metoda — fizički informisanih neuronskih mreža (PINN) i neuronskih operatora (DeepONet, Fourier Neural Operator) — kroz pet malih i reproducibilnih eksperimenata, svih iz oblasti prenosa toplote. Posebna pažnja posvećena je ubrzanju koje neuronski operatori donose digitalnim blizancima: u našem eksperimentu, FNO je oko jedan red veličine brži od referentnog konačno-razlikatnog solvera, uz prihvatljivu tačnost. Rad se završava praktičnim vodičem za inženjere o tome kako izabrati ML metodu prema tipu problema, dostupnosti podataka i fizike, kao i zahtevima za rad u realnom vremenu.

Real-time simulation of complex process units — fired heaters, heat exchangers and reactors — has long been the domain of expensive PDE solvers and CFD tools. At the same time, purely black-box machine-learning models tend to be brittle and physically inconsistent. This paper provides an accessible review of the machine-learning (ML) methods that are relevant to today's process industry. Throughout the paper, heat transfer is used as the unifying example. The review begins with classical statistics and regression, which have served as the foundation of soft sensing for decades. It then covers supervised and unsupervised learning for anomaly detection (for example, heat-exchanger fouling), and continues with deep learning for the forecasting of complex time series in nonlinear thermal plants. The main contribution is a systematic walk through the latest generation of physics-aware methods — physics-informed neural networks (PINNs) and neural operators (DeepONet, Fourier Neural Operator). Each method is illustrated by one small reproducible experiment, and all experiments use heat-transfer problems. We give particular attention to the speed-up that neural operators bring to digital twins. In our experiment, the FNO runs roughly one order of magnitude faster than the reference finite-difference solver while preserving acceptable accuracy. The paper closes

with a practical roadmap that helps engineers choose an ML method based on the type of problem, the available data and physics, and the need for real-time execution.

1. Introduction

Consider three typical situations from the process industry. First, an operator running a model-predictive controller (MPC) on an industrial fired heater needs zone-temperature predictions in less than one second in order to set the burner duties. Second, a supervisor of a heat-exchanger network has to detect the onset of fouling several days before the cleaning crew arrives. Third, a reformer designer wants to optimize the geometry of the tube bundle across many transient operating profiles, but cannot afford a twelve-hour CFD run for each candidate design. All three problems share two features. The underlying physics — primarily heat transfer — is only partially known, and the available time budget is short.

Historically, two communities have approached such problems from opposite directions. The first-principles school relies on conservation laws — Fourier's law of conduction, the Stefan–Boltzmann radiation law, the Navier–Stokes equations — discretized with finite differences or finite volumes [1, 2]. The resulting methods are accurate and easy to explain, but they are slow. This is especially true for inverse problems and for studies that need to sweep across many parameter values. The data-driven school, which has long been dominated by statistical process monitoring [3, 4] and more recently by deep learning [5, 6], is fast at inference time. Its weakness is that it does not enforce the physics that should hold, and accuracy drops sharply outside the training distribution.

A more recent family of methods bridges this gap. Physics-informed neural networks (PINNs) [7, 8, 9] and neural operators [10, 11, 12] learn from data while respecting the governing equations. Neural operators go one step further: instead of returning a single value, they produce a function that maps an entire input field to an entire output field. The same trained operator can then be queried for new boundary conditions, new materials, or new geometries, without retraining. That property is what makes a true digital twin possible [13].

Contributions and scope. This paper is a tutorial review intended for engineers and researchers who work in the process industry. The contributions are the following. First, we provide a structured roadmap that goes from linear regression to neural operators, organised along two axes: data versus physics, and speed versus accuracy. Second, we present five small and fully reproducible experiments on heat-transfer benchmarks — a shell-and-tube heat exchanger, a multi-zone furnace, one-dimensional unsteady conduction, and the two-dimensional heat equation. Each experiment is chosen so that one figure makes the strengths and weaknesses of the method visible. Third, we give a practitioner-oriented decision table that summarises when each family of methods is the right tool for the job. Heat transfer serves as the unifying technical thread throughout the paper.

The paper is intentionally written somewhere between a textbook chapter and a research survey. We assume that the reader has a working knowledge of process engineering and basic statistics, but not necessarily a deep familiarity with modern machine learning. Pointers to the foundational papers are given along the way, so that an interested reader can study any topic in more depth. The experiments are deliberately small and self-contained, and each one can be reproduced on a single laptop in a few minutes.

2. The process-industry modeling landscape — a heat-transfer lens

The engineering problems addressed in this paper fall into a small number of recurring patterns, and in process plants almost all of them are dominated by heat transfer. A first pattern is steady-state

mapping, for instance learning the relationship between inlet and outlet temperatures of a heat exchanger from tabular, low-dimensional data. A second pattern is anomaly detection, used to identify fouling or tube hot-spots from multivariate time series. A third pattern is forecasting, such as predicting zone temperatures of a multi-zone furnace thirty minutes ahead. A fourth pattern is acting as a PDE surrogate, for example reproducing the transient temperature field inside a reactor wall. A fifth and more recent pattern is operator learning, where a single trained model serves as the solution operator for a whole family of heat equations. Each pattern is best served by a different ML tier. What should drive the choice of method is the data regime — how many samples are available, how sparse and noisy they are, and whether the governing equations are known — rather than the model that happens to be in fashion.

It is useful to organise these problems along two axes. The first axis is data versus physics. At one extreme, the system is described by a well-validated set of conservation equations and only a few measurements are available. At the other extreme, large amounts of historical data are available, but the underlying mechanism is opaque or only partially understood. The second axis is speed versus accuracy. Some problems tolerate hours of solver time per query, as in offline design studies. Other problems demand answers within seconds or even milliseconds, as in real-time control or online optimisation. The methods reviewed in this paper occupy different regions of this two-dimensional space. Classical regression sits in the data-poor and fast region. Deep learning sits in the data-rich and fast region. First-principles solvers sit in the physics-rich and slow region. Neural operators are an attempt to combine the physics-rich and fast corners.

A second observation, often missed in the academic literature, is that an industrial deployment is rarely a single model. It is a pipeline that includes data acquisition, signal conditioning, fault gating, model evaluation, post-processing, and a control or alerting action. The ML model is usually only one stage of this pipeline, and replacing it with a fancier one does not, by itself, improve plant performance. A more useful question is therefore not "what is the best model for my problem?" but "what is the smallest change to the pipeline that delivers the required business outcome?".

3. Classical statistics and regression

For decades, the workhorses of industrial soft sensing have been multiple linear regression, principal-component regression (PCR), partial least squares (PLS) [3, 4], and Gaussian-process regression (GPR) [14]. These models remain the baseline that any new method has to beat. They are interpretable, easy to certify, cheap to retrain, and surprisingly hard to outperform on smooth, near-linear thermal responses.

3.1. Experiment 1 — Temperature soft sensor for a heat exchanger

We construct a synthetic dataset for a steady-state counter-flow shell-and-tube heat exchanger using the ε -NTU method. The specific heats are kept constant ($c_{p,h} = 2.2$ and $c_{p,c} = 4.18$ kJ/(kg·K)), while the inlet temperatures, flow rates and the overall conductance UA vary across operating points. We generate 1,500 operating points in total. The target variable is the hot-side outlet temperature $T_{h,out}$, to which we add Gaussian thermocouple noise with a standard deviation of 0.5 °C. Four regressors are trained on a 75/25 train–test split: Ridge regression, PLS, a Gaussian process with an RBF kernel, and a Random Forest.

The Gaussian process clearly outperforms the other models (Table 1, Figure 1). The linear models cannot represent the saturating nonlinearity of the effectiveness $\varepsilon(NTU, Cr)$. The practical lesson is that even within the family of classical baselines, the accuracy can change by an order of magnitude when the chosen model class matches the underlying physics.

Table 1. Soft-sensor metrics (Experiment 1).

Model	R^2	MAE [°C]	Train time [ms]
Ridge	0.919	6.57	2.7
PLS	0.920	6.54	1.8
GP (RBF)	0.997	1.15	7941.8
RandomForest	0.962	4.18	336.8

Experiment 1: classical regressors as soft sensor for hot-outlet temperature

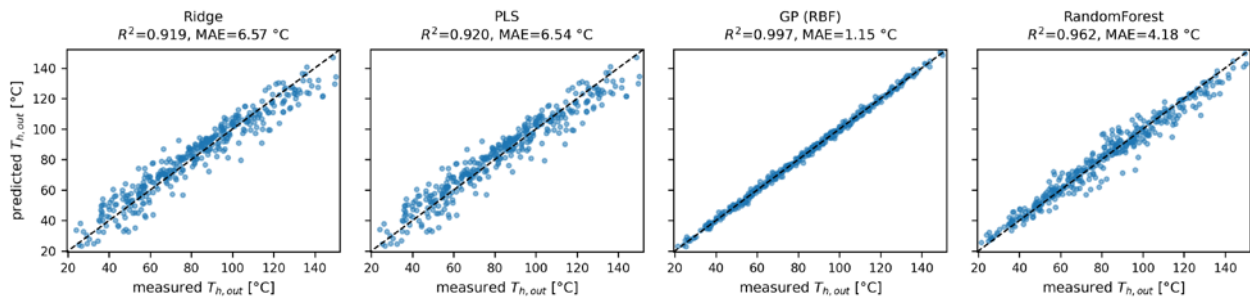


Figure 1. Parity plots for the four soft-sensor models on the test set.
The Gaussian process is closest to the $y = x$ line.

A second observation concerns the cost of training. The Gaussian process is roughly three thousand times more expensive to fit than Ridge regression. For 1,500 data points this is not a problem: a few seconds on any laptop is acceptable. For a typical industrial soft-sensor application, however, the dataset may contain hundreds of thousands of samples, and the model may need to be retrained frequently. In that regime the cubic complexity of the standard Gaussian process quickly becomes prohibitive. Two practical options exist. The first is to use a sparse approximation, such as an inducing-point Gaussian process or a structured-kernel variant. The second is to switch to gradient-boosting machines, which scale linearly in the number of samples and usually reach accuracy close to that of the Gaussian process on smooth problems. The Random Forest result in Table 1 already points in that direction: with no hyperparameter tuning, it sits between the linear models and the Gaussian process. With moderate tuning, gradient boosting typically closes most of the remaining gap.

4. Supervised and unsupervised learning beyond linear models

Random forests, gradient boosting, support-vector machines and clustering algorithms are widely used for thermal anomaly detection. Typical applications include heat-exchanger fouling [15], furnace tube hot-spots, insulation degradation, and seal or bearing faults on rotating equipment that handles hot streams [16]. On the unsupervised side, two families of methods dominate. The first is tree-based outlier scoring, represented by the Isolation Forest [17]. The second is reconstruction-based scoring with autoencoders [18].

4.1. Experiment 2 — Fouling detection in a heat exchanger

We simulate six months of hourly operation. After the midpoint of the simulation ($t = T/2$), the overall heat-transfer coefficient U decays exponentially with a time constant of two months. In the second half of the run, three discrete step disturbances also occur: a tube trip and two partial bypasses. The detector has access only to the variables ($T_{h,in}$, $T_{c,in}$, m_h , m_c , $T_{h,out}$); it does not see U directly. A Ridge regressor is first trained on the clean first 30 % of the data. Its residuals on the rest of the record are then fed to two anomaly detectors: an Isolation Forest [17] and a small autoencoder.

Table 2. Fouling detection metrics (Experiment 2).

Detector	Detection delay [h]	False-alarm rate [%]	Detection rate [%]
IsolationForest	53	0.28	96.8
Autoencoder	35	0.00	98.4

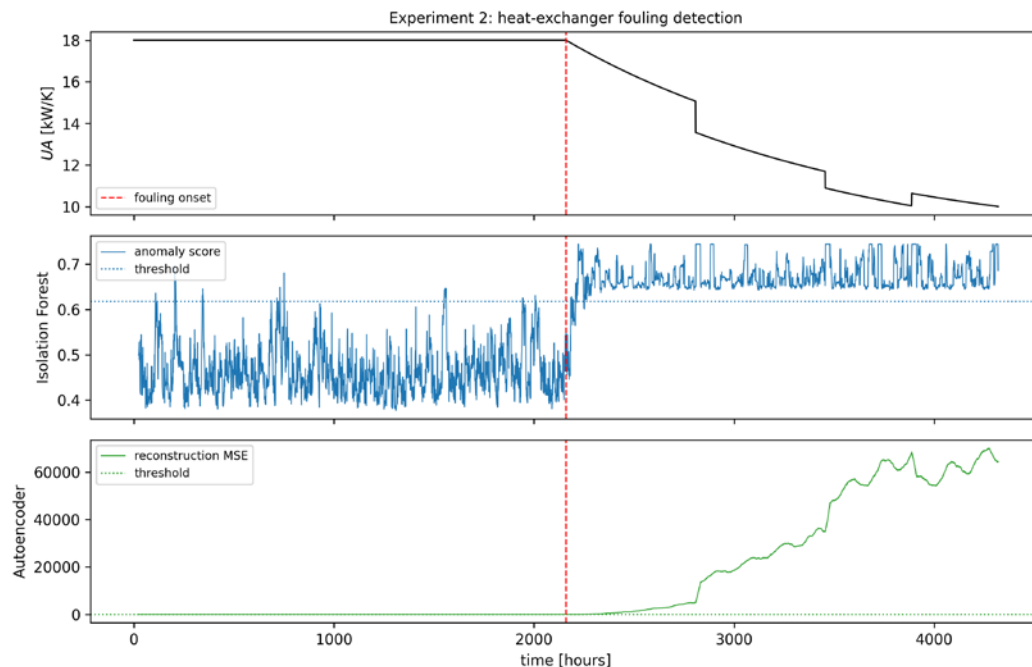


Figure 2. True $UA(t)$ with fouling onset and step disturbances (top),
Isolation-Forest and autoencoder anomaly scores (bottom).
The autoencoder detects fouling 18 h earlier with zero false alarms

The autoencoder detects fouling about eighteen hours earlier than the Isolation Forest, and it produces no false alarms on the clean half of the data (Table 2, Figure 2).

Two engineering remarks are worth making at this point. The first concerns the importance of windowed features. Instead of looking at a single residual sample, both detectors operate on a sliding 24-hour window of residual statistics: mean, standard deviation, peak-to-peak range, mean absolute value, and the most recent value. This windowing reduces sensitivity to single-point noise spikes and exposes the slow, monotonic drift that is characteristic of fouling. The second remark concerns the difference between the two detectors. The advantage of the autoencoder is not specific to this dataset; it reflects the inductive bias of reconstruction-based detection. A reconstruction model is forced to explain the inputs through a small latent code, and any sample that does not match the patterns seen during clean operation incurs a large reconstruction error. Tree-based methods, by contrast, isolate anomalies by random partitioning and are usually less sensitive to slow, correlated drift of the kind produced by fouling.

In a real plant, what happens after a positive detection matters as much as the detection itself. A confirmation period is needed to avoid reacting to transient excursions. A diagnostic step should indicate the most likely root cause. An alarm-prioritisation step should place the event in the operator's workflow. None of these steps belong to the ML model itself, but together they determine whether the model actually delivers value in practice.

5. Deep learning for process data

Deep learning becomes useful when the dimensionality, the nonlinearity, or the length of the input sequence exceeds what classical baselines can handle. For process engineers, three building blocks are particularly relevant. Convolutional networks are well suited to image-like data, such as infrared thermograms of plant equipment. Recurrent networks (LSTMs [19]) and self-attention models (Transformers [20]) handle multivariate temperature time series. Graph neural networks [21] capture the topology of the plant, in particular the connectivity of heat exchanger or piping networks.

5.1. Experiment 3 — Multi-zone furnace temperature forecasting

We simulate a four-zone furnace whose dynamics are genuinely nonlinear. The model combines four effects: linear conductive coupling between adjacent zones; radiative heat loss to the walls, proportional to T^4 (Stefan–Boltzmann); convective heat loss to the ambient; and a saturating burner efficiency $\eta(T) = (1 + \exp((T - 1600)/80))^{-1}$. Each zone is regulated by a PI controller that tracks a time-varying setpoint. The setpoint is the sum of a slow 24-hour diurnal cycle, with a different phase per zone, and scheduled multi-zone step changes that occur every three days. This pattern mimics a realistic plant-campaign schedule. We generate ten days of one-minute data, giving 14,400 samples in total. Each model receives the last 180 minutes of all four zone temperatures and forecasts the temperatures 5, 30, 60, 120, 180 and 240 minutes ahead. We compare three models: a vector autoregression (VAR) as the linear baseline, a two-layer LSTM, and a small Transformer encoder.

Table 3. Forecast RMSE vs. horizon (Experiment 3).

Horizon [min]	VAR [K]	LSTM [K]	Transformer [K]
5	1.63	1.50	1.51
30	1.64	1.51	1.51
60	1.64	1.50	1.51
120	1.65	1.51	1.51
180	1.65	1.50	1.50
240	1.65	1.50	1.50

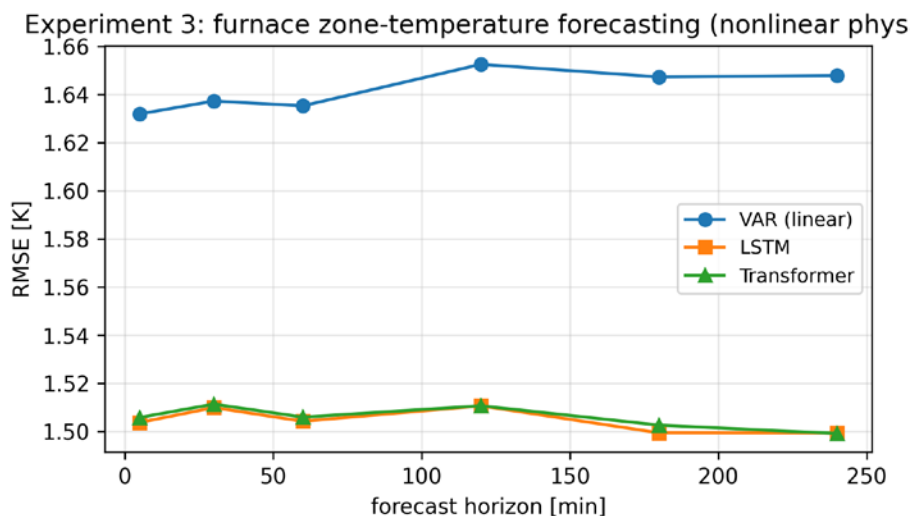


Figure 3. RMSE vs. forecast horizon for VAR, LSTM, and Transformer on the multi-zone furnace. The deep models beat the linear baseline at every horizon by ~8–10 %.

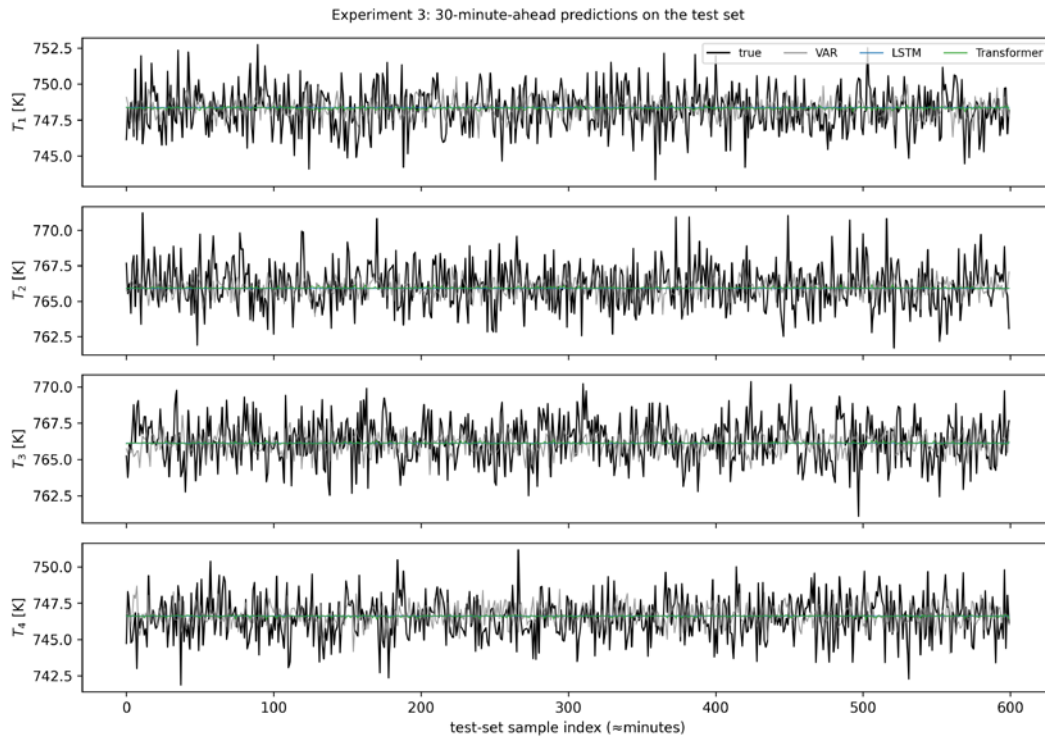


Figure 4. Sample 30-minute-ahead predictions on the test set (first 600 minutes).
The deep models track the true zone temperatures more closely than the VAR baseline.

This result deserves an honest interpretation. Under aggressive feedback control, most of the temperature variation is absorbed by the controller, and what remains to be forecast is mainly the response to the slow, deterministic setpoint schedule. A linear model captures this component reasonably well. The advantage of the deep models comes from two sources. The first is the radiation term T^4 , which is genuinely nonlinear. The second is the saturating burner efficiency $\eta(T)$, which makes the closed-loop response asymmetric around the setpoint. Both effects become more pronounced when the plant runs at high temperatures or close to actuator limits, which is precisely when accurate forecasting is most valuable. A more chaotic scenario, such as a furnace cold start or a major upset, would widen the gap further. The same scenario would, however, reduce the value of any training data collected during quiet operation, and it would require careful transfer learning.

A second technical remark is that both deep models converge to essentially the same RMSE. This is typical of small forecasting tasks. The main practical advantage of the Transformer over the LSTM is not lower error on a fixed dataset, but better scaling. On a dataset ten times larger that covers several operating regimes and several plants, the Transformer benefits from its parallel training and from its ability to attend to long context windows. For a single furnace and only a few days of data, the simpler LSTM is a perfectly reasonable choice.

6. Physics-informed neural networks (PINNs)

PINNs [7] introduce a small but powerful change to the standard training loss of a neural network. The network $T\theta(x, t)$ is required not only to fit the available data, but also to satisfy the governing PDE at randomly chosen collocation points in the domain. For one-dimensional unsteady heat conduction with known thermal diffusivity α , the loss takes the form

$$L(\theta) = L_{\text{data}} + \lambda_{\text{pde}} \cdot (1/N_{\text{c}}) \sum (\partial T\theta / \partial t - \alpha \partial^2 T\theta / \partial x^2)^2 + \lambda_{\text{bc}} \cdot L_{\text{bc}} + \lambda_{\text{ic}} \cdot L_{\text{ic}}. \quad (1)$$

PINNs are especially attractive when the data are sparse but the physics is well known. In such cases, a few thermocouples combined with Fourier's law often extrapolate much better than a hundred data points alone. PINNs also handle inverse problems in a natural way: any unknown material parameter is simply declared as a trainable variable [7, 8]. Recent surveys [8, 9] discuss the main training difficulties of PINNs, such as the need to balance loss terms with very different magnitudes and the stiffness of the resulting gradients, together with practical remedies including NTK-based re-weighting [22], adaptive sampling of collocation points, and architectures that satisfy the boundary conditions by construction.

6.1. Experiment 4 — PINN for 1-D unsteady heat conduction (and inverse α)

We solve $\partial T / \partial t = \alpha \partial^2 T / \partial x^2$ on the domain $x \in (0,1)$, $t \in (0,1)$, with Dirichlet zero boundary conditions and a smooth cosine-bump initial condition. The PINN is trained on only eight noisy interior thermocouple readings ($\sigma = 0.05$), together with samples of the PDE residual and of the initial and boundary conditions. As a baseline, we train a data-only multilayer perceptron with the same architecture on the same eight points.

Table 4. Forward PINN vs. data-only NN with 8 noisy samples (Experiment 4-A).

Model	Relative L^2	Training time [s]
PINN	0.079	79
Data-only NN	1.108	2

Experiment 4(A): PINN vs. data-only NN — only 8 noisy thermocouples

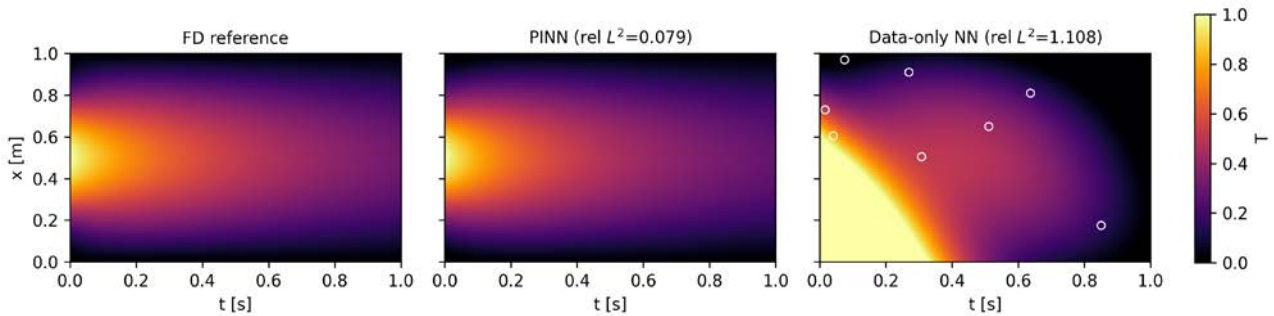


Figure 5. Finite-difference reference (left), PINN reconstruction (centre), and data-only NN reconstruction (right) of the 1-D transient temperature field from 8 noisy thermocouple readings (circles on the right panel). The data-only network cannot reconstruct the field; the PINN gets within 8 % of the reference.

Experiment 4(A): 1-D temperature slices at three times

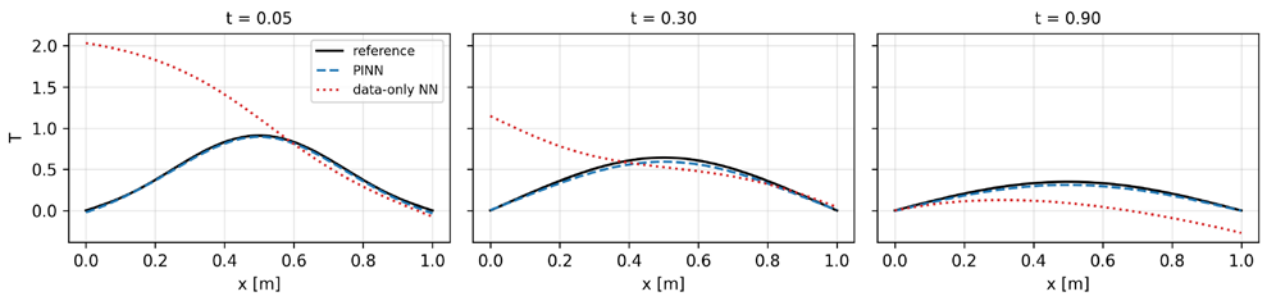


Figure 6. 1-D temperature slices at $t = 0.05$, 0.30 , and 0.90 . The PINN (dashed) closely follows the reference (solid); the data-only NN (dotted) diverges.

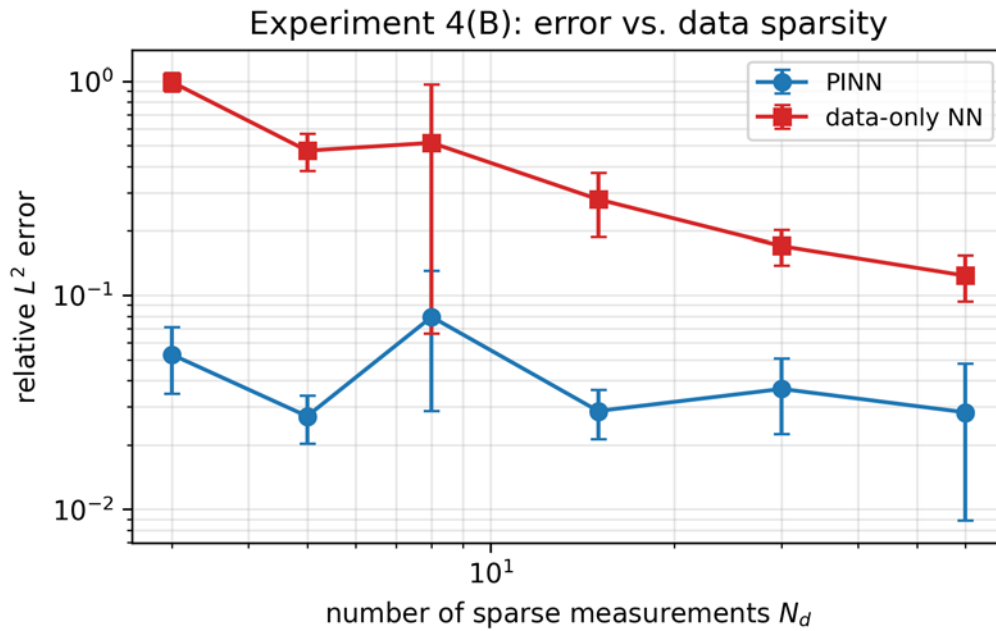


Figure 7. Relative L^2 error vs. number of sparse measurements N_d . The PINN's advantage persists across the entire data-sparsity regime (mean and standard deviation over 3 seeds).

Inverse problem. When α is declared as a trainable scalar parameter and the PINN is given thirty noisy interior samples, it recovers $\alpha = 0.096$ against the true value 0.10. The error of about 4 % is fully competitive with established engineering identification methods. The complete metrics for the inverse experiment are available in the supplementary results CSV.

The practical implication of the inverse-problem result deserves emphasis. In industrial practice, quantities such as the effective thermal diffusivity, the contact resistance between layers, and the thermal conductivity of fouling deposits are notoriously difficult to measure directly. They are usually estimated indirectly through custom optimisation routines that have to be rewritten for each new geometry. The PINN approach treats all such problems in a uniform way: the unknown parameter is simply a tensor with `requires_grad=True`, and the standard training loop performs the joint estimation of the state and the parameter. The same code scales from a single scalar (an effective α) to a spatially varying field ($\alpha(x)$, a fouling thickness profile, or a heat-source distribution inside a reactor wall). The only conceptual change is the dimensionality of the parameter object.

Three practical lessons may help readers who wish to reproduce the experiment. The first is that loss balancing matters. The PDE residual, the boundary loss, the initial-condition loss, and the data loss have very different numerical magnitudes, and fixed weights are rarely optimal. We used static weights of 1, 10, 10 and 10 respectively, which works on this toy problem. For stiffer PDEs, such as advection-dominated transport or problems with sharp fronts, adaptive weighting schemes such as the NTK-based reweighting of [22] are usually necessary. The second lesson concerns the choice of activation function. For PINNs, $\tanh$ is a safer default than ReLU because its second derivative is smooth, which prevents the gradient pathologies that can appear when the PDE residual is evaluated. The third lesson concerns the distribution of collocation points. Their placement has a strong influence on accuracy near the boundaries. Oversampling the boundary regions, or using an architecture that satisfies the boundary conditions by construction, is often the cheapest way to improve results.

7. Neural operators

PINNs solve one PDE instance at a time. Neural operators go a step further: they learn the solution operator itself. A single trained network receives the initial condition, the boundary conditions, and the material parameters (each represented as an input function) and returns the full output field. The dominant architectures are DeepONet [10] and the Fourier Neural Operator (FNO) [11], together with their variants such as Geo-FNO and U-FNO [23]. A unified mathematical treatment of all these operators is given by Kovachki et al. [12]. Current engineering applications include global weather forecasting (FourCastNet [24], GraphCast [25]), subsurface flow, and turbulence surrogates.

7.1. Experiment 5 — FNO surrogate for the 2-D unsteady heat equation

We learn the operator $G : (\alpha(x,y), T_0(x,y)) \rightarrow T(x, y, t_{\text{end}})$. Given a spatially varying thermal diffusivity $\alpha(x,y)$, generated as a smooth Gaussian random field clipped to the interval $[0.05, 0.25]$, and a random initial temperature T_0 , the operator returns the temperature field at the final time t_{end} . The reference solver is an explicit finite-volume scheme on a 32×32 grid with Neumann boundary conditions. The FNO has four spectral-convolution layers, eight retained Fourier modes per dimension, a width of 20, and approximately 0.5 M parameters. Training takes about three minutes on a single CPU and uses 200 solver-generated input–output pairs.

Table 5. FNO surrogate performance (Experiment 5).

Quantity	Value
Test relative L^2 (vs FD)	0.046
FNO inference / sample [ms]	1.02
FD solver / sample [ms]	12.53
Speed-up	$\approx 12 \times$

Experiment 5: FNO surrogate for 2-D heat equation. test rel $L^2 = 0.046$, speed-up 12 $\times$ over FD solver

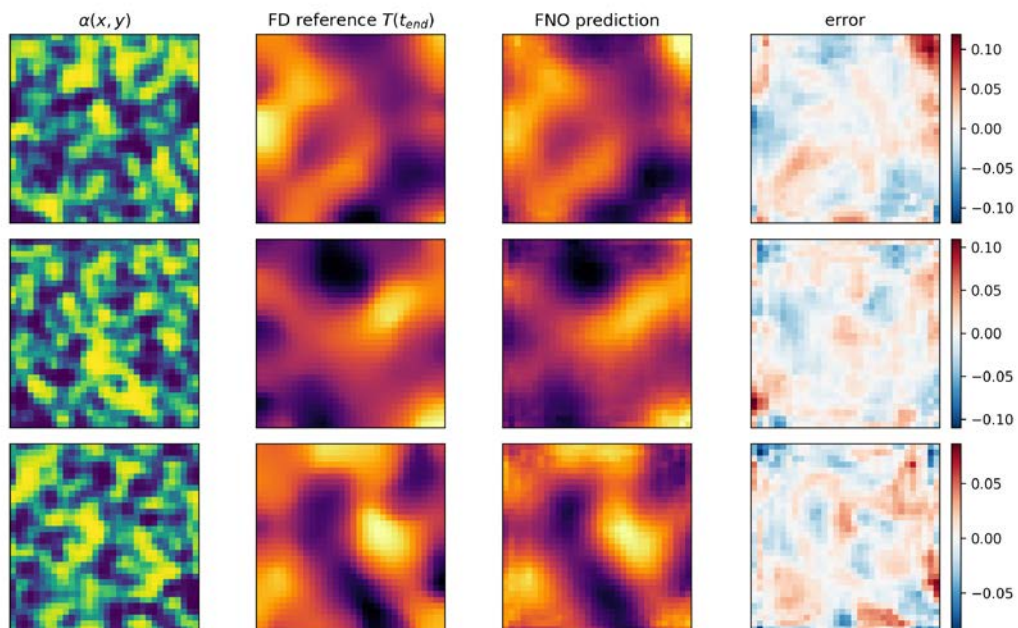


Figure 8. Three test samples: input diffusivity $\alpha(x,y)$ (first column), FD reference temperature at t_{end} (second), FNO prediction (third), and per-pixel error (fourth).

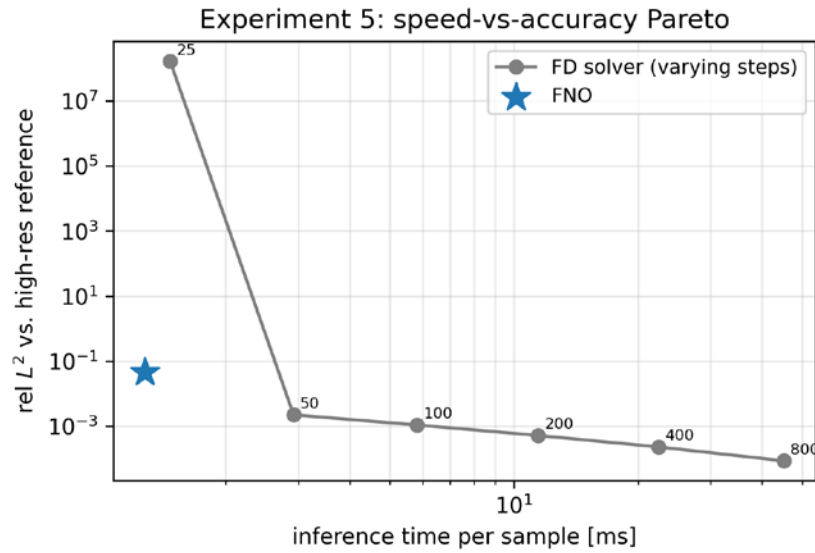


Figure 9. Speed-vs-accuracy Pareto plot. The FNO (star) is one order of magnitude faster than the FD solver at acceptable accuracy.

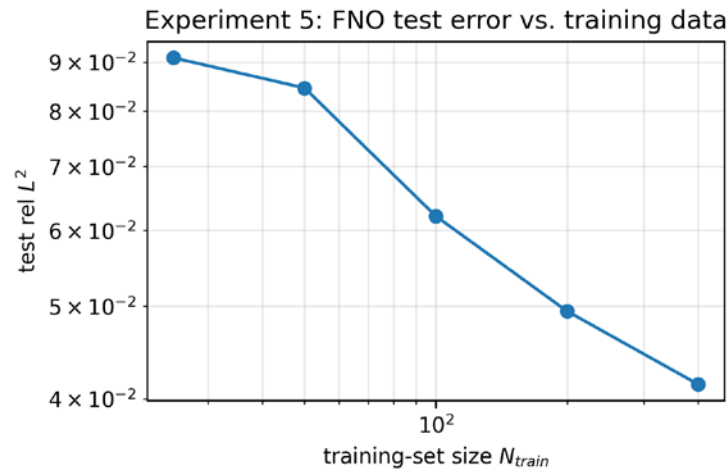


Figure 10. FNO test error vs. training-set size. The curve flattens beyond ~ 200 solver-generated pairs for this resolution.

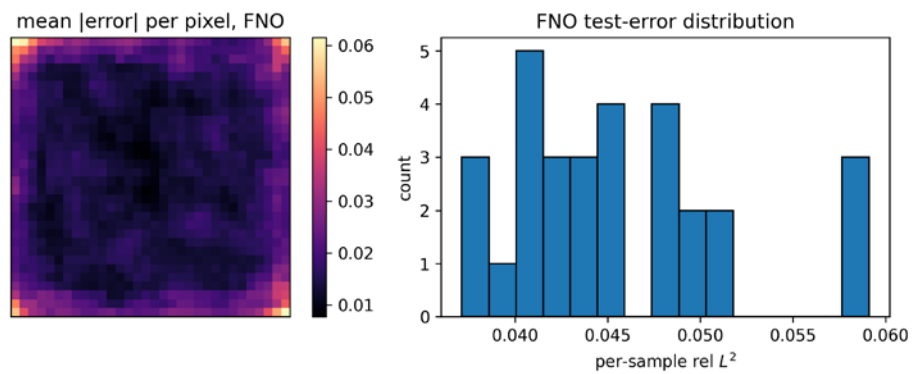


Figure 11. (Left) mean per-pixel absolute error of the FNO over the test set. (Right) distribution of per-sample relative L^2 errors.

The practical message for engineers is direct. A trained FNO can replace the inner-loop CFD evaluation in MPC, in optimisation, or in uncertainty propagation, at a fraction of the wall-clock cost, and it does so without re-running the solver for each new operating point.

Several caveats are nevertheless in order. The FNO assumes a regular grid and a spectral structure that is close to periodic. This is appropriate for the rectangular domains used in our experiment, but less natural for industrial geometries with curved walls and complex internals. Variants such as Geo-FNO and the Graph Neural Operator address this limitation, at the cost of additional architectural complexity. The training set must also be representative of the deployment distribution. An operator trained on diffusivity fields from one statistical family will degrade if it is queried on fields of qualitatively different character — for example, on fields with sharp interfaces when the training data contained only smooth fields. Finally, although the speed-up over the reference solver is substantial in our experiment, the comparison is made against an explicit finite-difference solver on a coarse grid. Modern industrial CFD codes use implicit time stepping and sophisticated meshing, which narrows part of the gap. The most accurate framing is therefore not that neural operators replace CFD, but that they provide a cheap surrogate inside outer loops — design exploration, Monte-Carlo uncertainty propagation, or real-time MPC — while the underlying CFD remains the ground-truth oracle that is invoked occasionally for retraining.

8. Practitioner roadmap

In practice, the question is rarely "what is the most powerful model available?". The more useful question is "what is the smallest model that solves my problem?". Table 6 summarises our recommendations.

Table 6. When to use which family.

Problem	Data	Physics	Real-time	Recommended
Soft sensor, smooth response	low	partial	no	PLS / GP
Soft sensor, nonlinear	mid	partial	no	GP / gradient boosting
Thermal anomaly detection	mid	low	yes	Isolation Forest / autoencoder
Multivariate forecasting	mid	low	yes	LSTM / Transformer
Few-shot inverse / identification	tiny	strong	no	PINN
Real-time PDE surrogate	many	strong	yes	Neural operator (FNO)

Several practical aspects of deployment are worth highlighting.

Model drift. Process units age over time, catalysts deactivate, sensors lose their calibration, and operating campaigns change the product slate. For these reasons, retraining schedules and drift detectors are not optional [4]. A simple monitoring layer that compares live residuals against the residual distribution observed at the time of the last training run is usually enough to trigger retraining when it is actually needed.

Uncertainty quantification. Gaussian processes, Bayesian PINNs [26], and conformal prediction all produce actionable confidence intervals. A cheap alternative is to train five copies of the same network with different random seeds and to use the empirical spread of their predictions as an uncertainty estimate. For safety-critical control or alerting, an interval estimate is often more useful than a point prediction with no error bars.

Certiability. Linear baselines and physics-informed models are much easier to certify than purely black-box networks. This is still important in safety-critical control loops, especially in pharmaceutical manufacturing (FDA Process Analytical Technology guidance), in nuclear applications, and in any installation that falls under functional-safety standards such as IEC 61511.

Hybrid models. The fastest route from prototype to production is usually a hybrid one: a classical first-principles core combined with an ML residual correction [27]. The first-principles part guarantees that the model behaves sensibly outside the training distribution. The ML correction then absorbs the systematic biases that the engineering model alone cannot capture. This pattern works particularly well for heat-transfer applications, where the dominant physics is well known (Fourier conduction, Stefan–Boltzmann radiation) but second-order effects, such as fouling, slow drift of surface emissivity, or three-dimensional flow patterns, are difficult to model from first principles alone.

Data quality. No ML technique can recover information that is not present in the data. In our experience, the most common cause of failure in industrial ML projects is not the choice of model architecture but the quality of the data pipeline that feeds it. Typical issues include incorrect timestamps, missing values that are silently filled with the last known good value, sensors that have drifted without recalibration, and historian compression settings that have irreversibly destroyed the high-frequency content of transients. An hour spent inspecting the raw signals before any modelling almost always saves a day of debugging later.

9. Limitations and future directions

Several open problems remain. Generalisation outside the training distribution is fragile for purely data-driven models, and PINNs solve this only in part. Even a network that fits its training data perfectly can extrapolate in unsafe ways, and quantifying when it can be trusted is still an active research topic. Conformal prediction, ensembling, and strict physics constraints are partial answers, but none of them offers the same level of guarantee as a verified first-principles solver.

Multi-physics coupling — radiation combined with conduction, reaction kinetics and species transport — is still an active frontier for operator learning. Many industrial heat-transfer problems involve at least three of these mechanisms at the same time. A fired reformer combines radiation, convection and surface chemistry. A pyrolysis furnace also features coke deposition that changes the wall thermal resistance over months. Each new coupling adds new dimensions to the input function space that the operator has to cover, and the corresponding training data are usually scarce.

Foundation models for physics — large, pre-trained neural operators that adapt to new PDEs after only a small amount of fine-tuning — are an emerging research direction. They promise the kind of transferability that has transformed natural-language processing and computer vision. They are not, however, yet proven in industrial deployment, and the cost of curating a sufficiently diverse training corpus for engineering physics is much higher than the cost of curating text or image corpora.

Two further challenges are structural rather than technical. The first is the skills gap. Process engineers rarely have hands-on experience with modern ML stacks, and ML practitioners rarely have a feel for unit operations, instrumentation or safety constraints. Cross-disciplinary teams and joint training programmes are the only durable solution. The second is the data-sharing gap. Most plant data are proprietary, which prevents the creation of large public benchmarks of the kind that have driven progress in other fields. Synthetic benchmarks of the type used in this paper are a partial substitute, but they cannot capture the messy realities of a working installation. Industry consortia that share anonymised historical data under a common schema would significantly accelerate progress.

10. Conclusion

Engineers do not need to abandon first principles in order to benefit from machine learning. The spectrum from classical regression to neural operators is best understood as a ladder, and not as an either-or choice. Each rung addresses a specific type of problem, a specific data regime, and a specific level of available physics. Our heat-transfer experiments illustrate concrete patterns. Classical regression is well suited to smooth steady-state mappings. Autoencoders are effective for anomaly detection. Deep recurrent and attention models help with nonlinear multivariate forecasting. PINNs combine sparse sensor data with conservation laws and also identify physical parameters. Neural operators provide real-time PDE surrogates and finally make digital twins practical.

11. Nomenclature

Symbol	Meaning	Units
α	thermal diffusivity	m ² /s
ρ	density	kg/m ³
c_p	specific heat at constant pressure	J/(kg·K)
ε	heat-exchanger effectiveness	—
ε_r	wall emissivity	—
σ	Stefan-Boltzmann constant (5.67×10^{-8})	W/(m ² ·K ⁴)
U	overall heat-transfer coefficient	W/(m ² ·K)
UA	heat-transfer conductance	W/K
NTU	number of transfer units	—
C_r	heat-capacity ratio	—
T	temperature	K
Q	heat duty	W
G	solution operator	—

12. References

- [1] **Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., DeWitt, D. P.,** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th ed., Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2017.
- [2] **Patankar, S. V.,** *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing, Washington, DC, USA, 1980.
- [3] **Qin, S. J.,** Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis, *Annual Reviews in Control*, 36 (2012), 2, pp. 220–234.
- [4] **Ge, Z., Song, Z., Ding, S. X., Huang, B.,** Data mining and analytics in the process industry: The role of machine learning, *IEEE Access*, 5 (2017), pp. 20590–20616.
- [5] **LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G.,** Deep learning, *Nature*, 521 (2015), 7553, pp. 436–444.
- [6] **Reis, M. S., Gins, G.,** Industrial process monitoring in the big data/Industry 4.0 era: From detection, to diagnosis, to prognosis, *Processes*, 7 (2019), 7, p. 411.
- [7] **Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E.,** Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, 378 (2019), pp. 686–707.

- [8] **Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., Yang, L.,** Physics-informed machine learning, *Nature Reviews Physics*, 3 (2021), 6, pp. 422–440.
- [9] **Cuomo, S., Di Cola, V. S., Giampaolo, F., Rozza, G., Raissi, M., Piccialli, F.,** Scientific machine learning through physics-informed neural networks: Where we are and what's next, *Journal of Scientific Computing*, 92 (2022), 3, p. 88.
- [10] **Lu, L., Jin, P., Pang, G., Zhang, Z., Karniadakis, G. E.,** Learning nonlinear operators via DeepONet based on the universal approximation theorem of operators, *Nature Machine Intelligence*, 3 (2021), 3, pp. 218–229.
- [11] **Li, Z., Kovachki, N., Azizzadenesheli, K., Liu, B., Bhattacharya, K., Stuart, A., Anandkumar, A.,** Fourier neural operator for parametric partial differential equations, *Proceedings, International Conference on Learning Representations, ICLR*, 2021.
- [12] **Kovachki, N., Li, Z., Liu, B., Azizzadenesheli, K., Bhattacharya, K., Stuart, A., Anandkumar, A.,** Neural operator: Learning maps between function spaces with applications to PDEs, *Journal of Machine Learning Research*, 24 (2023), 89, pp. 1–97.
- [13] **Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T.,** Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective, *IEEE Access*, 8 (2020), pp. 21980–22012.
- [14] **Rasmussen, C. E., Williams, C. K. I.,** *Gaussian Processes for Machine Learning*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2006.
- [15] **Kim, S., Lee, J., Kang, S.,** Predicting fouling resistance of plate heat exchangers using a recurrent neural network, *Applied Thermal Engineering*, 153 (2019), pp. 823–831.
- [16] **Hughes, M. T., Kini, G., Garimella, S.,** Status, challenges, and potential for machine learning in understanding and applying heat transfer phenomena, *Journal of Heat Transfer*, 143 (2021), 12, p. 120802.
- [17] **Liu, F. T., Ting, K. M., Zhou, Z.-H.,** Isolation forest, *Proceedings 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, IEEE, Pisa, Italy*, 2008, pp. 413–422.
- [18] **Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A.,** *Deep Learning*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2016.
- [19] **Hochreiter, S., Schmidhuber, J.,** Long short-term memory, *Neural Computation*, 9 (1997), 8, pp. 1735–1780.
- [20] **Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I.,** Attention is all you need, *Advances in Neural Information Processing Systems, NeurIPS*, Long Beach, CA, USA, 2017, pp. 5998–6008.
- [21] **Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., Yu, P. S.,** A comprehensive survey on graph neural networks, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32 (2021), 1, pp. 4–24.
- [22] **Wang, S., Yu, X., Perdikaris, P.,** When and why PINNs fail to train: A neural tangent kernel perspective, *Journal of Computational Physics*, 449 (2022), p. 110768.
- [23] **Wen, G., Li, Z., Azizzadenesheli, K., Anandkumar, A., Benson, S. M.,** U-FNO: An enhanced Fourier neural operator-based deep learning model for multiphase flow, *Advances in Water Resources*, 163 (2022), p. 104180.
- [24] **Pathak, J., Subramanian, S., Harrington, P., et al.,** FourCastNet: A global data-driven high-resolution weather model using adaptive Fourier neural operators, *arXiv preprint arXiv:2202.11214*, 2022.
- [25] **Lam, R., Sanchez-Gonzalez, A., Willson, M., et al.,** Learning skillful medium-range global weather forecasting, *Science*, 382 (2023), 6677, pp. 1416–1421.

-
- [26] **Yang, L., Meng, X., Karniadakis, G. E.,** B-PINNs: Bayesian physics-informed neural networks for forward and inverse PDE problems with noisy data, *Journal of Computational Physics*, 425 (2021), p. 109913.
 - [27] **Willard, J., Jia, X., Xu, S., Steinbach, M., Kumar, V.,** Integrating scientific knowledge with machine learning for engineering and environmental systems, *ACM Computing Surveys*, 55 (2022), 4, pp. 1–37.
 - [28] **Cai, S., Wang, Z., Wang, S., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E.,** Physics-informed neural networks for heat transfer problems, *Journal of Heat Transfer*, 143 (2021), 6, p. 060801.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.137>

Ključne reči:

višemotorni pogon; regulacija brzine;
sile zatezanja; regulacija temperature;
PLC S7 1500; HMI; Sinamics DCM;
Sinamics G120 inverter; PID 2DOF

Key words:

multi-motor drive; speed control;
tensile force control; temperature
control; PLC S7-1500; HMI; Sinamics
DCM; Sinamics G120 inverter;
PID 2DOF

Igor B. KOCIĆ*

* igor.kocic@elfak.ni.ac.rs

Saša S. NIKOLIĆ

Dragan S. ANTIĆ

Darko B. MITIĆ

Marko T. MILOJKOVIĆ

Staniša LJ. PERIĆ

Miroslav B. MILOVANOVIĆ

Nikola B. DANKOVIĆ

UPRAVLJAČKI SISTEM ZA REGULACIJU RADA TANDEM EKSTRUZIONE LINIJE

CONTROL SYSTEM FOR REGULATING THE OPERATION OF THE TANDEM EXTRUSION LINE

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0009-0002-8569-1180

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0000-0003-2745-3862

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0000-0002-5880-5173

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0000-0001-9483-0176

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0000-0001-7623-1495

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0000-0003-4766-195X

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0000-0003-0535-0790

Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

ORCID: 0000-0003-0986-5695

U radu je razvijen nov elektro upravljački sistem kojim je zamenjen stari upravljački sistem linije proizvođača Rosendahl za plaširanje i ili ispunu pojedinačnih ili použenih provodnika na kojoj su ugrađeni ekstruderi proizvođača Nokia Maillefer sa cilindrima od 30mm, 60mm i 80mm u skladu sa projektnim zadatkom i svim tehničkim i tehnološkim zahtevima. U okviru elektro projekta urađena je elektro dokumentacija distributivnog ormana, ormana PLC kontrolera i ormana u kojima su instalirani regulatori za pogon pojedinačnih uređaja, urađeno je šemiranje, izrada i instalacija i napisan softver za regulaciju brzine, sile zatezanja i temperature, a potom izvršeno testiranje rada pojedinačnih tehnoloških celina i cele linije čime je obezbeđeno optimalno upravljanje linijom prema zadatim tehnološkim zahtevima. Regulacija brzine i održavanje sile zatezanja zasnovana je na upotrebi kombinovanih metoda upravljanja sa senzorima pozicije, merenjem sile zatezanja i indirektno kontrole sile zatezanja a realizovana upotrebom kaskadnih upravljačkih petlji na bazi PID upravljačkih zakona. Za izradu upravljačkog sistema za kontrolu brzine linije iskorišćen je master slave princip upravljanja višemotornim pogonom, gde je ulazni vučni uređaj vodeći (master), a svi ostali uređaji (slave) prate njegovu brzinu sa zadatim odnosom i pri tome se materijal koji se obrađuje zateže zadržavajući silom zatezanja. Temperaturna regulacija zona ekstrudera urađena je upotrebom 2DOF PID upravljačkih zakona pri čemu se vodilo računa o međusobnom termičkom uticaju zona, takođe je razvijen deo softvera za podešavanja parametara regulatora pojedinačnih zona ekstrudera i svih zona istovremeno uz mogućnost uključenja automatskog podešavanja parametara. Softveri za PLC kontroler S7 1500 serije razvijeni su upotrebom Siemens alata za programiranje TIAPortal. Upravljački softver je napisan u jeziku Ladder dijagrama, STL i SCL u zavisnosti od složenosti pojedinih

tehnoloških celina. Za upravljanje DC i AC motorima upotrebljeni su konvencionalni regulatori Siemens serije 6RA80 Sinamics DCM i invertori serije G120 Sinamics koji su podešeni upotrebom StartDrive alata koji je sastavni deo TIA Portal softvera. Ekрани za panele urađeni su upotrebom TIA Portal WinCC okruženja. Upotrebom operatorskih panela ostvarena je intuitivna vizuelizacija procesa rada delova linije i linije u celini, pri čemu su tehnološke celine linije prikazane grafičkim simbolima koji menjaju boju, oblik i itd u zavisnosti od statusa ili nastalih događaja uz aktiviranje alarma. Arhiviranje relevantnih podataka vrši se upotrebom mysql baze i KepServerEx activex drajvera za komunikaciju sa Siemens PLC-ovima.

This paper presents the development of a new electrical control system that replaces the existing control system of a Rosendahl production line for filling and sheathing of single or stranded conductors, equipped with Nokia Maillefer extruders (30 mm, 60 mm, and 80 mm cylinders), in accordance with project requirements and all technical and technological constraints. The project included the design of electrical documentation for distribution cabinets, PLC control cabinets, and drive control cabinets, as well as wiring, installation, and development of software for speed, tensile force, and temperature control. After implementation, individual technological units and the complete line were tested, ensuring optimal operation according to defined technological requirements. Speed regulation and tensile force control are based on combined control methods using position sensors, direct and indirect tensile force measurements, implemented through cascade control loops based on PID control laws. The control of the multi-motor drive system is realized using a master-slave principle, where the inlet pulling device acts as the master, while all other devices follow its speed with a defined ratio, maintaining the required tensile force of the processed material. Temperature control of extruder zones is implemented using 2DOF PID control, taking into account thermal coupling between zones. Additionally, software modules for both individual and simultaneous tuning of controller parameters for all extruder zones were developed, including automatic tuning functionality. The PLC software for the Siemens S7-1500 controller was developed using TIA Portal, with control algorithms implemented in Ladder, STL, and SCL languages depending on system complexity. Control of DC and AC motors is achieved using Siemens Sinamics DCM (6RA80 series) converters and G120 inverters configured via the StartDrive tool. HMI visualization is implemented using WinCC, enabling intuitive monitoring and control of the process. Data acquisition and archiving are performed using a MySQL database and KepServerEx communication drivers.

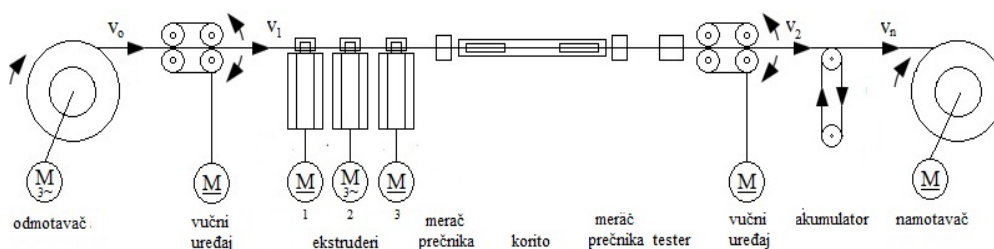
1. Uvod

Proces proizvodnje kablova kontinualnom ekstruzijom operacijama ispune i plaštiranja sastoji se iz više proizvodnih celina i tehnoloških faza. Poluproizvod koji se uvodi u liniju se sastoji od tri ili više použenih izolovanih provodnika različitih boja. Operacijom ispune upotrebom gumenih masa vrši se popunjavanje međuprostora između žila tako da kabl dobije okrugli oblik, dok se operacijom plaštiranja upotrebom pvc masa daje finalni izgled i doprinosi izdržljivosti i samogasivosti kabla. Proizvodni proces počinje od odmotavanja použenih provodnika sa doboša upotrebom odmotavača, provodnici se dalje vuku vučnim uređajima, na njih se upotrebom ekstrudera nanosi sloj ispune i plašta, prema potrebi plašt se boji, pri čemu se stalno kontroliše debljina i ovalnost a samim tim se ispituje kvalitet i na kraju se tako dobijeni finalni proizvod namotava upotrebom namotavača. U radovima [1-12] objašnjene su fizičke pojave koje nastaju usled promene zatezanja i predloženi su različiti upravljački algoritmi. Regulacija brzine i održavanje sile zatezanja rešeno je upotrebom kombinovanih metoda upravljanja sa senzorom pozicije koji je i davač pozicije (danser akumulator sistem) ili indirektno kontrole sile zatezanja. U radu je projektovan upravljački sistem koji se sastoji od novih

upravljačkih ormana za svaki deo linije ili tehnološku celinu i od novog upravljačkog sistema zasnovanog na razvijenom upravljačkom softveru koji je baziran na radovima [13-18]. Rešeno je upravljanje brzinom svakog pojedinačnog uređaja i celom linijom pri čemu se održava zadata sila zatezanja i reguliše temperatura zona ekstrudera pri dejstvu nelinearnosti koje nastaju pod uticajem sile trenja, promenljivog momenta inercije, promene prečnika doboša pri odmotavanju i namotavanju, i usled promene brzine pri ubrzavanju, usporavanju. Realizovano hardversko i softversko rešenje uspešno zamenjuje gotova rešenja [19, 20]. U elektro ormanima instalirani su konvencionalni regulatori [21, 22] za upravljanje radom pogonskih motora kojima se upravlja upotrebom PLC kontrolera i HMI preko Profinet protokola [23]. Regulacija temperatura zona ekstrudera realizovana je upotrebom PIDTemp instrukcije [17, 24] pri čemu je razvijeno rešenje koje uzima u obzir termičku spregu između zona ekstrudera. Veličina termička sprege određena je na osnovu identifikacije modela zona a ovaj uticaj je uzeti pri istovremenom podešavanju parametara regulatora za upravljanje grejanjem i hlađenjem [15, 25]. Urađen je i deo softvera za istovremeno i pojedinačno podešavanje parametara regulatora zona ekstrudera koji se jednostavno poziva sa HMI panela. Softver za PLC i HMI je napisan u softverskom paketu TiaPortal V15.1. Softver za PLC kontroler je pisan u LAD, STL i SCL jeziku, a ekrani za HMI su razvijeni upotrebom TIA Portal WinCC softverskog alata.

2. Delovi i tehnološke celine linije. Princip rada

Na sl. 1 prikazana je blok šema ekstruzione linije za ispunu, plaštiranje i bojenje sa dva vučna uređaja za koju je projektovan upravljački sistem. Materijal (použeni provodnici) koji se obrađuje ujedno je i veza između uređaja, odmotava se upotrebom odmotavača, vuče se vučnim uređajima i namotava na namotavače [26-28].



Slika 1. Principijelna blok šema ekstruzione linije za ispunu i plaštiranje

Prikazana linija ima tri zone zatezanja, u kojima se reguliše brzina i sila zatezanja [16, 17] i to su:

- Zona I, sastoji se od odmotavača i ulaznog vučnog uređaja,
- Zona II, sastoji se od ulaznog i izlaznog vučnog uređaja,
- Zona III, sastoji se od izlaznog vučnog uređaja, akumulatora i namotavača.

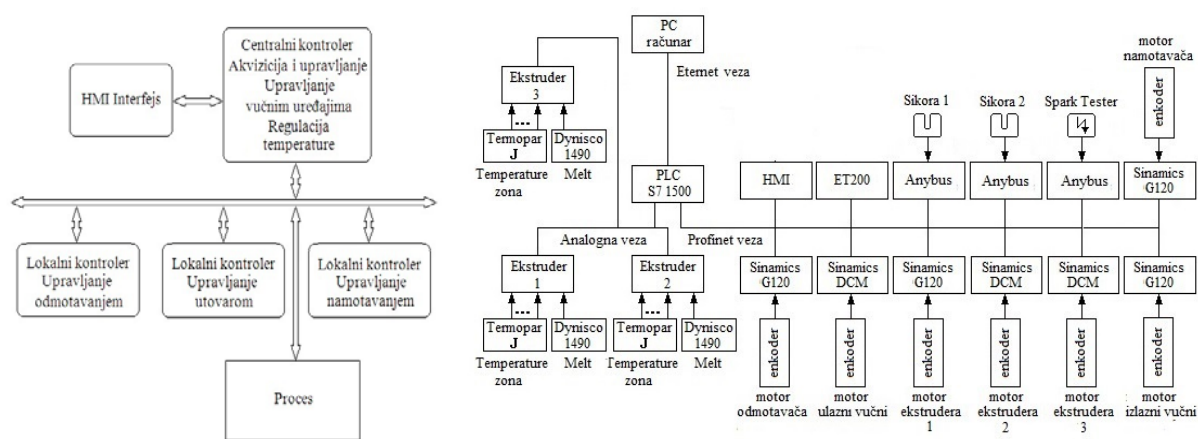
Tehnološki proces kontinualne ekstruzije počinje od odmotavanja použenih izolovanih žila ili provodnika. Utovar doboša vrši se sistemom za podizanje i spuštanje, pomeranje pinola levo-desno. Odmotavači su centralnog tipa, doboš sa jezgrom dobija pogon preko centralnog vratila upotrebom pogonskog motora i reduktora.

Glavni uređaj linije je ulazni vučni uređaj, na njegovu brzinu sinhronizovani su svi uređaji linije. Vučni uređaji (ulazni i izlazni) imaju identične kinematske karakteristike i pogone se motorima istih karakteristika. Glavni delovi vučnih uređaja su pogonski motor, enkoder ili tahogenerator, reduktor, menjač, pogonsko vratilo, gornja i donja gusenica. Materijal koji se obrađuje (vuče) postavlja se između gusenica. Dovođenjem signala za upravljanje i za brzinu na regulator koji upravlja pogonskim motorom postiže se pomeranje gusenica vučnih uređaja kojima se provodnik vuče brzinom koja

odgovara zadatom signalu. Po izlasku iz vučnog uređaja použene žile se uvode u ekstrudere. Ekstruderi su sa jednim pužem [28, 29] odnosa 18 L/D (dužina/prečnik cilindra) za ispunu i 24 L/D za plašt, pogone se jednosmernim ili asinhronim motorima a regulišu se regulatorima na koje se dovode odgovarajući signali za upravljanje radom i brzinom. Hranjenje ekstrudera vrši se upotrebom gumenih i PVC masa u obliku granula, koje se uređajima za utovar i doziranje uvode u koševe odakle slobodnim padom dolaze do ulaza u cilindar ekstrudera. Masa se dalje pod dejstvom puža koji obrtanjem stvara pritisak transportuje kroz cilindar, zagreva sistemom za grejanje i pretvara u tečni rastop. Tako rastopljena masa dolazi u glavu ekstrudera na kojoj je namontiran alat. Upotrebom posebno konstruisanih alata rastop se nanosi na použeni provodnik. Prvo se uradi ispunu, tako se dobije kružni oblik a zatim se kabl sa nanesenom ispunom uvodi u ekstruder za plašt i istim postupkom kao u slučaju ispune vrši nanošenje plašta. Pri izradi kablova koji se boje u proces se uključuje i treći ekstruder koji se spaja sa glavom ekstrudera za plaširanje pri čemu se u masu plašta ubacuje i masa za bojenje. Po izlasku kabla iz sistema ekstrudera kabl se uvodi u temperirano korito za hlađenje na čijem izlazu ispunu i plašt kabla očvrstne. Slojevi materijala koji se nanose na použene provodnike treba da su konstantne debljine pod uslovom da se pravilno održava brzina linije i sila zatezanja. Signal dobijen merenjem debljine izolacije koristi se dvojako. Kao kompenzacija upravljačkog signala brzine ekstrudera i služi za prikaz debljine nanesenog sloja mase. U zavisnosti od razlike između zadate i merene vrednosti debljine formira se parametar čijim uticajem se koriguje brzina obrtanja puževa ekstrudera. Kabl se dalje kreće do izlaznog vučnog uređaja i ulazi u akumulator danser sistem. Akumulator danser sistem se sastoji od nepokretnih i pokretnih rolni, sistema za kompenzaciju pomeraja i davača pozicije donjih pokretnih rolni. U opsegu regulacije radi kao klasičan danser, prima na sebe promenu brzine koja nastaje usled razlike linijske brzine ispred i iza i apsorbuje je, a u drugom opsegu služi da akumulira određenu dužinu i tako omogućiti nesmetan rad linije bez zaustavljanja pri zameni doboša. Na kraju gotov kabl se namotava na namotavač koji je iste konstrukcije kao i odmotavač, uz dodatni sistem ređanja [26-29]. Uređaji na liniji se pogone jednosmernim i asinhronim motorima koji se regulišu konvencionalnim regulatorima. Dovođenjem signala za upravljanje, brzinu i silu zatezanja na regulator koji upravlja pogonskim motorima vrši se regulacija rada uređaja linije.

3. Opis hardverskog i softverskog rešenja

Centralnim sistemom za nadzor i upravljanje linijom sl. 2. ostvarena je veza svih upravljačkih i merno akvizicionih uređaja u jedinstvenu celinu na osnovu tehničkih i tehnoloških zahteva. Upravljački sistem se sastoji od glavnog HMI panela i PLC-a kojim se upravlja brzinom, silom zatezanja kabla, temperaturom ekstrudera pri čemu je omogućeno jednostavno praćenje svih parametara procesa kao i njihov zapis u odgovarajuće tabele baze podataka u realnom vremenu upotrebom PC-a i odgovarajućih drajvera za komunikaciju.



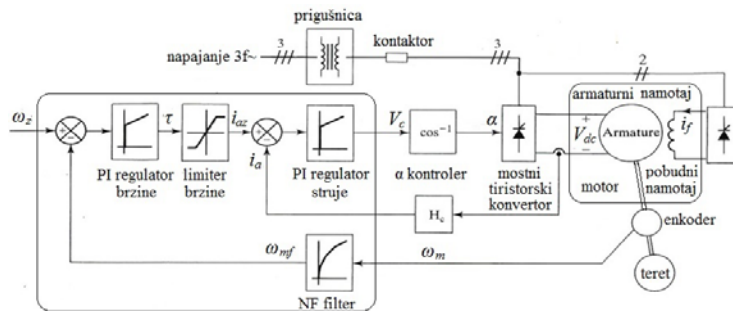
Slika 2. Blok šema upravljačkog sistema (levo).

Blok dijagram Profinet veze upravljačkih i merno akvizicionih uređaja (desno)

Upravljački sistem sastavljen je od glavnog PLC-a Siemens S7 1500 serije 1516-2PN/DP, periferija ET200SP serije 1512SP-1PN [30], panela na glavnom komandnom pultu HMI 1500 Comfort serije, panela na namotavanju HMI KTP 400 Basic serije, Sinamics DCM konvertora serije 6RA8025 i 6RA8078 za DC motore i Sinamics invertora serije G120 CU240E-2PN za AC motore. PLC S7 1500 vodi ceo proces, smešten je u glavnom upravljačkom ormanu. Tehnološke celine odmotavanja, vuče, namotavanja koriste ET200 periferije, konvertore i invertore za upravljanje motorima smeštene u ormane duž linije. Utovarom gume i pvc mase upravlja se zasebnim sistemom firme Motan METRO HES [31]. Kontrola debljine i ispitivanje probija izolacije vrši se uređajima firme Sikora Laser and Spark tester [32, 33]. Nadgledanje, nadzor, praćenje i zadavanje parametara procesa vrši se preko glavnog i pomoćnog HMI panela. Nadzor i zadavanje parametara namotavača obavlja se preko lokalnog HMI. Svi diskretni i analogni signali za upravljanje uređajima zamenjeni su signalima koji se prenose preko Profinet mreže (sl. 2). Svaki uređaj od PLC-a do regulatora ima jedinstvenu statičku IP adresu i broj kojim se identifikuje [23, 34]. Na sl. 3 prikazana je konfiguracija Profinet mreže. Upravljanje i komunikacija sa konvertorima i invertorima vrši se upotrebom Profinet protokola preko telegrama 352. Uređaji za merenje prečnika i kontrolu probija izolacije kao i ostale periferije su uz pomoć AnyBus Communicator uređaja firme HMS Networks povezane na Profinet [34]. Kontroler za utovar i doziranje mase je povezan diskretnom analognom vezom sa glavnim PLC kontrolerom. Upravljački softver na glavnom PLC i ET200 periferiji se sastoji od više rutina koje su pisane u LAD, STL i SCL jeziku i to od glavne rutine, rutina za indikaciju, rutina za rad sa HMI panelima, regulaciju temperature ekstrudera, rutine za upravljanje brzinom linije i zatezanjem, rutine za analogne signale i skaliranje signala i rutine za komunikaciju.

3.1. Postupak podešavanja DC i AC konvertora

Nakon fizičkog ožičavanja upravljačkog sistema linije, provere svih veza, pri prvom puštanju napona podešeni su parametri DC konvertora i AC invertora prema uputstvima proizvođača regulatora [21, 22] upotrebom BOP panela ili StartDrive alata iz TIAPortal [35], a prema zadatom načinu upravljanja i parametrima pogonskih motora. Za DC konvertore i AC invertore [36, 37] izvršena je optimizacija upotrebom optimizacionih rutina pri čemu su podešene zatvorene petlje za upravljanje strujom pobude, strujom armature i brzinom motora u zavisnosti od izabranog načina rada (brzinski ili moment režim). Tako je upotrebom gotovih procedura optimizacije izvršeno podešavanje α kontrolera za upravljanje uglom okidanja tiristora i izvršeno početno podešavanje parametara kaskadnih regulatora motora svih pogona linije odnosno PI regulatora brzine kao spoljne i PI regulatora struje kao unutrašnje petlje (sl. 3).



Slika 3. Blok šema kaskadne upravljačke petlje regulatora i veze DC konvertora sa motorom

Nakon toga upotrebom TIAPortal alata definisane su upravljačke komande, signali, statusne vrednosti između PLC kontrolera, konvertora i invertora upotrebom Profinet 352 telegrama od 6 reči za slanje upravljačkih i prijem statusnih podataka. Svakom od regulatora dodeljene su statičke IP adrese i brojevi kojima se identifikuje uređaj (hardware identifier) [23]. Telegram za slanje upravljačkih signala definisan je redom sledećim rečima: word1=komandna reč (start, stop, smer,...), word2=zadana brzina uređaja (zadana referenca brzine), word3=zadana sila zatezanja (zadana referenca sile zatezanja), word4=trenutni prečnik (prečnik doboša), pri čemu su reči 3 i 4 definisane samo za regulatore odmotavača i namotavača, a reči 5, 6 se ne koriste. Telegram za prijem statusnih reči definisan je redom: word1=status bitovi (startovan, stopiran, promena smer, fault, alarm,...), word2=trenutna brzina, word3=trenutna struja, word4=trenutni moment motora, word5=aktivni alarm, word6=aktivna greška.

Za potrebe upravljanja izlaznim vučnim uređajem, odmatanjem, namatanjem kao i određivanje koeficijenata termičkih sprega između zona ekstrudera izvršena je identifikacija prenosnih funkcija sistema regulator, motor, uređaj i prenosnih funkcija zona u obliku funkcije prenosa FOPDT (1) [38]. Matematički modeli motora aproksimirani su funkcijom prenosa (2), model regulatora funkcijom prenosa (3), pri čemu ulazni signal predstavlja upravljački signal iz PLC regulatora prema ulazu regulatora a izlazni signal je signal brzine dobijen na osnovu vrednosti izlaza iz regulatora (konvertora ili invertora). Matematički modeli su dobijeni na osnovu prikupljenih podataka upotrebom PLC kontrolera, KepwareEX servera i odgovarajuće baze u koju su podaci upisani u obliku $(u(n), y(n))$ gde je $u(n)$ zadana i $y(n)$ trenutna vrednost brzine uzorkovana periodom odabiranja T_s , a trenutak uzorkovanja je dat kao $t=nT_s$ [39]. Funkcija prenosa (1) FOPDT modela konvertovana je u diskretni vremenski domen i dobijen je ARX model (eng. *Auto Regressive with Exogenous input model*) [40, 41]. Aproksimacijom prvog izvoda korišćenjem diferenciranja unazad dobijena je zavisnost (4).

$$G_r(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{1+sT} e^{-Ls} \quad (1)$$

$$W_r(s) = \frac{k_r}{1+sT_r} \quad (2)$$

$$W_m(s) = \frac{k_m}{1+sT_m} \quad (3)$$

$$y(n) = ay(n-1) + bu(n-1-d) + e(n) \quad (4)$$

Sređivanjem jednačine (4) i upotrebom jednačine (5) određujemo vektor parametara θ primenom LS (eng. *Least Square*) metode estimacije (6) pri čemu je uzeto da je $n > d+1$, a vremenu kašnjenja odgovara d perioda T_s .

$$Y = \begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n-1) & u(n-1-d) \\ y(n) & u(n-d) \\ \vdots & \vdots \\ y(N-1) & u(n-1-d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(n-1) \\ e(n) \\ \vdots \\ e(N-1) \end{bmatrix} = \Phi \theta + E \quad (5)$$

$$\hat{\theta} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi Y = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Kako je pogon jako zašumljena sredina desilo se da matrica Φ bude loše uslovljena pa je upotrebljena RLS (eng. *Requursive Least Square*) metoda identifikacije ili se podaci prethodno propuste kroz niskopropusni filter pre primene LS metode. Po dobijanju procenjenih vrednosti vektora parametara $\hat{a}$ i $\hat{b}$ izračunate su vrednosti za T , k a vrednost za L dobijena je brojanjem broja d perioda odabiranja T_s od nulte vrednosti do pojave signala na osnovu (8).

$$T \approx \frac{\hat{a}T_s}{1-\hat{a}}, \quad k \approx \frac{\hat{b}}{1-\hat{a}} \quad (7)$$

$$L \approx dT_s \quad (8)$$

3.2. Regulacija brzine i sile zatezanja

Pri izradi softvera za upravljanje brzinom i silom zatezanja vodilo se računa o zonama zatezanja, pri čemu su uzete sledeće činjenice:

1. Vučni uređaj je master uređaj, njegova brzina se zadaje blokom kojim je realizovana rampa,
2. Brzina ulaznog vučnog uređaja je konstantna, ostali uređaji se sinhronišu u odnosu na nju,
3. Materijal koji se obrađuje je sa velikim Jangovim modulom elastičnosti (bakar ili aluminijum),
4. Ulazni i izlazni vučni uređaj su identičnih mehaničkih karakteristika,
5. Akumulator danser sistem je vertikalalan, tako da je kabl sa obe strane paralelan,
6. Prečnik doboša na namotavanju i odmotavanju se računa iz softvera,
7. Veličina signala za kompenzaciju zatezne sile pri ubrzanju, se zanemaruje,
8. Kompenzacija trenja vrši se upotrebom gotovih opcija konvencionalnih regulatora,

Za upravljanje brzinom linije, brzinom uređaja i silom zatezanja použenih provodnika razvijen je softver koji se sastoji iz više rutina, glavne rutine (OB1) iz koje se pozivaju ostale rutine, funkcije (FC) ili funkcijski blokovi za realizaciju rampe, start stop logike, izračunavanje promene prečnika doboša, izračunavanje veličine promene momenta inercije, kompenzaciju brzine ekstrudera, izračunavanje upravljačkih signala brzine, momenta i sile zatezanja, rutine za podešavanje parametara PLC-a pri prvom uključenju (OB100) i rutina kojima su realizovani prekidi (OB30) [18].

Za upravljanje brzinom napisana je rutina kojom je realizovan signal rampe. Blok rampe napisan je u funkcijskom bloku FC10 u SCL jeziku i zajednički je za sve uređaje, njime se generiše signal rampe (ubrzanje, usporenje), deo rutine dat je na sl. 4. Vrednosti vremena usporjenja ubrzanja zadaju se preko glavnog HMI panela i upisuju se u promenljive Time_Ubrzanja, Time_Usporenja. Signal 0-10V sa potenciometra za zadavanje brzine linije se skalira upotrebom instrukcija NORM_X i SCALE_X. Izlaz iz SCALE bloka se upisuje u promenljivu Max_Vrednost funkcijskog bloka rampe. Za ispravan rad funkcijskog bloka FC10 urađeno je merenje trajanja sken ciklusa celog programa PLC-a upotrebom instrukcija RUNTIME i RT_INFO [18].

```

1 // Rampa Linije //
2 //IF $MEG_Time > 0 THEN
3   $Odnoš_Ubrz := $Max_analog / $Time_Ubrzanja;
4   $R_plus := $Odnoš_Ubrz * ($MEG_Time / 100000); // (DWORD_TO_REAL($MEG_Time));
5 //END_IF;
6 $Odnoš_Uspo := $Max_analog / $Time_Usporenja;
7 // IF $MEG_Time > 0 THEN
8   $R_minus := $Odnoš_Uspo * ($MEG_Time / 100000); // (DWORD_TO_REAL($MEG_Time));
9 // END_IF;
10
11 (*
12  Komentar
13  *)
14 IF $Aktivna THEN
15   $Jumper := 10;
16 ELSE
17   $Aktuelna_vred := #Null;
18 END_IF;
19
20 IF $Jumper = 10 THEN
21   REGION praprema0
22   IF $R_plus > 0 THEN
23     $Jumper := 20;
24   ELSEIF $R_plus < 0 THEN
25     $R_plus := $R_plus * (-1);
26     $Jumper := 20;
27   ELSE
28     $R_plus := 1.0;
29     $Jumper := 20;
30   END_IF;
31   END_REGION
32 END_IF;

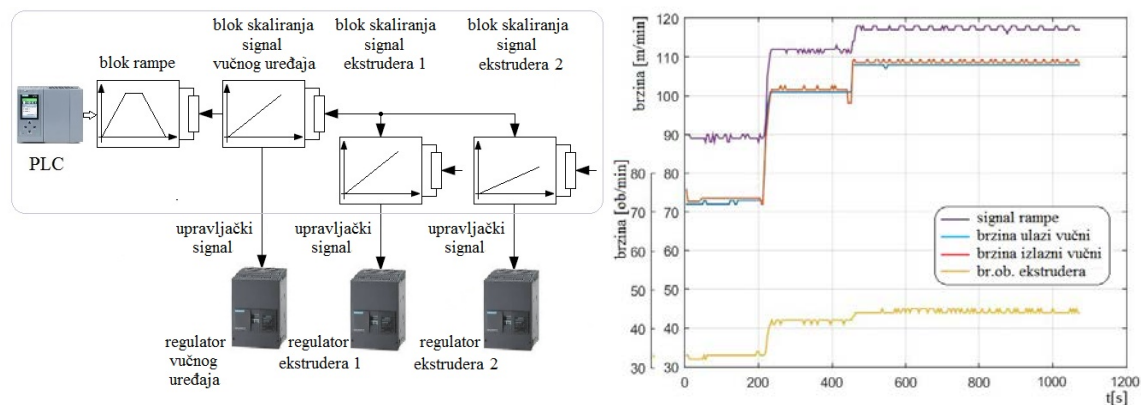
```

Slika 4. Deo koda funkcijskog blok za realizaciju signala rampe

Regulacija sile zatezanja na odmotovanju realizovana je prema principu otvorene petlje regulacije momenta sa limitom maksimalne brzine [16-18], za koji je napisan poseban funkcijski blok (FB11) upotrebom SCL jezika. Njime se izračunava prečnik doboša i na osnovu zadate sile zatezanja zone izračunava se upravljački signal momenta koji se sa izlaza analognog modula PLC šalje na Sinamics G120 inverter [17]. Za potrebe izračunavanja trenutne vrednosti prečnika doboša preko HMI panela unosi se debljina materijala d koji se namotava, b širina, unutrašnji prečnik D_{min} i spoljni maksimalni prečnik doboša D_{max} koji je utovaren na namotavaču. Trenutna vrednost prečnika izračunava se prema jednačini (9) gde je $D(0)=D_{max}$, a $D(i)$ trenutni prečnik, pri čemu i označava broj rotacija doboša. Signal za kompenzaciju momenta inercije usled promene prečnika na odmotavanju se računa iz softvera.

$$D(i) = D(i-1) - i2d \quad (9)$$

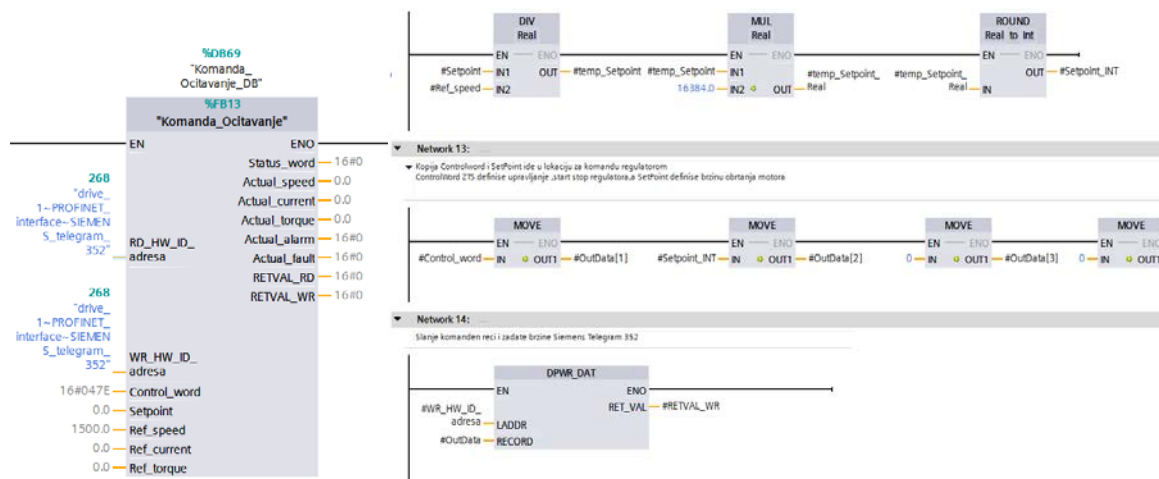
Upravljanje brzinom ulaznog vučnog uređaja i ekstruderima realizovano je upotrebom kaskadne sprege PI regulatora brzine i PI regulatora struje (TML) koje su implementirane u Sinamics DCM konvertorima. Na ulaze regulatora dovode se analogni signali koji su dobijeni na bazi napisanog softvera kojim se generišu signali za sinhronizaciju brzine i sile zatezanja.



Slika 5. Princip sinhronizacije brzine svih uređaja (levo).
Realizacija upravljačkih signala linije (desno)

Princip sinhronizacije brzine svih uređaja realizovan je logikom u PLC-u. Signali zadate brzine uređaja i ekstrudera zadaju se upotrebom HMI panela ili potencijometrima koji su povezani na odgovarajuće ulaze analognih kartica [18]. Tako dobijene vrednosti signala uvode se u PLC kontroler (sl. 5 levo) i na osnovu odnosa koji je napravljen kao odnos između željenog signala brzine uređaja i signala rampe pravi se referentni signal za regulator izabranog uređaja koji se dalje obrađuju u funkcijskom bloku Komanda_Očitavanje FB13 a koji se poziva iz glavnog programa OB1. Njime se upravljački signali šalju prema odgovarajućim regulatorima preko Profinet mreže. Na sl. 5. desno prikazani su signali trenutnih vrednosti realizovane rampe, brzine ulaznog, izlaznog vučnog uređaja i brzina obrtanja puža ekstrudera.

Start, stop logika vučnih uređaja i ekstrudera realizovana je upravljačkim softverom napisanim na osnovu upravljačke logike i aktuelnih vrednosti signala sa tastera za start, stop i estop vezanih na odgovarajuće diskretne module PLC kontrolera. Diskretni signali za start stop se takođe obrađuju u funkcijskom bloku FB13 i pripremaju za slanje prema adresiranom regulatoru. Na sl. 6. prikazan je FB13 i deo softvera za slanje i očitavanje upravljačkih signala i statusnih vrednosti. Kontrolna reč ima vrednost 047e hex što znači da je regulator tog uređaja spreman za start. Kada se startuje preko HMI ili sa tastera kontrolna reč dobije vrednost 047F i motor tog uređaja startuje [21-23].



Slika 6. Deo koda bloka FB13 za prijem i slanje kontrolnih i statusnih reči preko Profinet mreže

Istim principom generišu se signali za bilo koji uređaj linije. Očitavanje vrednosti brzine, struje, momenta, statusne reči, aktuelne vrednosti faulta i alarma se obavlja na sličan način upotrebom Profinet protokola. Aktuelne vrednosti u realnom vremenu prikazuju se na HMI panelu za svaki uređaj.

U zoni II upravlja se vučnim uređajima čije se dinamičko ponašanje opisuje jednačinama (10) gde su J_{mi} i J_{mo} momenti inercije, B_{mi} i B_{mo} koeficijenti viskoznog trenja, τ_{coi} i τ_{co} kulonovo trenje, τ_{ai} i τ_{ao} moment ubrzanja-usporavanja ulaznog i izlaznog vučnog uređaja sveden na vratilo pogonskih motora, respektivno, τ_i i τ_o su moment motora ulaznog i izlaznog vučnog uređaja, r je poluprečnik pogonskih točkova gusenica, F je sila zatezanja, N_r prenosni odnos reduktora, v_1 i v_2 perifernjske brzine koje su ujedno i brzine linije koje odgovaraju brzinama ulaznog i izlaznog uređaja. Jednačina (11) opisuje ponašanje provodnika između vučnih uređaja upotrebom viskozno elastičnog modela (Voight model) gde je E modul elastičnosti, C je koeficijent prigušenja materijala, S površina poprečnog preseka provodnika i L rastojanje između uređaja [17, 18].

$$J_{mi} \dot{\omega}_{mi} = \tau_i - \tau_{coi} - \tau_{ai} - Fr - B_{mi} \omega_{mi}$$

$$J_{mo} \dot{\omega}_{mo} = \tau_o - \tau_{coo} - \tau_{ao} + Fr - B_{mo} \omega_{mo}$$

$$v_1 = \frac{r}{N_r} \omega_{mi}$$

$$v_2 = \frac{r}{N_r} \omega_{mo}$$

$$\tau_{co} = f_{co} \operatorname{sgn}(\omega_m)$$

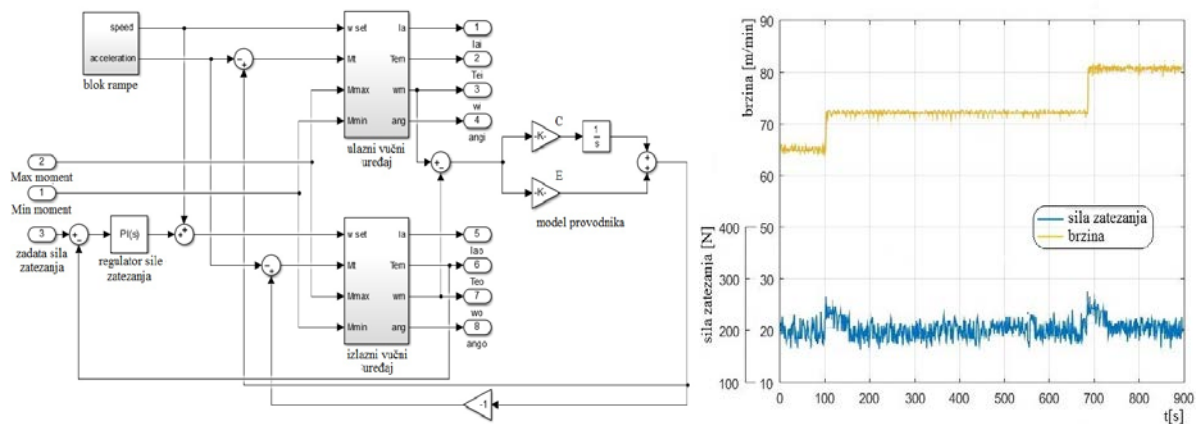
$$F = \frac{ES}{L} (v_2 - v_1) + \frac{CS}{L} \frac{d}{dt} (v_2 - v_1) \quad (10)$$

$$F = \frac{ES}{L} (v_2 - v_1) + \frac{CS}{L} \frac{d}{dt} (v_2 - v_1) \quad (11)$$

Upravljanje brzinom ulaznog i izlaznog vučnog uređaja i silom zatezanja provodnika relizovano je kao na sl. 7 levo primenom metode direktne kontrole zatezanja [17, 18] upotrebom PI regulatora za regulaciju sile zatezanja (10) pri čemu se kao senzor trenutne sile zatezanja koristi signal proporcionalan trenutnoj vrednosti struje pogonskog motora dobijen iz DC regulatora izlaznog vučnog uređaja, koji je ujedno proporcionalan i momentu [18]. Kompenzacija momenta trenja se vrši u regulatorima Sinamics. PI regulator sile zatezanja realizovan je softverski u PLC-u upotrebom PID Compact bloka (12) [16] za $a=b=c=1$, pri čemu je izvršeno prilagođavanje parametara k_p i T_i .

$$y = k_p \left[(bw - x) + \frac{1}{T_i s} (w - x) + \frac{T_d s}{aT_d s + 1} (cw - x) \right] \quad (12)$$

Na sl. 7. desno prikazana je promena sile zatezanja pri promeni brzine ulaznog vučnog uređaja.



Slika 7. Blok šema metode direktne kontrole zatezanja (levo).

Zavisnost promene sile zatezanja od vremena (desno)

Zona II predstavlja i procesnu zonu u kojoj se nalaze ekstruderi. Pogonskim motorima ekstrudera upravlja se upotrebom DC konvertora koji rade u I i IV kvadrantu, odnosno upravlja se brzinom obrtanja puževa ekstrudera. Princip sinhronizacije brzine objašnjen je na sl. 3 i realizovan logikom u PLC kontroleru. Na osnovu vrednosti signala rampe i signala sa potencijometara a na osnovu upravljačkog softvera preračunavaju se vrednosti upravljačkih signala. U kolo regulacije broja obrtaja puža ekstrudera implementirana je kompenzaciona petlja sa uređaja koji meri debljinu nanesenog sloja ispune ili izolacije.

Regulaciju brzine obrtanja doboša na namotavaču, odnosno sinhronizacija periferijske brzine doboša sa brzinom izlaznog vučnog uređaja u zoni III urađena je metodom kompenzacije brzine u-

potrebom akumulatora koji u opsegu regulacije radi kao danser pri čemu je sila zatezanja proporcionalna trenutnoj pozicije donjih rolni. Primenjenja je adaptivna promena parametara regulatora (k_p , T_i , T_d) sa uključenjem, isključenjem I, D dejstva u zavisnosti od trenutne pozicije dansera [14] upotrebom PID regulatora (1) koji radi kao pozicioni regulator i realizovan je u PLC kontroleru upotrebom PID_Compact instrukcije (12). Signal upravljanja iz PID regulatora se sabira sa vrednošću upravljačkog signala regulatora za brzinu ulaznog vučnog uređaja linije i kao takav vodi na ulaz Sinamics DC konvertora [18]. Kompenzacija gubitaka nastalih usled trenja urađena je upotrebom funkcije za kompenzaciju trenja koja je aktivirana pri prvom podešavanju regulatora Sinamics DCM regulatora. Kompenzacija momenta koji se javlja pri ubrzanju ili usporanju se ne vrši jer se linija pokreće i zaustavlja po rampi.

3.3. Temperaturna regulacija ekstrudera

Upravljanje grejanjem i hlađenjem odnosno regulacija temperatura zona ekstrudera realizovano je upotrebom PID_Temp instrukcije sa izlazom oblika impulsno širinske modulacije (PWM) pri čemu je početna konfiguracija parametara svih zona urađena upotrebom TIA Portal softvera. Parametri svake zone smešteni su u zasebne data blokove (DB). Za svaku zonu ekstrudera napravljena je po jedna istanca PID_Temp instrukcije sl. 8. Sve instance su smeštene u OB30 bloku (Cyclic Interrupt) radi periodičnog poziva [15]. Perioda poziva podešena je na 100ms. Trenutna temperatura zona ekstrudera dobija se preko termoparova tipa J, koji su vezani na analogne module PLC kontrolera AI 8xU/I/RTD/TC. Na izlazu instrukcije prema zadatim podešenjima generiše se PWM signal za koje je podešena perioda i faktor ispune, a koji na osnovu softvera za upravljanje temperaturom aktivira izlaze izlaznih diskretnih modula PLC kojima se uključuju i isključuju SSR (Solid State Relay) za grejače (grejanje zona) i ventilatore (hlađenje zona). U okviru jedne PID_Temp instance integrisana su dva gotova algoritma podešavanja Pretuning i Fine Tune. Za upotrebu njihovih funkcija potrebno je ili poznavanje TIAPortal softvera i posedovanje licence, ili korišćenje gotovog softvera. U radu je razvijen i napisan i deo softvera za PLC i urađeni su HMI ekrani čijom upotrebom su podešeni parametri zona i omogućeno izvođenje algoritama za podešavanje parametara regulatora temperatura jednostavnim pozivom sa odgovarajućih HMI ekrana.

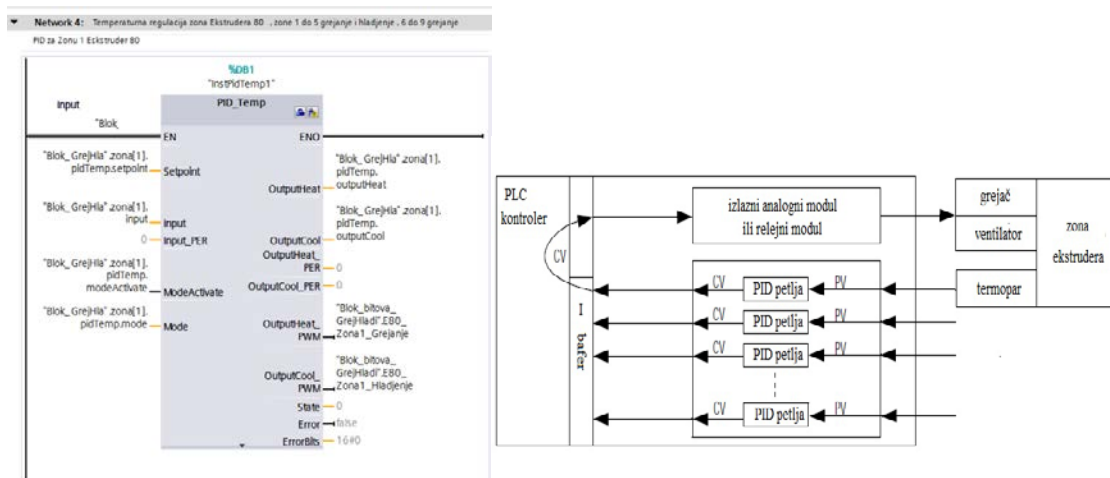
PID_Temp pristup regulacije temperature ne uzima uticaj termičke sprege između zona pa je razvijen i deo softvera kojim je i taj problem rešen. Za određivanje uticaja i veličine termičke sprege između zona urađena je identifikacija modela svih zona ponaosob i identifikacija zona pri zagrevanju posmatranih zona upotrebom FOPDT modela (1). Određen je uticaj zone ispred ($j-1$) i iza ($j+1$) u odnosu na posmatranu (j) zonu (13), gde su redom $W_{objj}(s)$ funkcija prenosa j -te zone, $T_{zj}(s)$, $T_{z(j+1)}(s)$, $T_{z(j-1)}(s)$ su redom temperature zona j , $j-1$ $j+1$, $U_j(s)$ signal upravljanja temperaturom j te zone, a $k_{z(j-1),j}$ i $k_{z(j+1),j}$ koeficijenti međusobnog termičkog uticaja $j-1$ i $j+1$ zone na j -tu zonu [15, 17].

$$T_{zj}(s) = W_{objj}(s) \left(U_j(s) + k_{z(j-1),j} T_{z(j-1)}(s) + k_{z(j+1),j} T_{z(j+1)}(s) \right) \quad (13)$$

Radi još preciznije regulacije u softveru je dodata mogućnost da se izborom upravljanja preko HMI ekrana uključi adaptacija termičke sprege zona u smislu promene koeficijenta termičke sprege uticaja zone j na zonu $j+1$ pod uticajem temperaturnog gradijenta nastalog pri kretanju mase kroz cilindar. Softverom koji je razvijen za poziv automatskog podešavanja parametara zona sa HMI panela testiraju se uslovi za poziv i uključivanje Pretuning i Fine tune podešavanja.

Jedan od uslova je da zadate temperature zona moraju biti veće od trenutne postignute temperature. Pre uključivanja odabira se mod rada PID neaktivan za zone nad kojima se izvodi podešavanje i to da se softverom prvo uključuje pretuning grejanja, pri čemu se zabrani uključivanje hlađenja, da se

ne desi da jedna od zona radi podešavanje parametara grejanja a susedna zona radi podešavanje parametara hlađenja. U koliko nisu ispoštovani uslovi procedura Pretuninga ne može da počne. Deo softvera napisan u SCL za pretunig zona dat na sl. 9.



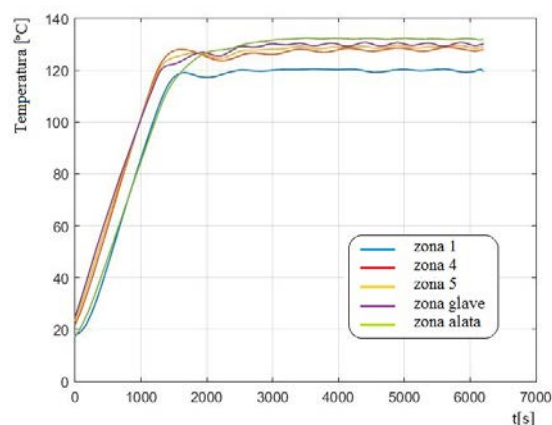
Slika 8. Poziv instance zone PID_Temp instrukcije

```

IF... CASE... FOR... WHILE... (*...*) REGION
2 IF ($statStep = 0) THEN
3   REGION OpreHeat
4     //Uključenje SUP pretuninga
5     IF ($start = TRUE) THEN
6       #done := FALSE;
7       #busy := TRUE;
8       #error := FALSE;
9       #status := 0;
10
11      // setovanje DisableCooling = TRUE za sve kontrolere sa aktiviranim hlađenjem
12      #instPidTemp2.DisableCooling := #instPidTemp2.Config.ActivateCooling;
13
14      // setovanje PIDSelfTune.SUT.AdaptDelayTime = 0 za sve kontrolere
15      #instPidTemp2.PIDSelfTune.SUT.AdaptDelayTime := 0;
16
17      // iniciraj pretuning za grejanje za sve kontrolere ,
18      // prvo unesi željeni setpoint i uključi start Heat.EnableTuning na TRUE za pretuning grejanja za sve kontrolere
19      // i zabrani start pretuninga hlađenja Cool.EnableTuning na FALSE za sve kontrolere
20      // zatime ubaci u parameter mode = 1 (PRETUNING) i aktiviraj sa modeActivate na TRUE
21      // procedurom iznad je uključen Pretunig za sve zone
22      // ocekaj da sve zone završe Pretuning za sve zone
23      #instPidTemp2.Heat.EnableTuning := TRUE;
24      #instPidTemp2.Cool.EnableTuning := FALSE;
25
26      #zones[2].pidTemp.mode := #PRETUNING;
27      #zones[2].pidTemp.modeActivate := TRUE;
28
29      #statStep := 10;
30
31    END_IF;
32  END_REGION

```

Slika 9. Prikaz koda Pretuninga



Slika 10. Prikaz temperatura pojedinih zona posle modelovanja upotrebom Matlaba

Fino podešavanje svih zona regulisano je delom softvera za njegovo izvođenje i počinje tek kada sve zone postignu zadatu temperaturu u opsegu $\pm 5\%$ od zadate temperature. Ako je potrebno

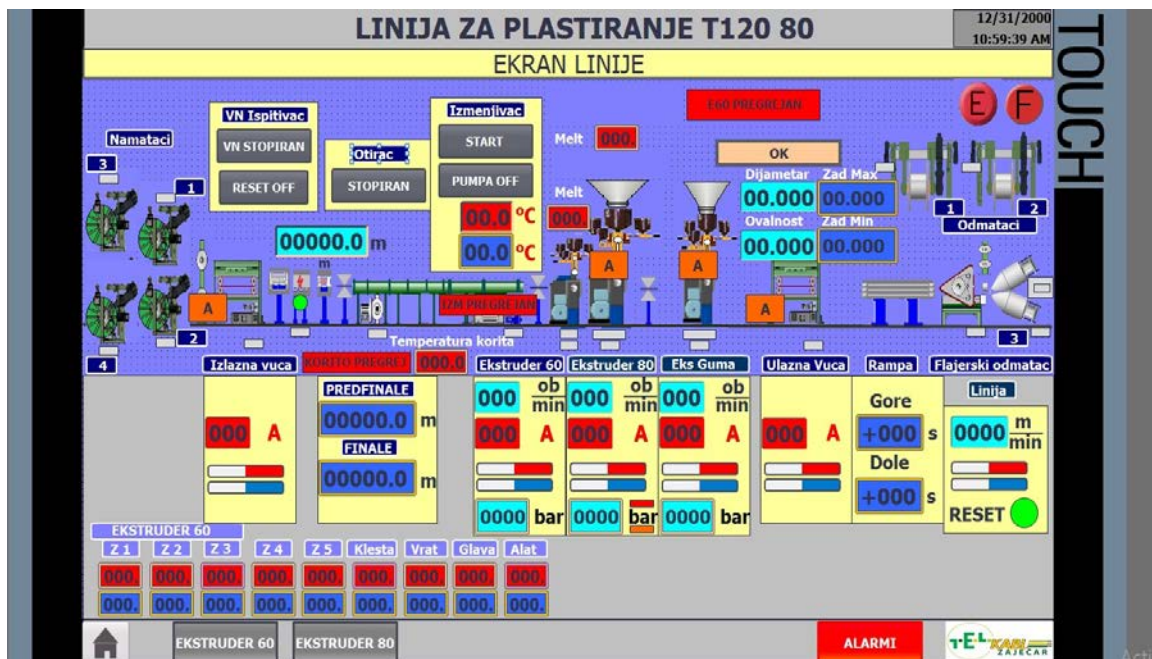
podesiti samo jednu ili više zona ponaosob, razvijen je deo softvera kojim je omogućeno pojedinačno podešavanje zona. Za zone koje se greju i prinudno hlade izvršeno je podešavanje dva različita seta PID parametara za grejanje i hlađenje. Parametri PID petlji se takođe mogu dobiti nakon izvršene identifikacije, modelovanja upotrebom Matlab okruženja i ručno uneti. Na sl. 10. prikazan je odziv na osnovu modela zona i PID parametara dobijenih upotrebom Matlab-a, koji mogu da posluže kao baza za dodatno izvršavanje procedure Fine tuning, pri čemu je potrebno popraviti odzive pojedinih zona.

4. Realizacija HMI interfejsa za nadzor i upravljanje

Upotrebom TiaPortal i WinCC softvera napisan je softver i dizajnirani su ekrani za HMI panele. Tehnološke celine i delovi linije prikazane su tako da je krajnjem korisniku sistema omogućen jednostavan interfejs za praćenje rada, zadavanje parametara, iniciranje procesa identifikacije, automatskog podešavanja parametara (tune) zona ekstrudera, praćenje signala alarma, izbor ručnog i automatskog rada postrojenja, nadgledanje trend grafova itd. Na sl. 11 prikazan je glavni ekran linije. Pritiskom na pojedine elemente otvaraju se ekrani pojedinih delova procesa sa odgovarajućim vrednostima i poljima za zadavanje parametara. Različitim bojama intuitivno su označena i signalizirana stanja opreme i delova procesa; žuta spreman za rad, crveno kvar i zeleno rad. Brzine uređaja mogu se zadavati upotrebom glavnog ili lokalnog HMI panela ili potencijometrima prema izboru načina rada (zadavanje preko HMI ili preko tastera) za brzinu linije, brzinu rada ekstrudera i glavnog vučnog uređaja a željene sile zatezanja za svaku zonu zadaju se samo preko HMI na glavnom komandnom pultu. Za vučne uređaje, ekstrudere dat je prikaz trenutnih brzina i trenutnih struja pogonskih motora, kao i kodovi grešaka i alarma regulatora motora i detaljan opis alarma. Pri pojavi greške ne nekom od uređaja, indikator greške postaje vidljiv i prikazuje se u crvenoj boji, istovremeno se u polja Fault upisuje kod nastale greške i aktivira se alarmni baner u kome se ispisuje tekstualna poruka greške. Praćenje, brzine obrtanja puža, pritiska u glavi ekstrudera, upravljanje radom ekstrudera, uključenje, isključenje ekstrudera, zadavanje i pregled temperatura zona realizovano je ekranima za rad sa ekstruderima. Na sl. 12 (levo) prikazan je ekran ekstrudera za plaširanje sa nazivom Ekran ekstrudera T80. Pritiskom na bilo koji taster u dnu ekrana prelazi se na ostale ekrane za praćenje rada linije, ostalih ekstrudera ili ekrana za konfiguraciju zona i uključenje podešavanja parametara. Vrednosti zadatih i trenutnih temperatura prikazane su u plavim i crvenim poljima i bar grafovima plave i crvene boje respektivno. Pritiskom na bilo koje plavo polje omogućeno je zadavanje željenih vrednosti temperatura zona, pri čemu je softverom ograničena maksimalna i minimalna vrednost temperature. Simbolima plavih i crvenih kvadrata koji blinkaju intuitivno su prikazana stanja grejanje ili hlađenje zona i to crveno kada je aktivno grejanje, a plavo kada je aktivno hlađenje. Prikazan je i trenutni pritisak mase u glavi ekstrudera, prekoračenje pritiska aktivira prvi i drugi alarm AL1 i AL2, pri čemu je omogućen izbor da se cela linija zaustavi pri pojavi alarma AL2 trenutno ili po rampi.

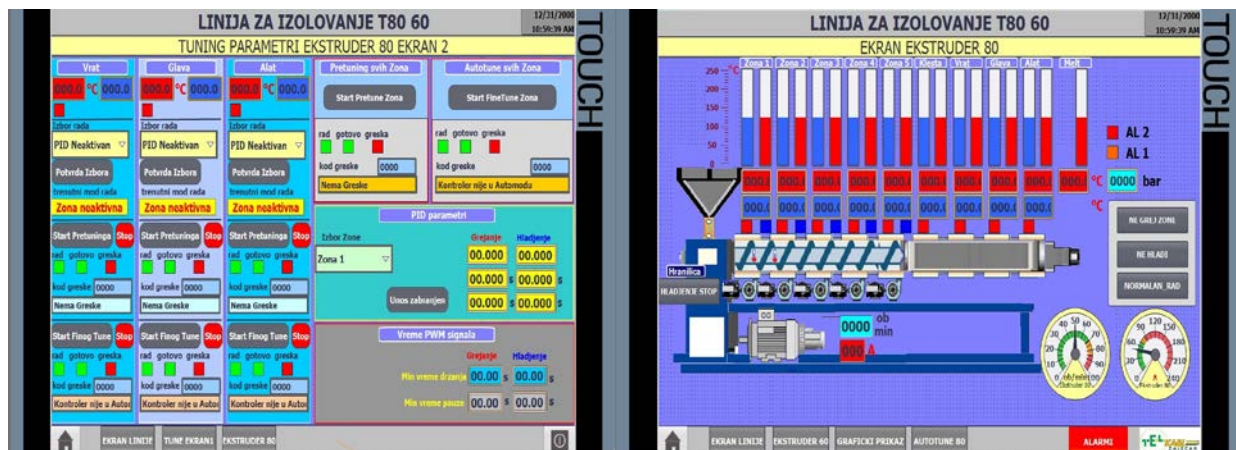
Uključenje temperaturne regulacije vrši se pritiskom na taster Grej zone, u slučaju da se iz nekog razloga ekstruder pregreje, pritiskom na taster hladi uključuje se prinudno hlađenje na svim zonama ekstrudera, taster Normalan rad služi za izbor rada automatski ili ručno. Radi intuitivnog prikaza implementirani su i indikatori sa skazaljkaama za prikaz trenutnog broj obrtaja puža ekstrudera i struje opterećenja ekstrudera. Pritiskom na taster Ekstruder 60 prelazi se na istovetni ekran ekstrudera T60 za gumenu ispunu. Pritiskom na taster Autotune 80 prelazi se na ekran izbora rada i podešavanja regulacionih petlji zona ekstrudera sl. 12 (desno). Krajnjim korisnicima i operaterima omogućen je jednostavan interfejs za promenu konfiguracije svakog modula, iniciranje identifikacije i automatskog podešavanja PID parametara regulacionih petlji zona (tuning). Za zone koje se greju i hlade

izvršeno je podešavanje dva seta PID parametara i to posebno za grejanje i za hlađenje. Oni mogu biti ručno uneti nakon identifikacije ili modelovanja ili se mogu dobiti iniciranjem tuning procedure.



Slika 11. Glavni ekran linije za ispunu i plaštiranje

Pri podešavanju određena je i veličina termičkih sprega pri čemu je eksperimentalno pokazano da je najviše izražena pri prelaznom procesu kada se kreće i do 20% nakon čega opada i kreće se oko 7% [15]. Pritiskom na taster Start Pretuninga aktivira se deo softvera za grubo podešavanje parametara regulacionih petlji zona.



Slika 12. Ekran za praćenje rada i zadavanje temperature ekstrudera (levo).

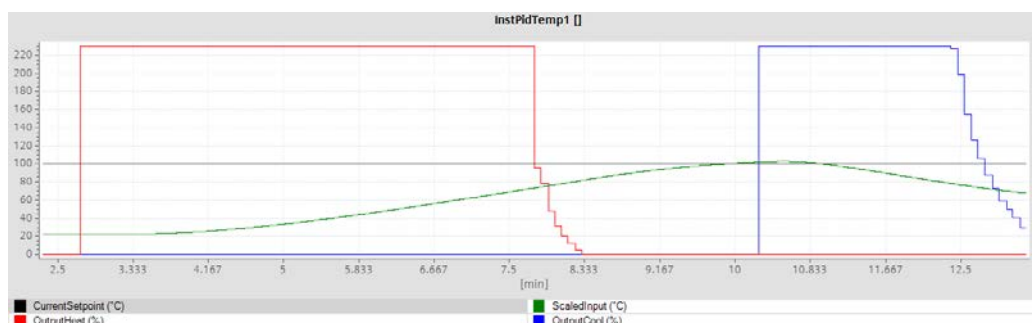
Podešavanje parametara i izbor načina rada

Softverom je omogućeno i uključivanje istovremenog podešavanja svih zona i podešavanje samo jedne zone ili više izabranih zona. Nedostatak pojedinačnog podešavanja zona ogleda se u tome što nije uzet uticaj termičke sprega. Pritiskom na taster Start Fine Tune Zona startuje se deo softvera za fino podešavanje zona. Uključuje se zelena lampica rad koja blinka sve dok se podešavanje ne završi. Kad je podešavanje završeno uključuje se lampica gotovo, a ako postoji greška u prozoru ispod se ispisuje kod greške kao i tekstualni opis greške.

Na istom ekranu omogućeno je da operator iz padajućeg menija pored opcija Pretuning, Fine tuning odabere opcije Zona neaktivna, Automatski rad, Manuelni rad. Potvrdom na taster Potvrda

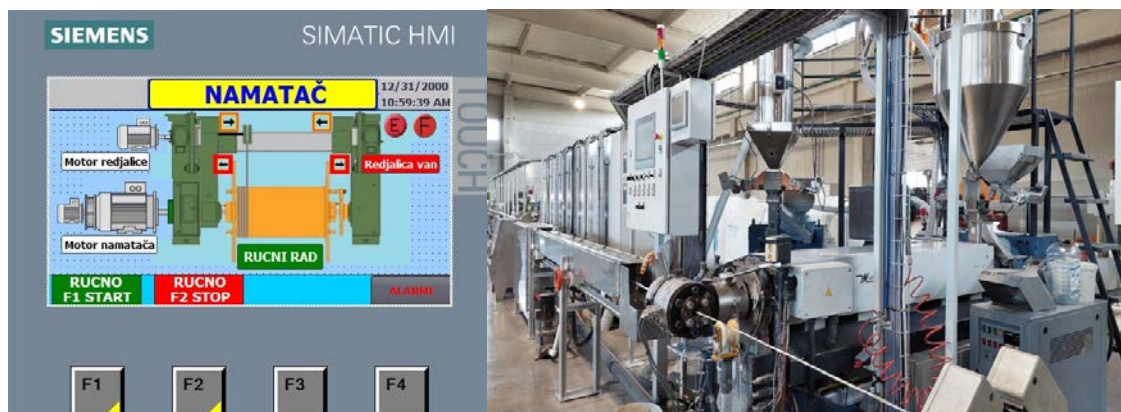
izabrana zona se prebacuje u odabrani mod rada. Takođe moguće je odabrati podešavanja parametara samo za grejanje ili grejanje i hlađenje. Za svaku zonu operator definiše alarme tipa prekida termopara ili prekoračenja temperature. U slučaju da dođe do prekida termopara gubi se informacija o vrednosti trenutne temperature pa se na osnovu izbora bira isključenje grejanja ili uključenje hlađenje zone, isključenje zone ili prelaz na manuelno upravljanje. U polju Izbor zone bira se zona i za nju se mogu pogledati trenutni PID parametri ili se izvršiti korekcija parametara ručnim unosom odgovarajuće vrednosti parametara.

Pretuning ili Fine tuning se u svakom trenutku može prekinuti pritiskom na taster Stop, pri čemu posmatrana zona prelazi u neaktivni mod (zona se ne zagreva a može prinudno da se hladi). Na sl. 13 prikazan je Trend graf zadate i trenutne vrednosti temperature i upravljačkih signala za grejanje i hlađenje odabrane zone.



Slika 13. Trend graf temperature zone 1 i upravljačkih signala za grejanje i hlađenje

Na sl. 14 prikazan je radni ekran namotavača i izgled glavnog komandnog pulta. Tasterima F1 i F2 pozivaju se ekrani za unos parametara kao što su prečnik jezgra, maksimalni prečnik doboša, korak ređanja i podešavanje parametara regulatora. Izbor načina upravljanja procesom ređanja vrši se jednostavnim prebacivanjem dvopozicionog preklopnika. Korak ređanja kabla zadaje se pomoću više obrtnog potencijometra čija je skala podeljena na podeoke.



Slika 14. Ekran za praćenje rada namotavača (levo).
Izgled glavnog komandnog pulta linije (desno)

5. Zaključak

Upravljačkim sistemom, zasnovanom na PLC-u, ET periferijama, konvencionalnim regulatorima, HMI operatorskim panelima i PC računaru sa mogućnošću praćenja i zapisa relevantnih parametara, omogućen je potpuno automatizovan rad linije za ispunu i plaštiranje. U radu je prikazana relizacija upravljačkog sistema za koji je na osnovu tehnoloških zahteva isprojektovana elektro do-

kumentacija, izrađeni upravljački ormani, napisan softver za regulaciju brzine, sile zatezanja, regulaciju temperature ekstrudera i dizajnirani su ekrani za prikaz i praćenje rada linije. Za regulaciju sile zatezanja upotrebljene su metode upravljanja upotrebom dansera kao senzora sile zatezanja i metod indirektno kontrole sile zatezanja. Prikazana je upotreba i razvijen je softver za podešavanje parametara regulatora temperature pojedinačnih i podešavanje parametara svih zona ekstrudera istovremeno sa modelima uticaja termičke sprega između zona. Omogućeno je jednostavno podešavanje parametara zona ekstrudera upotrebom samo ekrana HMI panela, bez upotrebe TIAPortal softvera. Upravljačkim sistemom se ujedno obavlja neposredno merenje relevantnih veličina i na osnovu implementiranih algoritama upravlja izvršnim organima. Kompanije kao što je Siemens, Rockwell, ABB i drugi nude gotova rešenja za realizaciju upravljanja kontinualnim linijama ili delovima linija uz kupovinu gotovih blokova za tu svrhu. Implementacijom razvijenog upravljačkog sistema poboljšana je i povećan nivo zaštite uređaja, opreme i postignuta je kvalitetna regulacija brzine, sile zatezanja i temperature. Postojeće rešenje je u potpunosti realizovano u fabrici TelKabl u Zaječaru. Prikazani upravljački sistem se može koristiti u bilo kojoj industriji gde se obavljaju procesi ekstruzije. Navedeno rešenje može se takođe upotrebiti i za složenije linije sa više vučnih uređaja i ekstrudera.

6. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva, nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije [broj ugovora: 451-03-34/2026-03/200102].

7. References

- [1] **Boulter, B. T., H. W. Fox**, *Advanced Dynamic Simulation*, Rockwell Automation Reliance Electric Systems Engineering Training Course EI08, 1995.
- [2] **Wolfermann, W.**, *Tension Control of Webs - A Review of the Problems and Solutions in the Present and Future*, Proceedings of the 3rd IWHC International Web Handling Conference, Oklahoma State University, USA, 1995.
- [3] **Walton, B., B. S. Rice**, *Web Longitudinal Dynamics*, Proceedings of the 4th IWHC International Web Handling Conference, Oklahoma State University, USA, 1997.
- [4] **Ebler, N. A., R. Arnason, G. Michaelis, N. D'Sa**, Tension Control: Dancer Rolls or Load Cells, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29 (1993), 4, pp. 707–712.
- [5] **Damour, J.**, *The Mechanics of Tension Control*, Converter Accessory Corporation, 2004.
- [6] **Liu, Z.**, Dynamic Analysis of Center-Driven Web Winder Controls, Proceedings of the IEEE Industry Applications Conference, Phoenix, AZ, USA, 2 (1999), pp. 1388–1396.
- [7] **Liu, Z.**, A Frequency Response Based Adaptive Control for Center-Driven Web Winders, Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, PA, USA, 3 (1998), pp. 1493–1497.
- [8] **Damour, J.**, *The Mechanics of Tension Control*, Converter Accessory Corporation, 2014.
- [9] **Brandenburg, G.**, *New Mathematical Model for Web Tension and Register Error*, Proceedings of the 3rd IFAC Conference, Antwerpen, Belgium, 1 (1976), pp. 411–438.
- [10] **Young, G. E., K. N. Reid**, Lateral and Longitudinal Dynamic Behavior and Control of Moving Webs, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115 (1993), pp. 309–317.
- [11] **Reid, K. N., K. H. Shin, K. C. Lin**, Variable-Gain Control of Longitudinal Tension in a Web Transport System, *ASME*, 1992, pp. 87–100.
- [12] **Tran, T. T., K. H. Choi**, A Backstepping-Based Control Algorithm for Multi-Span Roll-to-Roll Web System, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70 (2014), pp. 45–61.

- [13] **Jeftenić, B., M. Bebić, S. Štatkić**, Controlled Multi-Motor Drives, Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2006, Taormina, Italy, 2006, pp. 14–59.
- [14] **Kocić, I., Z. Jovanović**, *Unwinder Speed Control Using PID Controller*, Proceedings of the XXI međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2022, Jahorina, Istočno Sarajevo, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, 2022, pp. 215–220.
- [15] **Kocić, I., S. S. Nikolić, A. Milovanović, D. Mitić, P. Đekić, N. Danković**, Single Screw Extruder Temperature Control Using PLC and HMI, Proceedings of the 9th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering-IcETRAN 2022, Novi Pazar, Serbia, 2022, pp. 137–142.
- [16] **Kocić, I., S. S. Nikolić, D. Mitić, A. Milovanović, N. Danković, P. Đekić**, Simulation Analysis of Feedforward-Feedback Control, Proceedings of the 20th International Conference on Thermal Science and Engineering of Serbia - SIMTERM 2022, Niš, Serbia, 2022, pp. 573–581.
- [17] **Nikolić, S. S., I. B. Kocić, D. S. Antić, D. B. Mitić, N. B. Danković, M. B. Milovanović, P. S. Djekić**, Speed and Tensile Force Control, *Thermal Science*, 27 (2023), 6A, pp. 4447–4460.
- [18] **Kocić, I. B., N. B. Danković, S. S. Nikolić, D. B. Mitić, P. S. Đekić**, Control System of the Continuous Extrusion Line Using PLC and Conventional Regulators, *International Journal of Electrical Engineering and Computing*, 7 (2023), 1, pp. 9–17.
- [19] ***, Application Center Winder, Siemens, 2003.
- [20] ***, Application Winder with DCC, Siemens, 2024.
- [21] ***, SINAMICS DCM DC Converter Operating Instructions, Siemens, 2015.
- [22] ***, SINAMICS G120 Operating Instructions Manual, Siemens, 2011.
- [23] ***, SIMATIC PROFINET with STEP 7 V14, Siemens, 2025.
- [24] **Berger, H.**, *Automating With Step 7 in STL and SCL: Programmable Controllers SIMATIC S7-300/400*, Publicis Publishing, 2012.
- [25] ***, Multi-Zone Control with PID_Temp, Siemens, 2019.
- [26] **Levy, S.**, *Plastics Extrusion Technology Handbook*, Industrial Press Inc., 1989.
- [27] **Puissant, S.**, *Extrusion of Cables. In The Global Cable Industry*, G. Beyer (Ed.), pp. 85–131, Nexans Research Center, 2021.
- [28] **Goff, J., T. Whelan**, *The Dynisco Extrusion Processors Handbook*, 2000.
- [29] **Giles, H. F., E. M. Mount, J. R. Wagner.**, *The Definitive Processing Guide and Handbook*, Norwich, NY, William Andrew, 2005.
- [30] ***, SIMATIC S7-1500 System Manual, Siemens, 2017.
- [31] ***, *Stand-alone material loaders*, Instruction Manual, MOTAN METRO HES, 2006.
- [32] ***, *X-RAY Measuring System*, Instruction Manual, SIKORA GmbH, 2026.
- [33] ***, High-frequency, high voltage spark tester for DC voltage and AC voltage, Instruction Manual, SIKORA GmbH, 2025.
- [34] ***, *HMS Anybus Communicator – PROFINET IO Device to Modbus-TCP server*, 2017.
- [35] ***, SINAMICS G Speed Control, Siemens, 2017.
- [36] **Rashid, M. H.**, *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications*, Pearson Education, 2014.
- [37] **Krishnan, R.**, *Electric Motor Drives*, Prentice Hall, 2001.
- [38] **Åström, K. J., T. Hägglund**, *PID Controllers*, ISA, 1995.
- [39] **I. Kocić, S. S. Nikolić, D. Mitić, P. Đekić, N. Danković, N. Jotović**, Data Collection Tool for Process Identification, *Facta Universitatis Series: Automatics Control and Robotics*, 21 (2022), 3, pp. 177–186.

- [40] **Tangirala, A. K.**, *Principles of System Identification: Theory and Practice*, CRC Press, 2018.
- [41] **Uhbehauen, H., G. P. Rao**, *Identification of Continuous-Time Systems*, North-Holland Publishing Co, 1987.

Originalni naučni rad

Ključne reči:

*metoda konačnih elemenata;
metoda korelacije digitalnih slika;
modelsko ispitivanje;
dinamička reanaliza; granična čvrstoća*

Key words:

*finite element method;
digital image correlation;
model testing; dynamic reanalysis;
ultimate strength*

NUMERIČKO-EKSPERIMENTALNI PRISTUP U PROCENI ČVRSTOĆE (INTEGRITETA) ELEMENATA PROCESNIH POSTROJENJA

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL APPROACH
IN EVALUATING THE STRENGTH (INTEGRITY)
OF STRUCTURAL ELEMENTS
IN PROCESS INDUSTRY PLANTS**

Ana PETROVIĆ*

* aspetrovic@mas.bg.ac.rs

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-5996-1485

Numeričko-eksperimentalni pristup čvrstoći konstrukcija zasniva se na primeni numeričkih metoda proračuna, prvenstveno metode konačnih elemenata, zajedno sa tehnikama eksperimentalnog ispitivanja. Prvo, biće predstavljen konvencionalni pristup proceni čvrstoće konstrukcija, koji uključuje statičku analizu, radna opterećenja i linearnu analizu korišćenjem metode konačnih elemenata.

Kasnije će biti predstavljene neuobičajene metode za razumevanje čvrstoće strukturnih elemenata koji se obično koriste u procesnoj industriji. Ove metode uključuju dinamičku reanalizu i testiranje modela, koje obe pružaju detaljniji uvid u ponašanje konstrukcije. Dinamička reanaliza zasniva se na ideji da sam napon nije uvek dovoljan pokazatelj kritičnih mesta na konstrukciji. Umesto toga, ova metoda koristi raspodelu razlike potencijalne i kinetičke energije kako bi se identifikovale slabe tačke i predložila moguća poboljšanja dizajna. Modelsko ispitivanje podrazumeva izradu i ispitivanje umenjenog modela konstrukcije. Testiranje modela umesto konstrukcije u punoj veličini značajno smanjuje troškove i vreme testiranja. Štaviše, laboratorijska ispitivanja omogućavaju upotrebu sofisticirane opreme, kao što je sistem za korelaciju digitalnih slika, koja je često nepraktična za primenu u samom postrojenju. Pošto su mnogi strukturni elementi u procesnoj industriji oblika ljuske izložene unutrašnjem pritisku (membransko naprezanje), oni su posebno pogodni za modelsko ispitivanje, ali u zonama gde su efekti savijanja dominantni, moraju se formulisati koeficijenti sličnosti.

Na kraju, analizira se granična čvrstoća konstrukcije. Tradicionalni postupci proračuna generalno uzimaju u obzir elemente konstrukcije koje utiču na krutost i čvrstoću, dok se zavareni spojevi zanemaruju u linearno-elastičnim analizama pod normalnim radnim opterećenjima. Ali šta je sa neočekivanim preopterećenjima koja mogu dovesti do otkaza konstrukcije? Kada se razmatraju granična čvrstoća i plastična deformacija, zavareni spojevi moraju biti uključeni u analizu, jer razlike u mehaničkim svojstvima različitih regiona zavarenog spoja imaju značajan uticaj na integritet konstrukcije.

Numerical and experimental approach to structural strength is based on the application of numerical computation methods, primarily finite element method analysis, together with experimental

testing techniques. Firstly, the conventional approach to structural strength assessment, which includes static loading conditions, service loads, and linear analysis using the finite element method, will be presented.

Later, advanced methods for understanding structural behavior of structural elements commonly used in the process industry, will be presented. These methods include dynamic reanalysis and model testing, both of which provide a more detailed insight into structural performance. Dynamic reanalysis is based on the idea that stress alone is not always a sufficient indicator of critical regions in a structure. Instead, this method evaluates the distribution (differences) of potential and kinetic energy in order to identify weak points and suggest possible design improvements. Model testing involves the production and examination of sub-scaled structural models. Testing a model instead of the full-scale structure significantly reduces both costs and testing time. Furthermore, laboratory testing allows the use of advanced equipment, such as Digital Image Correlation system, which are often impractical for on-site applications. Since many structural elements in the process industry are shell structures subjected to internal pressure (membrane stress), they are particularly suitable for model testing, but in the zones where bending effects are dominant, similarity coefficients must be formulated.

Finally, ultimate structural strength is analyzed. Traditional design procedures generally consider only the structural components that affect rigidity and strength, while welded joints are neglected in linear-elastic analyses under normal service loads. But what about unexpected overloads that may lead to structural failure? When ultimate strength and plastic deformation are considered, welded joints must be included in the analysis because variations in the mechanical properties of different weld regions have a significant influence on the overall structural integrity.

1. Introduction

There are many challenges in everyday engineering practice considering structural strength. The first one is how to produce optimal structure, considering expected workloads and unexpected (sudden) loads. The second challenge is to diagnose the cause of failure of a steel megastructure, in order to enable the machine and return it to operation, as soon as possible. In case of failure is necessary to apply an efficient system for the diagnosis and to perform a number of steps to enable machine to operate. The cause may be one of four (the same challenges dealing with when designing a new machine): error in design (geometry) of a part of the structure, the error in the production of parts (error in material and welded joints), error in operation or unpredictable circumstances (unexpected workloads).

2. Finite Element Method

Numerical calculation (based on Finite Element Method) of the structure is inevitable tool in structural diagnostics. It is usually used to identify stress concentration zones and deformation under static load, and oscillating modes and free frequencies (dynamic calculations). It is based on displacement method. The most sensitive, the most important and most difficult manageable procedure of the calculation process is structure modelling. Modelling, in fact, is mapping the physical to computational model according to technical documentation, selection of the type or types of finite elements and defining of physical model discretization by finite elements, nodal points, boundary conditions and loads. Example of a computational models discretized in small elements is shown in Fig. 1.

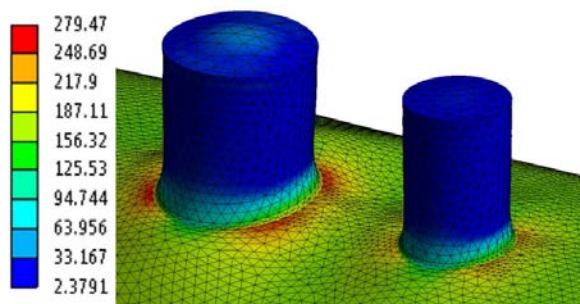


Fig. 1 Stress field of a pressure vessel loaded with internal pressure of 1.5 MPa [1]

In Fig. 1 stress field of a pressure vessel loaded with internal pressure is shown [1]. In Fig. 2 stress field of a globe valve housing loaded with axial force is shown.

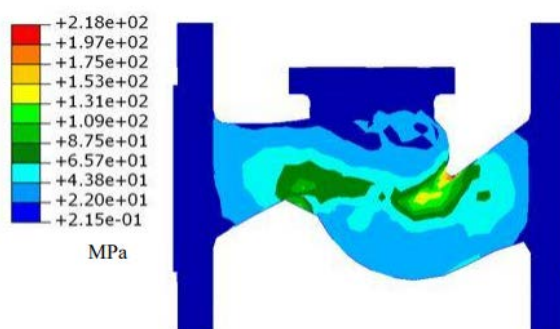


Fig. 2 Stress field of a globe valve housing loaded with axial force of 30 kN [2]

Pressure vessels and valve housings, as well as the pipelines, are typical elements of a process industry plants. Those are typical shell elements loaded with internal pressure and temperature, hence, finite element computational models contain shell elements.

2.1. Dynamic calculations and reanalysis method

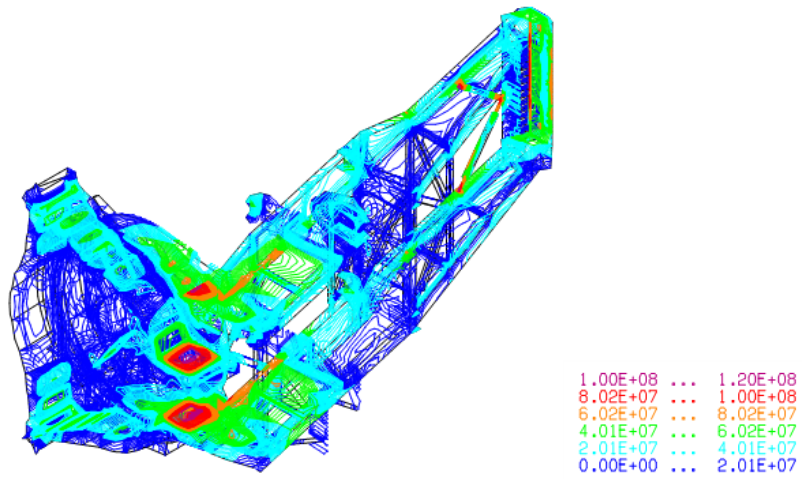
Dynamic calculations are not only giving modal shapes, free frequency values, but also distribution of potential and kinetic energy of deformation and can be used in more sophisticated manner for structural redesign. For instance, reanalysis method is based on distribution and potential energy, giving recommendations for redesign, in order to reduce stress concentrations. The recommendations for redesign are: (1) Elements in which both potential and kinetic energy are small, are not suitable for dynamic modification (e.g. the elements near the supports of the structure); (2) Elements for which the potential energy dominates the kinetic should increase rigidity; (3) Elements in which kinetic energy is dominant in relation to the potential need to reduce weight; (4) When both the kinetic and potential energy are high, reanalysis is performed based on the difference growth of potential and kinetic energy between the original and the modified structure (most complex case).

In paper [3] dynamic calculation was used to identify the cause of crack occurrence and to propose redesign solution. Namely, a crack occurred on gusset plate of pylon vertical truss of bucket wheel excavator (BWE) SchRs630.



Fig. 3 Bucket wheel excavator SchRs630, gusset plate crack position [3]

Numerical computational model of pylons, slewing platform and undercarriage was formed. Calculations are done using finite element method (FEM) for different load cases. As can be seen from Fig. 4 showing stress distribution field for a loading in accordance to standard (deadweight and workload), there is no stress concentration leading to crack occurrence in the zone of interest.



Note: $1.52e+8 \text{ N/m}^2$ equals to 152 MPa

Fig. 4 Bucket wheel excavator SchRs630, Von Misses stress [3]

It was determined, by the help of dynamic analysis (Fig. 5 showing the third oscillating mode, torsion of pylons) that the inertial forces caused by bucket wheel boom and counterweight boom masses while breaking slew drive cause the stress concentration in this spot.

Based on dynamic calculation and distribution of potential and kinetic energy on oscillation modes, using the reanalysis method, redesign of this part of the structure was proposed. When it comes to redesigning, redesign proposal should be such as to reduce stress concentration, that it can be done in a short period of time and that it can all be done in situ, including minimally possible dismantling of machine parts.

The stress was reduced by over 20% by proposed redesign solution. In the end, the proposed solution needs to be verified. Confirmation of the solution proposed and performed on the structure of the excavator, gave a number of work cycles without failure (indirect evidence).

Previous study described possibilities of usage of dynamic calculations for the purpose of redesign of a bucket wheel excavator, but could be easily applied for instance to redesign the zones of nozzles on pressure vessels.

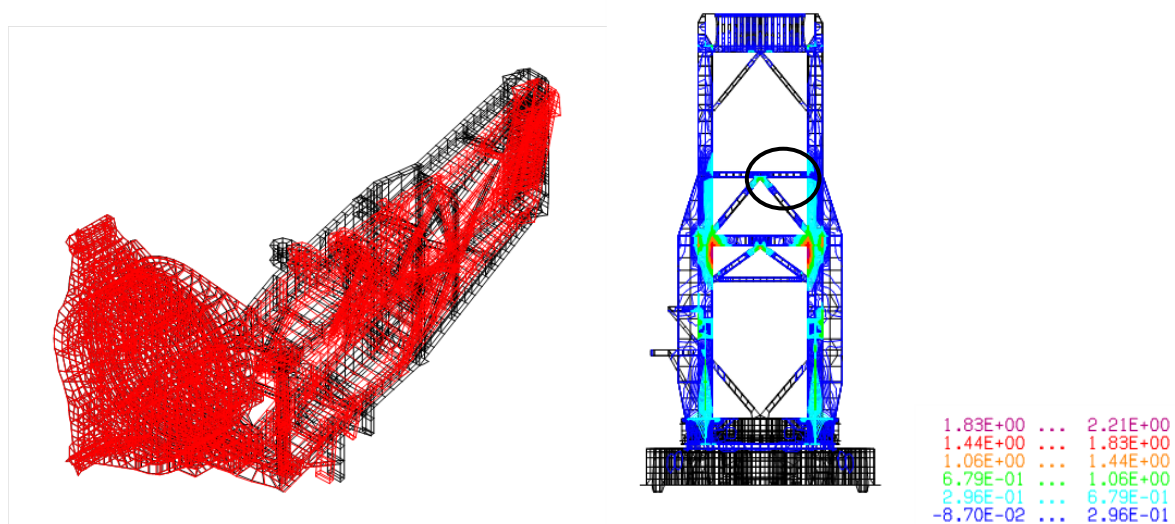


Fig. 5 Bucket wheel excavator SchRs630, Dynamic calculation, the third oscillating mode, distribution of seizure of potential and kinetic energy [3]

3. Experimental Testing, Model Testing

Numerical calculations are inevitable part of any structural strength assessment, but they need verifications. Sometimes, as previously mentioned, verification is indirect, as the number of work cycles without failure. The clear evidence of verification of numerical calculations would be experimental testing of phenomenon obtained by numerical calculations.

However, sometimes is not possible to perform the experiment on the real structure. Instead on the real structure, one can perform experiments on its sub-scaled model (fundamentals of model testing). Model testing enables to predict the stresses and deformation, and dynamic behavior of the real structure regarding stresses, deformation, and dynamic behavior of the model. Experimental testing on laboratory model instead on real structure results in great saving of money and time. The idea of modal testing is shown in Fig. 6.

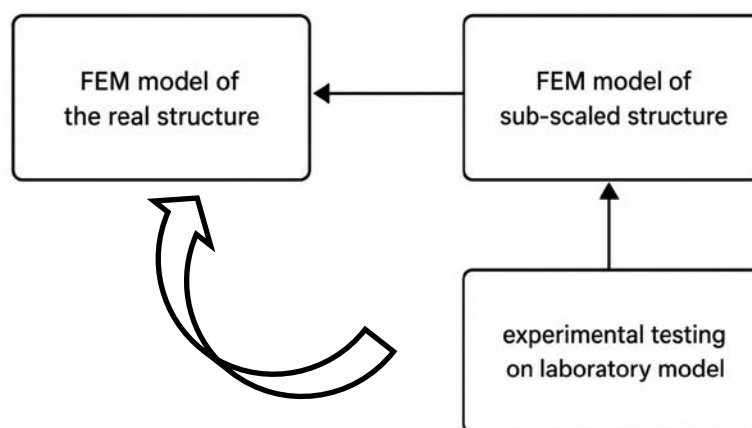


Fig. 6 The idea of model testing

Simplified, idea of model testing could be down to: one performs numerical calculations of both, real structure and sub-scaled model, then performs experimental testing of the model that confirms numerical computational model of the sub-scaled model, and indirectly (circumstantially) confirms numerical computational model of the real structure.

Recommendations for model testing are well-known and part of theory of similarity and are confirmed on a model testing of a SchRs 630 bearing structure [4]:

- all dimensions and thicknesses are decreased 10 times, loading is decreased 100 times comparing to the real construction,
- stress field looks the same as the stress field of the real construction,
- stress values (between sub-scaled and real construction) are different in different zones,
- structure of stress in all zones is analyzed, share of membrane, sheer and bending stress; coefficients are formulated as follows membrane stress-coefficient 1, sheer and bending make a difference,
- dynamic calculation, free frequencies of the sub-scaled model are 10 time higher than free frequencies of the real construction.

Pressure vessels and pipes are good candidates for model testing, considering that they are loaded with internal pressure causing membrane stress, except in the zones of nozzles etc.

4. Ultimate Strength, Influence of Welded Joints in Plasticity

Ultimate strength considers once-in-a-lifetime loadings, that include overloading scenarios that lead to structural collapse, i.e., ultimate strength. When ultimate strength and plastic deformation are considered, welded joints must be included in the analysis because variations in the mechanical properties of different weld regions (base metal, weld metal and heat affected zone) have a significant influence on the overall structural integrity, like shown in [5]. Firstly, methodology for material characterization of heat affected zone is developed. That methodology did not include small specimens taken from heat affected zone, and then tested, rather included deformation obtained using digital image correlation experimental method [6] and iterative numerical and experimental approach. Obtained material properties of heat affected zone are illustrated in Fig. 7.

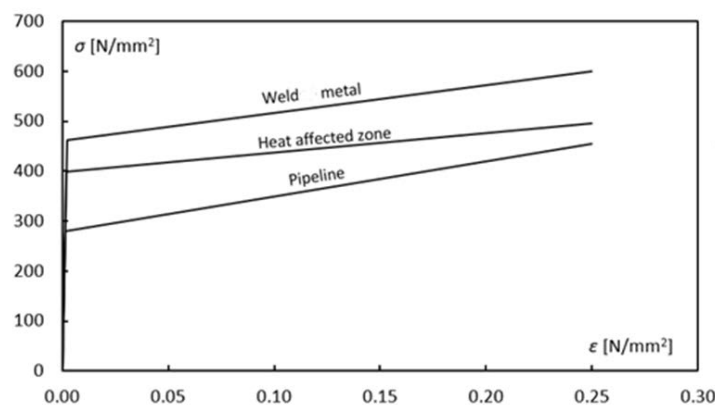


Fig. 7 Illustration of material properties obtained using inverse iterative methodology [5]

Later, three numerical computational models of a pipeline are made, the one without welded joint, the one containing welded joints but treats heat affected zone having the same characteristics as base material, and third containing heat affected zone with its own characteristics. Result is stress concentration factor shown in Table 1.

Table 1 Nonlinear analysis (plastic domain) of the pipeline [5]

	Internal pressure [MPa]	Stress in the zone of parent material [MPa]	Stress in HAZ [MPa]	Stress in WM [MPa]	Stress concentration factor [/]
The second model (HAZ = parent material)	77	285	326	454	1.59
The third model	77	282	373	416	1.47

5. Conclusions

- Numerical calculation based on Finite Element Method is inevitable tool in structural diagnostics,
- Stress is not the only one indicator of structural behaviour, dynamic calculation could be used for obtaining the whole insight into structural behaviour and for redesign proposal,
- Numerical calculations need verification – significance of the experimental testing is highlighted,
- When is not possible to perform the experiment on the real structure, one can perform experiments on its sub-scaled model (model testing),
- Traditional approach in structural designing and strength assessment that observes structure without welded joints is sufficiently accurate in terms of elastic response; When it comes to ultimate strength and plastic deformation, welded joints must be taken into account considering its vast influence to structural strength in plasticity.

6. References

- [1] **A. L. Petrović, M. Balać, A. Jovović, A. Dedić**, Oblique nozzle loaded by the torque moment–stress state in the cylindrical shells on the pressure vessel, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Scie*, 226 (2012), C3, 567-575.
- [2] **N. Mitrović, M. Milošević, N. Momčilović, A. L. Petrović, A. Sedmak, T. Maneski, M. Zrilić**, Experimental and numerical analysis of local mechanical properties of globe valve housing, *Chemicke Listy*, 106 (2012), pp. s491 - s494.
- [3] **A. S. Petrović, T. Maneski, N. Trišović, D. Ignjatović, M. Dunjić**, Identification of crack initiation cause in pylons construction of the excavator SchRs630, *Technical Gazette*, 25 (2) (2018), pp. 486-491.
- [4] **A. S. Petrović, D. Ignjatović, S. Sedmak, V. Milošević-Mitić, N. Momčilović, N. Trišović, L. Jeremić**, Model Analysis of Bucket Wheel Excavator SchRs 630 Strength, *Engineering Failure Analysis*, 126 (2021), 105451.
- [5] **A. S. Petrović, N. Momčilović, B. Đorđević, S. Sedmak, N. Anđelić, R. Jovičić, M. Arandelović**, Inverse iterative methodology for welded joints characterization in construction designing and comparison to classical approach, *Acta Polytechnica Hungarica*, 22 (4) (2025), pp. 45-63.
- [6] **M. Arandelović, A. S. Petrović, S. Sedmak**, Digital image correlation application to structural integrity assessment, *Structural integrity and life*, 24 (1) (2024), pp. 87-91.

Stručni rad <https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.163>

Ključne reči:
deponijski gas;
obnovljiv izvor energije;
metan

STUDIJA SLUČAJA UPRAVLJANJA DEPONIJSKIM GASOM

Key words:
landfill gas;
renewable energy source;
methane

CASE STUDY OF LANDFILL GAS MANAGEMENT

Marina MIHAJLOVIĆ*

* msavic@tmf.bg.ac.rs

Ana DAJIĆ

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0003-3643-345X

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

ORCID: 0000-0002-4427-1393

Deponijski gas nastaje kao proizvod anaerobnog razlaganja biodegradabilnih komponenti ostatka komunalnog otpada na deponiji i prosečno sadrži oko 50-55% metana i 45-50% ugljen-dioksida. To znači on predstavlja obnovljivi izvor energije, ali se može posmatrati i kao značajan izvor gasova sa efektom staklene bašte. Cilj upravljanja deponijskim gasom je najpre sprečavanje zagađenja koje on može uzrokovati, a nakon toga i iskoristiti njegove potencijale kao izvora energije. Istovremeno, podatke o količinama generisanog i emitovanog gasa potrebno je dostaviti nadležnim organima koji se bave životnom sredinom. Prvi korak u procesu projektovanja sistema za iskorišćenje deponijskog gasa je određivanje raspoloživih količina gasa. Osim toga, sa stanovišta upravljanja otpadom, neophodno je imati i uvid u predikcije o generisanim količinama gasa u nekom vremenskom periodu. Cilj ovog rada je prikazati na studiji slučaja metodologiju za efikasno upravljanje deponijskim gasom na primeru regionalne deponije. Ona ima dve osnovne funkcije: a) praćenje količina i sastava odloženog otpada, kao i vremena njegovog odlaganja što ima za posledicu izračunavanje količina generisanog deponijskog gasa dostupnog za iskorišćenje i b) predviđanje budućih količina gasa.

Landfill gas (LFG) is a product of anaerobic decomposition of biodegradable components of municipal waste disposed on landfills. It contains about 50-55% methane and 45-50% carbon dioxide. This means that it is a renewable energy source, but it can also be a significant source of greenhouse gases. The main goal of landfill gas management is to prevent the pollution it can cause, but also to use its potential as an energy source. Also, LFG emitters should report data on the quantities of generated and emitted gas to the environmental protection agency. The first step in the process of designing a system for landfill gas utilization is to determine the available quantities of gas. The aim of this paper is to present a methodology for landfill gas management using a case study of a regional landfill. It has two basic functions: a) monitoring the quantities and composition of disposed waste, as well as the time of its disposal, which results in determination of generated landfill gas available for utilization, and b) predicting future LFG quantities.

1. Uvod

Upravljanje otpadom je aktivnost čiji ciljevi su zaštita životne sredine, ali i valorizacija elementa tog procesa. U hijerarhiji upravljanja otpadom odlaganje na deponiju označeno je kao najmanje

poželjno. Međutim, u zemljama u razvoju ovo je i dalje najzastupljeniji metod tretmana [1]. Odlaganje otpada na deponiju je složen tehnološki proces. Prilikom projektovanja deponije moraju se ispuniti tehničko-tehnološki uslovi definisani Uredbom o odlaganju otpada na deponije [2]. Posebno značajno su obezbeđivanje vodonepropusnosti dna i finalne prekrivke, sakupljanje i tretman procednih voda i sakupljanje, tretman i korišćenje deponijskog gasa. Deponije na kojima se otpad deponuje u skladu sa propisima nazivaju se sanitarne deponije. Prema Nacionalnoj strategiji za upravljanje otpadom u Republici Srbiji odlaganje otpada bi se vršilo na 29 regionalnih deponija. U ovom trenutku izgrađeno je 12 sanitarnih deponija, i to dve lokalne i deset regionalnih.

Deponijski gas je produkt anaerobnog razlaganja biodegradabilnog otpada. Ova razgradnja odvija se u četiri faze, od kojih je najznačajnija četvrta faza u kojoj se odvija anaerobna, stabilna proizvodnja metana. Ona uglavom nastupa nakog godinu dana od odlaganja otpada i uobičajeno traje oko 20 godina [3]. Ovo je posledica brzine razgradnje biodegradabilnog otpada; dok se hrana razlaže veoma brzo, zeleni otpad kao što su drvena masa i slično razlažu se veoma sporo. Nastali deponijski gas sastoji se pretežno od metana i ugljen dioksida. Procenjeno je da 11% emisija metana u svetu potiče od komunalnog otpada, što ga čini trećim najznačajnijim izvorom [4]. Prema Zakonu o korišćenju obnovljivih izvora energije deponijski gas klasifikovan je kao obnovljivi izvor energije [5]. Njegov energetska potencijal prvenstveno zavisi od sadržaja metana, i iznosi između 16 i 30 MJ m⁻³. Prema Nacionalnom akcioniom planu za korišćenje obnovljivih izvora energije koji je donesen 2013. godine, cilj je bio da do 2020. godine učešće energije koja je dobijena iz obnovljivih izvora bude 27% od bruto finalne potrošnje energije [6]. Do danas, u pogon je pušteno 39 elektrana na biogas, ukupne snage 39 MW. Energetski potencijali deponijskog gasa se još uvek ne koriste.

Cilj ovog rada je da prikaže metodologiju koja može pomoći u donošenju odluka u vezi upravljanja deponijskim gasom na primeru hipotetičke regionalne deponije. Korišćenjem multidisciplinarnog pristupa, razvijen je softverski alat Deponis. Dve osnovne funkcije ovog softverskog rešenja su: a) praćenje količina i sastava odloženog otpada, kao i vremena njegovog odlaganja što ima za posledicu izračunavanje količina generisanog deponijskog gasa dostupnog za iskorišćenje i b) predviđanje budućih količina gasa. Takođe, predmetni softver omogućava jednostavan pristup i generisanje podataka za izveštaje koje su regionalne i lokalne deponije dužne da podnose Agenciji za zaštitu životne sredine.

2. Metodologija

Upravljanje otpadom je važan element održivog razvoja. Metodologija predstavljena u ovom radu može pomoći donosiocima odluka na različitim nivoima odlučivanja.

2.1. Deponijski gas

Količine deponijskog gasa koje se generišu na deponiji mogu se odrediti proračunima ili direktnim merenjima. Budući da direktna merenja imaju značajne nedostatke, kao što su definisanje reprezentativnih vrednosti, osetljivost uslova potrebnih za merenje, kao i cena, uobičajena je upotreba različitih proračunskih metoda. U ovom radu količine deponijskog gasa određene su primenom alata Deponis.

Određivanje količina deponijskog gasa pomoću softverskog alata Deponis zasniva se na kombinaciji dva dostupne metodologije: jednačine brzine razgradnje prvog reda i Global Methane Initiative modela (u daljem tekstu GMI). Jednačine brzine razgradnje prvog reda su široko korišćene. Neke od najznačajnijih modela, kao što su LandGem i IPCC model zasnivaju se na ovim jednačinama.

Model LandGem razvila je Američka agencija za zaštitu životne sredine na osnovu empirijskih podataka sa američkih deponija [7]. Proračun se vrši na osnovu podataka o količinama odloženog

otpada i izabranih vrednosti konstanti k i L_0 . Osnovna prednost ovog modela je njegova jednostavnost, a mana nedovoljna fokusiranost na podatke za konkretnu lokaciju.

Proračun se vrši na osnovu jednačine 1:

$$Q_{CH_4} = \sum \sum k L_0 (M_i/10) (e^{-kt_{ij}}) \quad (1)$$

gde je: Q_{CH_4} – protok metana, m^3/god , i = 1-godišnji inkrement, j = 0,1- godišnji inkrement, k = konstanta brzine stvaranja metana ($1/god$), L_0 = potencijal stvaranja metana, $m^3/tona$, M_i = masa otpada odloženog u i -toj godini, $tona$, t_{ij} = starost otpada odloženog u i -toj godini.

Konstanta brzine stvaranja metana (k -parametar) je parametar koji definiše brzinu generisanja metana iz mase odloženog otpada. Preporučena vrednost ovog parametra ima veoma širok interval nepouzdanosti (od -40 do +300%) te se preporučuje određivanje njegove vrednosti za svaki pojedinačni slučaj [8]. Softverski alat Deponis koristi GMI metod za proračun k -parametra.

Modeli GMI metoda razvijeni su za osam reprezentativnih klimatskih uslova za ispitivanje geografske regione [9]. Najznačajniji parametri su dubina deponije/visina otpada, stepen sabijanja otpada, karakteristika sloja za oblaganje dna i prekrivnog sloja, prekrivni sloj, upravljanje procednim vodama. U Deponisu GMI model se koristi za izračunavanje vrednosti konstante brzine stvaranja metana na osnovu podataka o udelima različitih biorazgradivih kategorija otpada i potataka o klimatskim karakteristikama područja na kojem se deponija nalazi.

2.2. Studija slučaja

Hipotetička regionalna deponija otvorena je 2020. godine, i ima kapacitet 250.000 tona. Prikupljanje deponijskog gasa vrši se putem biotrnova. Sastav odloženog otpada odgovara prosečnom sastavu otpada u Republici Srbiji. Padavinski režim na lokaciji deponije je umereno vlažan.

Glavni meni Deponisa prikazan je na slici 1.



Slika 1. Glavni meni DeponIS-a

U okviru glavnog menija vrši se unos osnovnih podataka o firmi, što je prikazano na slici 2. Predviđeno je da jedna firma može upravljati i sa više deponija, te se podaci za svaku unose zasebno (slika 3). Kao korisnik postoje tri nivoa autorizacije. U ovom polju od posebnog značaja je ispravan unos tipa padavinskog režima i tip kasete. Padavinski režimi su podeljeni u pet kategorija: 1.vlažni, 2. umereno vlažni, 3. prosečan, 4. umereno suv i 5. suv. Za hipotetičku deponiju izabran je umereno-vlažni padavinski režim.

Slika 2. Unos osnovnih podataka o firmi

Kasete se po tipu mogu podeliti na uređena plitke, uređena duboka, neuređena duboka, neuređena plitka i nepoznato. Podatak o tipu kasete koristi se za određivanje korekcionog faktora metana, koji određuje do kojeg stepena se otpad anaerobno razgrađuje. Za sve deponije visine preko 10m ocenjuje se da je sva razgradnja otpada anaerobna, te je vrednost ovog faktora 1. Ovi podaci unese se u formular prikazan na slici 3.

KasetID	Tip Kasete	Godina Otvaranja	Godina Zatvaranja	Kapacitet (t)	Srednja visina otpada	Maseni udeo metana (F)	Nacin Prikupljanja Gasa
1	UREDJENA DUBOKA	2020	2030	250000	20	50	KLASIČNI BIOTRN

Slika 3. Unos osnovnih podataka o deponiji

U toku korišćenja ovog alata, mogu se unositi podaci za svako pojedinačno odlaganje (slika 4). Kako bi se olakšao unos podataka, dodato je dugme kojim se aktuelnom otpadu dodeljuje neki predefinisani podrazumevani sastav. Raspoloživost mesta u kaseti se računa automatski, što olakšava predviđanje rada deponije u budućnosti.

Vrsta otpada	(%)
1 HRANA	12.00%
2 BASTENSKI	7.00%
3 DRVO	8.00%
4 GUMA	3.00%
5 TEKSTIL	10.00%
6 STAKLO	15.00%
7 PLASTIKA	11.00%
8 METAL	8.00%
9 PAPIR	9.00%
10 KARTON	7.00%
11 PELENE	4.00%
12 KOZA	6.00%
Ukupno:	100%

Slika 4. Unos podataka o količinama i sastavu otpada u kaseti

Nakon unosa svih podataka, alat omogućava uvid u protok deponijskog gasa i na deponiji i u pojedinačnim kasetama, kao i izvođenje simulacija sa ciljem donošenja menadžerskih odluka.

3. Rezultati i diskusija

Jedan od ključnih aspekata upravljanja otpadom je i bezbedno odlaganje otpada na deponije. Ovo se može postići odlaganjem na dobro projektovane deponije, koje smanjuju rizike po životnu sredinu na minimum. Uspešno rukvođenje deponijom može se videti i kao povećanje održivosti, smanjenje ugljeničnog otiska, smanjenje emisija metana kao gasa sa efektom staklene bašte i ekonomsku dobit. Stoga je važno razvijati metodologije kojima se unapređuje upravljanje deponijskim gasom na efikasan i efektivan način. Softverski alat Deponis omogućava da se u bilo kom trenutku generišu izveštaji sa osnovnim podacima o deponiji i pojedinačnim kasetama. U okviru opcije pregled protoka metana na deponiji može se dobiti informacija o trenutnom protoku metana na deponiji (slika 5) ili se generisati izveštaj prikazan je na slici 6. Podatak o prosečnom sastavu otpada u kaseti je izračunat na osnovu sastava otpada navedenih prilikom upisa podataka za svako pojedinačno odlaganje.

Slika 5. Prozor sa informacijom o trenutnom protoku metana na deponiji

STANJE KASETA NA DEPONIJAMA

Podaci o DEPONIJU

Deponija ID: 1 Mikro Lokacija
 Oznaka: Povrsina (Ha): 20
 Naziv: Regionalna deponija Protok CH₄ [m³/god]: #####

Podaci o KASETI

Kaseta ID: 1 Kapacitet [t]: 250000
 Oznaka kasete: Preostali kapacitet [t]: 199250
 Tip kasete: UREDJENA DUBOKA Srednja visina otpada [m]: 20
 Godina otvaranja: 2020 Maseni udeo metana F: 60
 Godina zatvaranja: 2030 Ukupna količina otpada u kaseti [t]: 50750
 Protok CH₄ [m³/god]: #####

LISTA UNOSA U KASETU:

Rbr unosa	Kolicina	Datum unosa	Period od	Period do
1	50000	4/22/2026	5/6/2020	4/9/2026
2	750	4/22/2026	4/19/2026	4/22/2026

PROSEČAN SASTAV OTPADA U KASETI:

ID	Naziv	Masa u kaseti	Procentualni udeo
1	HRANA	6,090.00	12.00%
2	BASTENSKI	3,552.50	7.00%
3	DRVO	4,060.00	8.00%
4	GUMA	1,522.50	3.00%
5	TEKSTIL	5,075.00	10.00%
6	STAKLO	7,612.50	15.00%
7	PLASTIKA	5,582.50	11.00%
8	METAL	4,060.00	8.00%
9	PAPIR	4,567.50	9.00%
10	KARTON	3,552.50	7.00%
11	PELENE	2,030.00	4.00%
12	KOZA	3,045.00	6.00%
		50,750.00	100.00%

Wednesday, April 22, 2026 DeponIS v1.0

Slika 6. Generisanje opšteg izveštaja sa podacima o količinama metana, sastavu i masi otpada po kasetama na deponiji

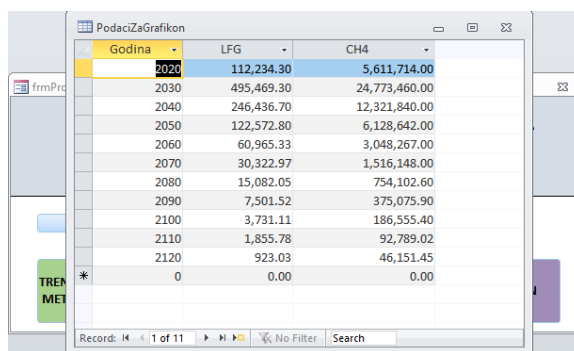
Opcija Pregled protoka metana u kaseti omogućava uvid u trenutni protok deponijskog gasa u datoj kaseti, kao i tabelarne podatke o godišnjim protocima za 40 godina (slika 7) i desetogodišnjim protocima u narednih sto godina (slika 8).

PodaciMetan40

Godina	LFG	CH ₄
2020	112,234.30	5,611,714.00
2021	216,897.60	10,844,880.00
2022	314,500.60	15,725,030.00
2023	405,519.60	20,275,980.00
2024	490,398.70	24,519,930.00
2025	569,552.10	28,477,610.00
2026	1,380,154.00	69,007,700.00
2027	1,287,053.00	64,352,650.00
2028	1,200,232.00	60,011,610.00
2029	1,119,268.00	55,963,410.00
2030	1,043,766.00	52,188,290.00
2031	973,356.50	48,667,820.00
2032	907,696.80	45,384,840.00
2033	846,466.30	42,323,310.00
2034	789,366.30	39,468,310.00
2035	736,117.90	36,805,900.00
2036	686,461.70	34,323,080.00
2037	640,155.00	32,007,750.00
2038	596,972.10	29,848,600.00
2039	556,702.20	27,835,110.00
2040	519,148.70	25,957,440.00
2041	484,128.50	24,206,430.00

Records: 41 of 41 No Filter Search

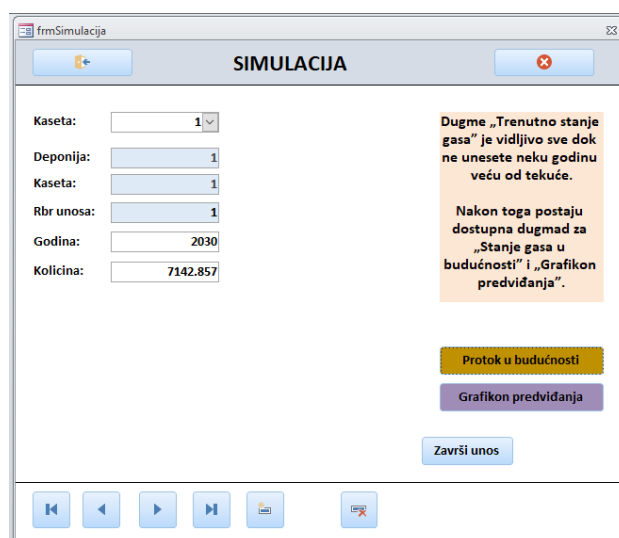
Slika 7. Godišnji protoci deponijskog gasa i metana u izabranoj kaseti



Godina	LFG	CH4
2020	112,234.30	5,611,714.00
2030	495,469.30	24,773,460.00
2040	246,436.70	12,321,840.00
2050	122,572.80	6,128,642.00
2060	60,965.33	3,048,267.00
2070	30,322.97	1,516,148.00
2080	15,082.05	754,102.60
2090	7,501.52	375,075.90
2100	3,731.11	186,555.40
2110	1,855.78	92,789.02
2120	923.03	46,151.45
*	0	0.00

Slika 8. Generisanje opšteg izveštaja sa podacima o količinama metana

Osim podataka koji se odnose na tekuće poslovanje na deponiji, moguće je dobiti i podatke o simuliranim situacijama. Primer je određivanje količina deponijskog gasa koje su ekonomski isplative za eksploataciju i donošenje odluke o radnom veku i kapacitetima postrojenja za iskorišćenje deponijskog gasa. Primer izgleda prozora sa ovom opcijom prikazana je na slici 9.



SIMULACIJA

Kaseta:

Deponija:

Kaseta:

Rbr unosa:

Godina:

Kolicina:

Dugme „Trenutno stanje gasa“ je vidljivo sve dok ne unesete neku godinu veću od tekuće.

Nakon toga postaju dostupna dugmad za „Stanje gasa u budućnosti“ i „Grafikon predviđanja“.

Protok u budućnosti

Grafikon predviđanja

Završi unos

Slika 9. Izgled prozora za simulaciju

4. Zaključak

Efikasno upravljanje otpadom i deponijskim gasom ima višestruke benefite: smanjuje se negativan uticaj na životnu sredinu i omogućava ostvarivanje ekonomske dobiti. U ovom radu prikazana je metodologija koja je alat koji može olakšati donošenje menadžerskih odluka. Softverski alat Deponis kombinuje jednačinu brzine razgradnje prvog reda i GMI metod za proračun generisane količine deponijskog gasa, te omogućava efikasnije upravljanje na različitim nivoima. Na svakodnevnom, operativnom nivou omogućena je brza i jednostavna evidencija o količinama i sastavu otpada u pojedinačnim kasetama, kao i na celoj deponiji u realnom vremenu. Za potrebe višeg niva upravljanja, omogućen je uvid u trenutne i akumulativne količine deponijskog gasa i metana u pojedinačnim kasetama, kao i zbirno na deponiji. Jednostavno je i generisanje izveštaja sa podacima o količinama i sastavu odloženog otpada, kao i količinama generisanih količina metana. Prema Pravilniku o metodologiji za izradu nacionalnog i lokalnog registra izvora zagađivanja, kao i metodologiji za vrste, načine i rokove prikupljanja podataka ("Sl. glasnik RS", br. 91/2010, 10/2013 i 98/2016) privredni subjekti u oblasti upravljanja otpadom u obavezi su da Agenciji za zaštitu životne sredine podnose godišnji izveštaj o količini i vrsti odloženog otpada, kao i podatke o količinama zagađujućih materija emitovanih u vazduh, uključujući i metan. Poznavanje generisanih količina metana olakšaće

menadžerima planiranje troškova poslovanja povezanih sa zaštitom životne sredine. Na strateškom nivou, kroz simulacije, omogućeno je predviđanje količina deponijskog gasa koje će se generisati u budućnosti. Ove informacije olakšavaju donošenje odluka o investicijama u sisteme za iskorišćenje deponijskog gasa. Poznavanje ovih podataka od posebnog je značaja za definisanje optimalnog trenutka u kome je poželjno započeti iskorišćenje gasa, ali i određivanje trenutka u kome će dalja eksploatacija biti neisplativa usled male količine generisanog gasa.

5. Zahvalnica

Istraživanja u ovom radu izvršena su u okviru aktivnosti koje finansira Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije pod ugovorom evidencioni broj 451-03-33/2026-03/200287.

6. References

- [1] **Clemente, E., E. Domingues, R. M. Quinta-Ferreira, A. Leitão, R.C. Martins**, European and African landfilling practices: an overview on MSW management, leachate characterization and treatment technologies, *Journal of Water Process Engineering*, 66 (2024), 105931, doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105931.
- [2] Uredba o odlaganju otpada na deponije, *Sl. glasnik RS, br. 92/2010*
- [3] **Kurniawan, T. A., X. Liang, D. Singh, M. H. D. Othman, H. Hwang Goh, P. Gikas, A. O. Kern, T. D. Kusworo, J. A. Shoqeir**, Harnessing landfill gas (LFG) for electricity: A strategy to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions in Jakarta (Indonesia), *Journal of Environmental Management*, 301 (2022) 113882, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113882.
- [4] **Shoqeir, J. A. H., E. O. M. Mansour**, The potential of electricity generation from landfill gas (LFG) as a strategy to mitigate greenhouse gas emissions, *Waste Management Bulletin*, 3 (2025) 4, pp. 100256, doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100256.
- [5] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije *Sl. glasnik RS, br. 40/2021, 35/2023 i 94/2024 - dr. zakon*
- [6] Zaključak o usvajanju nacionalnog akcionog plana za korišćenje obnovljivih izvora energije Republike Srbije, *Sl. glasnik RS, br. 53/2013*.
- [7] **Krause, M., S. Thorneloe**, *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.1 User Manual and Tool*. (U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/B-24/160, 2024)
- [8] **Wang, Y., C. Zhou, Z. Lou, H. Zhang, A. Hussain, L. Zhan, K. Yin, M. Fang, X. Fei**, Underestimated Methane Emissions from Solid Waste Disposal Sites Reveal Missed Greenhouse Gas Mitigation Opportunities, *Engineering*, 36, (2024), pp. 12-15, DOI: 10.1016/j.eng.2023.12.011
- [9] GMI, User's Manual Central-Eastern Europe Landfill Gas Model (U.S. EPA, 2014)

Stručni rad

Ključne reči:
mehanička ventilacija;
vlažno odsumporavanje;
termomehanika; termotehnika

**ANALIZA TERMOTEHNIČKIH USLOVA
U OBJEKTIMA ZA ODSUMPORAVANJE DIMNIH GASOVA
BLOKOVA B1 I B2 TERMoeLEKTRANE
„NIKOLA TESLA B“, OBRENOVAC**

Key words:
mechanical ventilation;
wet desulfurization;
thermomechanics

**ANALYSIS OF THERMOTechnical CONDITIONS
IN FACILITIES FOR FLUE GAS DESULFURIZATION
OF BLOCKS B1 AND B2 OF THE “NIKOLA TESLA B”
THERMAL POWER PLANT, OBRENOVAC**

Vladimir JEVTIĆ

Republika Srbija, Ministarstvo za javna ulaganja, Beograd

Dorđe KARIĆ*

* djordje.karic@yahoo.com

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0003-3150-7093

Mirko KOMATINA

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-5035-446X

U radu je analizirana uloga termotehničkih sistema u procesnim objektima postrojenja za vlažno odsumporavanje dimnih gasova blokova B1 i B2 termoelektrane „Nikola Tesla B“ u Obrenovcu. Proces odsumporavanja zasniva se na apsorpciji sumpor-dioksida iz dimnih gasova u suspenziji krečnjaka, pri čemu nastaje gips kao nusproizvod. Kontinuitet ovog hemijskog procesa direktno zavisi od stabilne pripreme i transporta krečnjačke suspenzije, kao i od rada sistema za tretman i sušenje gipsa. U objektima pripreme krečnjaka i sušenja gipsa dolazi do značajne procesne disipacije toplote usled rada mlinova, pumpi, transportnih sistema i elektroenergetske opreme. Projektom je definisan temperaturni opseg rada (minimalno +5 °C u zimskom periodu radi sprečavanja smrzavanja instalacija i maksimalno 38 °C u letnjem periodu), kao i mehanička ventilacija velikog kapaciteta radi odvođenja viška toplote. Rad pokazuje da odvođenje toplote predstavlja faktor pouzdanosti sistema za odsumporavanje. Porast temperature iznad projektovanih vrednosti dovodi do pregrevanja elektromotora, smanjenja pouzdanosti mehaničkih sklopova i povećanog rizika od zastoja u pripremi reagensa. Svako narušavanje kontinuiteta pripreme krečnjačke suspenzije direktno utiče na stepen uklanjanja sumpor-dioksida, čime se smanjuje ekološka efikasnost postrojenja. Mehanička ventilacija, stoga, nije samo prateći tehnički sistem, već integralni deo tehnološke stabilnosti procesa odsumporavanja. Analiza ukazuje da održavanje projektovanog temperaturnog režima obezbeđuje stabilan rad sistema pripreme reagensa, kontinuitet hemijske reakcije u apsorberu i pouzdano ispuštanje ekoloških zahteva. Rad naglašava značaj integracije termotehničkih i procesnih aspekata u analizi i projektovanju savremenih postrojenja za odsumporavanje dimnih gasova.

The paper work analyzes the role of thermal engineering systems in the process facilities of the wet flue gas desulfurization units of blocks B1 and B2 at the "Nikola Tesla B" thermal power plant in Obrenovac. The desulfurization process is based on the absorption of sulfur dioxide from flue gases in a limestone suspension, resulting in gypsum as a by-product. The continuity of this chemical process directly depends on the stable preparation and transportation of the limestone suspension, as well as the operation of the gypsum treatment and drying systems. In the limestone preparation and

gypsum drying facilities, significant process heat dissipation occurs due to the operation of mills, pumps, transport systems, and electrical equipment. The project defines the operating temperature range (minimum +5 °C in the winter period to prevent freezing of installations and a maximum of 38 °C in the summer period), as well as high-capacity mechanical ventilation to remove excess heat. The study shows that heat removal is a reliability factor for the desulfurization system. An increase in temperature above the designed values leads to overheating of the electric motors, reduced reliability of mechanical assemblies, and an increased risk of downtime in reagent preparation. Any disruption in the preparation of the limestone suspension directly affects the degree of sulfur dioxide removal, thereby reducing the environmental efficiency of the plant. Mechanical ventilation, therefore, is not just an auxiliary technical system, but an integral part of the technological stability of the desulfurization process. The results indicate that maintaining the designed temperature regime ensures stable operation of the reagent preparation system, continuity of the chemical reaction in the absorber, and reliable fulfillment of environmental requirements. The paper emphasizes the importance of integrating thermotechnical and process aspects in the analysis and design of modern flue gas desulfurization plants.

1. Uvod

Termoelektrane na ugalj i dalje predstavljaju značajne proizvodne kapacitete u elektroenergetskim sistemima, ali njihov rad zahteva primenu složenih sistema za smanjenje emisija zagađujućih materija. Jedan od ključnih problema jeste emisija sumpor-dioksida, koji nastaje sagorevanjem uglja i mora se ukloniti pre ispuštanja dimnih gasova u atmosferu. U tom kontekstu, vlažno odsumpravanje dimnih gasova predstavlja jednu od najrasprostranjenijih i najefikasnijih tehnologija za uklanjanje sumpor-dioksida iz dimnih gasova termoenergetskih postrojenja [1].

Proces vlažnog odsumporavanja zasniva se na kontaktu dimnih gasova sa krečnjačkom suspenzijom u apsorberu, gde sumpor-dioksid prelazi iz gasne faze u tečnu fazu i dalje reaguje sa kalcijum-karbonatom. Kao krajnji proizvod procesa nastaje gips, dok se prečišćeni dimni gasovi odvođe ka dimnjaku. Savremena istraživanja pokazuju da efikasnost ovog procesa ne zavisi samo od hemijske reakcije, već i od hidrodinamike apsorbera, protoka suspenzije, koncentracije reagensa, pH vrednosti, rada pumpi i upravljanja pomoćnim sistemima [1], [2].

U termoelektrani „Nikola Tesla B“ u Obrenovcu, za blokove B1 i B2, primenjen je sistem vlažnog odsumporavanja dimnih gasova u kome se dimni gasovi nakon elektrofilitarskog postrojenja sprovode do apsorbera, dok se krečnjak transportuje, melje i priprema u obliku suspenzije koja se koristi kao reagens. Nastala suspenzija gipsa se zatim tretira, skladišti ili transportuje dalje, u zavisnosti od načina korišćenja ili deponovanja. Prema dostavljenoj projektnoj dokumentaciji, kontinuitet ovog procesa zavisi od stabilnog rada sistema za pripremu krečnjaka, pumpnih stanica, sistema za sušenje gipsa i pratećih termotehničkih instalacija.

Poseban značaj u ovom radu ima analiza procesne disipacije toplote. U objektima za mlevenje krečnjaka, sušenje gipsa, pumpnim stanicama i elektroenergetskim prostorijama toplota nastaje usled rada elektromotora, mlinova, pumpi, transportnih sistema i transformatora. Ukoliko se ta toplota ne odvodi kontrolisano, dolazi do povećanja temperature u procesnim prostorima, što može negativno uticati na radnu pouzdanost opreme i stabilnost pripreme reagensa. Time se termotehnički sistemi, posebno mehanička ventilacija, ne mogu posmatrati samo kao pomoćni sistemi, već kao deo funkcionalne stabilnosti procesa odsumporavanja.

Savremena istraživanja iz oblasti upravljanja sistemima vlažnog odsumporavanja ukazuju da je optimizacija rada ovih postrojenja višekriterijumski problem, jer se istovremeno moraju zadovoljiti

zahtevi za visok stepen uklanjanja sumpor-dioksida, smanjenje potrošnje energije, stabilnost rada opreme i prihvatljivi operativni troškovi [3]. Zbog toga analiza termotehničkih uslova u procesnim objektima ima širi značaj: ona povezuje pouzdanost pomoćnih sistema sa hemijskom efikasnošću apsorpcije i ukupnom ekološkom funkcijom postrojenja.

Dodatni istraživački značaj ogleda se u činjenici da toplota koja se odvodi mehaničkom ventilacijom predstavlja oblik niskotemperaturne otpadne toplote. Prema savremenoj literaturi, iskorišćenje otpadne toplote u industrijskim sistemima može doprineti smanjenju potrošnje energije, ali izbor tehnologije zavisi od temperaturnog nivoa, raspoloživog toplotnog toka, režima rada, ekonomskih ograničenja i mogućnosti integracije u postojeće procese [4], [5]. U slučaju postrojenja za odsumporavanje, primarni zadatak ventilacije jeste održavanje projektovanog temperaturnog režima i zaštita opreme, dok se potencijal rekuperacije toplote može posmatrati kao dodatni pravac unapređenja energetske efikasnosti.

Cilj ovog rada je da se analizira uloga termotehničkih sistema u obezbeđivanju stabilnog rada procesnih objekata postrojenja za vlažno odsumporavanje dimnih gasova. Poseban fokus stavljen je na značaj mehaničke ventilacije u odvođenju procesne toplote, sprečavanju termičkog preopterećenja opreme i očuvanju kontinuiteta pripreme krečnjačke suspenzije. Na taj način rad povezuje tehnološki proces odsumporavanja, pouzdanost pomoćnih sistema i mogućnost energetskog unapređenja kroz razmatranje niskotemperaturne otpadne toplote.

2. Tehnološki opis procesa vlažnog odsumporavanja dimnih gasova

Proces vlažnog odsumporavanja dimnih gasova predstavlja jedan od najznačajnijih tehnoloških postupaka za smanjenje emisije sumpor-dioksida iz termoenergetskih postrojenja na ugalj. Njegova osnovna svrha je izdvajanje sumpornih jedinjenja iz dimnih gasova pre njihovog ispuštanja u atmosferu, čime se značajno smanjuje negativan uticaj rada termoelektrane na životnu sredinu.

U termoelektrani „Nikola Tesla B“ u Obrenovcu, blokovi B1 i B2 koriste lignit iz Kolubarskog ugljenog basena kao osnovno gorivo. Sagorevanjem uglja u kotlovskom postrojenju oslobađa se velika količina toplotne energije koja se koristi za proizvodnju vodene pare i pokretanje turbinskog postrojenja, ali istovremeno nastaju i dimni gasovi koji sadrže čvrste čestice, sumpor-dioksid i druge gasovite produkte sagorevanja.

Dimni gasovi najpre prolaze kroz elektrofiltarsko postrojenje, gde se vrši uklanjanje letećeg pepela i čvrstih čestica. Nakon toga, gasovi se sprovode do postrojenja za odsumporavanje, gde se vrši dodatno prečišćavanje uklanjanjem sumpor-dioksida. Posle prolaska kroz sistem za odsumporavanje, prečišćeni dimni gasovi prolaze kroz vlažan dimnjak i zatim se ispuštaju u atmosferu.

Osnovni princip procesa zasniva se na apsorpciji sumpor-dioksida iz dimnih gasova u suspenziji krečnjaka. Krečnjak se doprema kamionskim i železničkim transportom do postrojenja, gde se vrši njegov prijem, skladištenje, transport i mlevenje. Nakon toga, mleveni krečnjak se meša sa vodom i formira suspenziju odgovarajućih karakteristika koja se koristi kao reagens u procesu odsumporavanja.

Formirana krečnjačka suspenzija transportuje se do apsorbera, gde dolazi u direktan kontakt sa dimnim gasovima. U apsorberu se odvija hemijska reakcija u kojoj sumpor-dioksid iz gasne faze reaguje sa kalcijumom iz krečnjaka, pri čemu dolazi do njegovog vezivanja i formiranja gipsa kao nusproizvoda procesa. Na ovaj način gasoviti zagađivač se pretvara u kontrolisani čvrsti proizvod koji se može dalje tretirati i skladištiti.

Nastala suspenzija gipsa odvodi se do postrojenja za ugušćenje i tretman gipsa. Deo proizvedenog gipsa može se koristiti kao sekundarna sirovina u industriji, dok se neiskorišćene količine transportuju hidrauličkim putem do deponije gipsa. Time se dodatno smanjuje negativan uticaj procesa na životnu sredinu i obezbeđava kontrolisano upravljanje nusproizvodima.

Pored glavnog hemijskog procesa u apsorberu, za stabilan rad sistema od ključnog značaja su pomoćni tehnološki objekti, kao što su skladište krečnjaka i gipsa, objekat za mlevenje krečnjaka sa silosima i rezervoarima gotove suspenzije, objekat za sušenje gipsa, pumpne stanice i elektroenergetski objekti. Kontinuitet pripreme reagensa i transport suspenzije direktno određuju efikasnost procesa apsorpcije sumpor-dioksida.

U ovim objektima dolazi do značajne procesne disipacije toplote usled rada mlinova, pumpi, transportnih sistema, elektromotora i transformatora. Ukoliko se ova toplota ne odvodi na adekvatan način, dolazi do povećanja temperature u procesnim halama, što može izazvati pregrevanje opreme, smanjenje pouzdanosti rada i prekide u procesu pripreme reagensa. Iz tog razloga, termotehnički sistemi grejanja, klimatizacije i mehaničke ventilacije predstavljaju sastavni deo tehnološke stabilnosti procesa vlažnog odsumporavanja dimnih gasova.

Može se zaključiti da proces odsumporavanja nije isključivo hemijski proces vezan za apsorber, već složen tehnološki sistem u kome pouzdan rad pomoćnih objekata i termotehničkih instalacija direktno utiče na ukupnu efikasnost, kontinuitet rada i ekološku prihvatljivost celokupnog postrojenja.

3. Termotehnički uslovi u procesnim objektima

Pouzdan rad postrojenja za vlažno odsumporavanje dimnih gasova ne zavisi isključivo od efikasnosti hemijskog procesa apsorpcije sumpor-dioksida u apsorberu, već i od stabilnih termotehničkih uslova u pomoćnim procesnim objektima. Objekti za pripremu krečnjaka, sušenje gipsa, pumpne stanice i elektroenergetska postrojenja predstavljaju ključne tačke sistema u kojima se obezbeđuje kontinuitet pripreme reagensa i stabilnost celokupnog tehnološkog procesa.

U ovim objektima prisutna je značajna procesna disipacija toplote koja nastaje kao posledica rada mlinova za krečnjak, pumpi, transportnih sistema, elektromotora, transformatora i druge elektroenergetske opreme. Deo električne energije utrošene za rad opreme ne pretvara se u koristan mehanički rad, već se oslobađa u vidu toplote. Ova toplota predstavlja stalni toplotni izvor u zatvorenom prostoru i, ukoliko se ne odvodi kontrolisano, dovodi do povećanja temperature vazduha u procesnim halama.

Projektom su definisani spoljašnji projektni parametri koji predstavljaju osnovu za proračun termotehničkih instalacija. U zimskom periodu spoljašnja projektna temperatura iznosi $-12,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, uz relativnu vlažnost vazduha od 90 %, broj stepen-dana 2520 i trajanje grejnog perioda od 175 dana. Srednja temperatura grejnog perioda iznosi $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. U letnjem periodu spoljašnja projektna temperatura iznosi $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok je spoljašnja relativna vlažnost vazduha 33 %.

Na osnovu ovih parametara definisan je unutrašnji temperaturni režim rada procesnih objekata. Minimalna dozvoljena temperatura u zimskom periodu iznosi $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i predstavlja granicu zaštitnog grejanja čiji je osnovni cilj sprečavanje smrzavanja procesnih instalacija, cevovoda i transportnih sistema. U objektima za mlevenje krečnjaka, sušenje gipsa, pumpnim stanicama i kompresorskim stanicama ovo grejanje se ostvaruje pomoću električnih kalorifera koji se aktiviraju kada temperatura u prostoru padne ispod zadate vrednosti.

Maksimalna dozvoljena temperatura u letnjem periodu definisana je na nivou od $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ova vrednost predstavlja gornju granicu sigurnog rada procesne i elektroopreme. Povećanje temperature

iznad projektovane vrednosti dovodi do pregrevanja elektromotora, ubrzanog starenja izolacionih materijala, smanjenja pouzdanosti ležajeva i mehaničkih sklopova, kao i povećanog rizika od havarijskih zastoja. Posebno je značajno što svaki prekid rada mlinova ili pumpi direktno utiče na pripremu krečnjačke suspenzije, čime se smanjuje količina reagensa u apsorberu i narušava efikasnost procesa uklanjanja sumpor-dioksida.

Iz tog razloga projektovana je mehanička ventilacija velikog kapaciteta sa zadatkom eliminacije disipirane toplote i održavanja stabilne unutrašnje temperature. U objektu za mlevenje krečnjaka i u objektu za sušenje gipsa ugrađeni su aksijalni ventilatori postavljeni u gornjim zonama fasade objekta, dok se nadoknada izbačenog vazduha vrši preko zaštitnih žaluzina sa motornim pogonom. Sistem ventilacije dimenzionisan je za temperatursku razliku od 5 °C, a kontrola rada ventilatora vrši se preko termostata postavljenih u prostorijama. Kada temperatura pređe zadanu vrednost, ventilatori se automatski uključuju, dok se žaluzine otvaraju i omogućavaju strujanje svežeg vazduha.

U objektima gde borave zaposleni, kao što su skladište krečnjaka i gipsa i elektroprostorije, pored zaštitnog grejanja primenjeni su i sistemi klimatizacije tipa single split sa inverter tehnologijom, čime se obezbeđuju odgovarajući uslovi rada i zaštita osetljive elektroopreme. U prostorijama transformatora i elektroenergetskih sistema dodatno je projektovana prinudna ventilacija radi odvođenja toplote koja nastaje usled značajne disipacije transformatora i električne opreme.

Može se zaključiti da termotehnički uslovi u procesnim objektima predstavljaju jedan od ključnih faktora pouzdanosti sistema za vlažno odsumporavanje dimnih gasova. Održavanje projektovanog temperaturnog režima nije pitanje komfora, već osnovni uslov za kontinuitet pripreme reagensa, stabilnost hemijskog procesa u apsorberu i ispunjavanje ekoloških zahteva rada termoelektrane.

4. Analiza mehaničke ventilacije i odvođenja procesne toplote

Mehanička ventilacija u postrojenju za vlažno odsumporavanje dimnih gasova ima znatno širu funkciju od klasične razmene vazduha u zatvorenom prostoru. Njena osnovna uloga nije obezbeđivanje komfortnih uslova rada, već održavanje termičke stabilnosti procesnih objekata i sprečavanje negativnog uticaja procesne disipacije toplote na pouzdanost rada celokupnog sistema.

U objektima za mlevenje krečnjaka, sušenje gipsa, pumpnim stanicama i elektroenergetskim prostorijama prisutni su stalni izvori toplote nastali radom tehnološke opreme. Mlinovi za pripremu krečnjaka, elektromotori velike snage, transportni sistemi, pumpe i transformatori oslobađaju značajnu količinu toplote kao posledicu električnih i mehaničkih gubitaka. Ova toplota se akumulira u prostoru i, ukoliko se ne odvodi kontrolisano, dovodi do porasta temperature iznad projektovanih granica.

Projektom je definisano da maksimalna temperatura u procesnim objektima ne sme preći 38 °C. Ova vrednost nije određena slučajno, već predstavlja granicu nakon koje dolazi do značajnog smanjenja pouzdanosti rada opreme. Povišena temperatura izaziva pregrevanje elektromotora, smanjenje radnog veka izolacionih sistema, povećano habanje ležajeva i mehaničkih spojeva, kao i češće pojave zastoja i havarijskih stanja. U uslovima kontinuiranog industrijskog procesa, čak i kratkotrajni zastoj može izazvati ozbiljne posledice po rad celokupnog sistema. Dodatni značaj termotehničkih sistema ogleda se u činjenici da mehanička ventilacija direktno utiče na energetske efikasnost i radni vek industrijske opreme u uslovima visokog toplotnog opterećenja. Savremena istraživanja pokazuju da nepravilno dimenzionisani ili nedovoljno efikasni ventilacioni sistemi dovode do povećanja unutrašnjih temperatura, većeg opterećenja elektromotora, smanjenja pouzdanosti rada i povećanja potrošnje električne energije usled dodatnih gubitaka u sistemu. Optimizacija ventilacionih režima omogućava

ne samo održavanje projektovanih temperaturnih granica, već i smanjenje operativnih troškova, povećanje energetske efikasnosti i produženje eksploatacionog veka opreme. U procesnim objektima postrojenja za odsumporavanje, gde je prisutna kontinuirana disipacija toplote usled rada mlinova, pumpi i transportnih sistema, pravilno projektovana mehanička ventilacija predstavlja jedan od osnovnih uslova za stabilan i dugoročan rad celokupnog tehnološkog sistema [6].

Posebno kritičan uticaj pregrevanja odnosi se na sistem pripreme krečnjačke suspenzije. Mlevenje krečnjaka i transport suspenzije predstavljaju osnovu za kontinuirano snabdevanje apsorbera reagensom neophodnim za hemijsku reakciju uklanjanja sumpor-dioksida. Ukoliko zbog termičkog preopterećenja dođe do zastoja mlinova, pumpi ili transportnih sistema, dolazi do smanjenja količine krečnjačke suspenzije koja ulazi u apsorber. Posledično se smanjuje stepen apsorpcije sumpor-dioksida, povećava emisija zagađujućih materija i narušava osnovna ekološka funkcija postrojenja.

Iz tog razloga, mehanička ventilacija predstavlja direktan faktor ekološke efikasnosti sistema za odsumporavanje. Njena funkcija nije samo tehnička zaštita opreme, već i očuvanje kontinuiteta hemijskog procesa u apsorberu. Stabilna temperatura u procesnim objektima omogućava stabilan rad pomoćnih sistema, a time i konstantan stepen uklanjanja sumpor-dioksida iz dimnih gasova. Projektovano rešenje zasniva se na primeni aksijalnih ventilatora velikog kapaciteta postavljenih u gornjim zonama objekata, gde se akumulira najtopliji vazduh. Sistem rada je automatizovan preko termostatske kontrole. Kada temperatura u prostoru pređe zadatu vrednost, ventilatori se uključuju, a motorne žaluzine omogućavaju ulazak svežeg spoljnog vazduha. Na taj način se ostvaruje kontinuirano odvođenje viška toplote i održavanje stabilnog temperaturnog režima. Kada ventilatori nisu u radu, nepovratne klapne i zatvaranje žaluzina sprečavaju neželjenu infiltraciju vazduha i dodatne energetske gubitke.

Sa energetskog aspekta, procesna toplota koja se odvodi ventilacijom predstavlja oblik niske temperature otpadne toplote. Iako je u ovom projektu tretirana isključivo kao neželjeni nusprodukt koji mora biti uklonjen radi stabilnosti sistema, teorijski postoji mogućnost njenog delimičnog iskorišćenja kroz sisteme rekuperacije, pre svega za predgrevanje svežeg vazduha u zimskom periodu ili za pomoćne sisteme grejanja. Međutim, zbog relativno niskog temperaturnog nivoa, raspršenosti izvora i prioriteta koji je dat pouzdanosti rada, projektovano rešenje je usmereno na bezbedno i efikasno odvođenje toplote, a ne na njeno energetsko iskorišćenje.

Analiza pokazuje da mehanička ventilacija nije pomoćni, već integralni deo tehnološkog procesa vlažnog odsumporavanja dimnih gasova. Njena uloga direktno utiče na stabilnost rada sistema pripreme reagensa, pouzdanost opreme i kontinuitet hemijske reakcije u apsorberu. Održavanje projektovanih temperaturnih granica predstavlja osnovni preduslov za siguran rad postrojenja i ostvarivanje projektovane ekološke efikasnosti sistema.

5. Zaključak

Postrojenje za vlažno odsumporavanje dimnih gasova u termoelektrani „Nikola Tesla B“ u Obrenovcu predstavlja jedan od ključnih tehnoloških sistema za smanjenje emisije sumpor-dioksida i usklađivanje rada termoelektričnih blokova sa savremenim ekološkim zahtevima. Osnovni princip rada zasniva se na apsorpciji sumpor-dioksida iz dimnih gasova u suspenziji krečnjaka, pri čemu nastaje gips kao nusproizvod procesa. Efikasnost ovog sistema direktno zavisi od kontinuiteta pripreme reagensa, stabilnog rada pomoćnih objekata i pouzdanosti celokupnog tehnološkog lanca.

Analizom je utvrđeno da termotehnički sistemi imaju značajno veći značaj od klasične funkcije grejanja i ventilacije objekata. U procesnim objektima, kao što su objekat za mlevenje krečnjaka, objekat za sušenje gipsa, pumpne stanice i elektroenergetski prostori, prisutna je značajna procesna

disipacija toplote nastala radom mlinova, pumpi, elektromotora, transformatora i transportnih sistema. Ova toplota predstavlja stalni izvor termičkog opterećenja koji, ukoliko se ne odvodi adekvatno, može dovesti do pregrevanja opreme, smanjenja pouzdanosti rada i zastoja u pripremi krečnjačke suspenzije.

Posebno je pokazano da prekid rada sistema pripreme reagensa direktno utiče na proces apsorpcije sumpor-dioksida u apsorberu. Smanjenje količine krečnjačke suspenzije dovodi do smanjenja stepena uklanjanja sumpor-dioksida, povećanja emisije zagađujućih materija i smanjenja ukupne ekološke efikasnosti postrojenja. Na taj način termotehnički uslovi u pomoćnim objektima postaju direktno povezani sa osnovnom funkcijom sistema za odsumporavanje. Projektovana mehanička ventilacija velikog kapaciteta, sa aksijalnim ventilatorima, termostatskom kontrolom i automatskim dovodom svežeg vazduha, omogućava održavanje maksimalne unutrašnje temperature od 38 °C i sprečava termičko preopterećenje procesne opreme. Zaštitni sistemi grejanja obezbeđuju minimalnu temperaturu od +5 °C u zimskom periodu, čime se sprečava smrzavanje procesnih instalacija i održava kontinuitet rada sistema.

Rad potvrđuje da mehanička ventilacija nije pomoćni tehnički sistem, već integralni deo tehnološke stabilnosti procesa vlažnog odsumporavanja dimnih gasova. Održavanje projektovanog temperaturnog režima predstavlja osnovni uslov za pouzdan rad sistema pripreme reagensa, stabilnost hemijske reakcije u apsorberu i ispunjavanje ekoloških zahteva rada termoelektrane.

Poseban značaj ogleda se u povezivanju termotehničkih i procesnih aspekata rada industrijskog postrojenja. Pokazano je da se efikasnost procesa odsumporavanja ne može posmatrati isključivo kroz hemijsku reakciju u apsorberu, već kroz celokupan sistem u kome termička stabilnost pomoćnih objekata predstavlja jedan od ključnih faktora pouzdanosti i dugoročnog rada postrojenja.

6. Literatura

- [1] **Zhao, Z., Zhang, Y., Gao, W., Baleta, J., Liu, C., Li, W., Weng, W., Dai, H., Zheng, C., Gao, X.**, Simulation of SO₂ absorption and performance enhancement of wet flue gas desulfurization system, *Process Safety and Environmental Protection*, 150 (2021), pp. 453–463.
- [2] **Dabadghao, V., Biegler, L. T., Bhattacharyya, D.**, Multiscale modeling and nonlinear model predictive control for flue gas desulfurization, *Chemical Engineering Science*, 252 (2022), 117451.
- [3] **Huang, J., Zeng, Z., Hong, F., Yang, Q., Wu, F., Peng, S.**, Sustainable Operation Strategy for Wet Flue Gas Desulfurization at a Coal-Fired Power Plant via an Improved Many-Objective Optimization, *Sustainability*, 16 (2024), Issue 19, 8521.
- [4] **Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., Khaled, M.**, A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations, *Cleaner Engineering and Technology*, 6 (2022), 100387.
- [5] **Nandhini, R., Sivaprakash, B., Rajamohan, N.**, Waste heat recovery at low temperature from heat pumps, power cycles and integrated systems – Review on system performance and environmental perspectives, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52 (2022), 102214.
- [6] **Liu, P., Tønnesen, J., Caetano, L., Bergsdal, H., Justo Alonso, M., Kind, R., Georges, L. F. G., Mathisen, H. M.**, Optimizing ventilation systems considering operational and embodied emissions with life cycle based method, *Energy and Buildings*, 325 (2024), 114656.

-
- [7] **Gao, W., Liu, M., Xin, H., Zhao, Y., Wang, C., Yan, J.,** Control strategy optimization for wet flue gas desulfurization system during load cycling dynamic processes: Energy saving and environmental impact, *Energy*, 303 (2024), 131909.
 - [8] **Rahbari, H. R., Elmegaard, B., Bellos, E., Tzivanidis, C., Arabkoohsar, A.,** Thermochemical technologies for industrial waste heat recovery: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 215 (2025), 115598.

Stručni rad <https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.179>

Кључне речи:
ручни апарат за гашење пожара;
превозни апарат за гашење
пожара; класе пожара;
класе опасности од пожара

Key words:
portable fire extinguishers, mobile fire
extinguishers, classes of fire,
classes of fire danger

Иван АРАНЂЕЛОВИЋ*
* iarandjelovic@mas.bg.ac.rs

Никола ТАНАСИЋ

Раденко РАЈИЋ

РАСПОРЕЂИВАЊЕ АПАРАТА ЗА ГАШЕЊЕ ПОЖАРА У ЗАВИСНОСТИ ОД КЛАСЕ ПОЖАРА

DISTRIBUTION OF FIRE EXTINGUISHERS ACCORDING TO FIRE CLASSIFICATION

Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд
ORCID: 0000-0002-7343-9538
Академија струковних студија Политехника, Београд
ORCID: 0009-0005-9278-386X
Академија струковних студија Политехника, Београд
ORCID: 0009-0001-1276-8629

Предмер и предрачун опреме за гашење пожара је обавезан део Главног пројекта заштите од пожара, Елабората заштите од пожара, као и Плана заштите од пожара. Код нас се број и тип противпожарних апарата, неопходних за заштиту од пожара разматраног објекта, одређује најчешће на основу специфичног пожарно оптерећења, при чему се не узимају у обзир други битни фактори, на пример брзина ширења пожара или брзина задимљавања. На почетку предавања биће дат преглед домаћих законских и техничких прописа који регулишу ову област. После тога биће представљена једна побољшана методологија за одређивање типа, броја и распореда мобилних уређаја за гашење пожара, која је усклађена са домаћим прописима.

Specification of fire-extinguishing equipment is a mandatory part of the fire protection technical documentation: Final Design of Fire Protection, Study on Fire Protection and Fire Protection Plan. In Serbia the number and type of fire-extinguishers required for fire protection of the object are determined mostly on the basis of a specific fire load, as well as taking into account other important factors, for example, the speed of fire spread or smacking speed. In the first part of a lecture an overview of the domestic legal and technical regulations that regulate this field will be given. Subsequently, an improved methodology will be presented for determination of the type, number and layout of mobile fire extinguishers which is harmonized with our national regulations.

1. Увод

Правилан избор и одговарајући распоред мобилних уређаја за гашење пожара је од изузетног значаја за благовремено гашење пожара у почетној фази. Избор и размештање уређаја који постављају у грађевинским објектима су разматрани у радовима [1,2], а у раду [4] за апарате намењене за заштиту моторних возила. С обзиром да је од објављивања радова [1,2] прошло 8 година, у току којих је развој технологије довео до појаве нових пожарних опасности, као и до нових технички решења у области гашења пожара, јавила се објективана потреба за унапређење препорука датих у [1,2], што је и предмет овог рада.

Први национални пропис који је дефинисао обавезу поседовања мобилних уређаја за гашење пожара је Правилник [6]. Међутим технички услови које мора да испуни мобилни уређај

за гашење пожара су први пут дефинисани у групи југословенских стандарда са обавезном применом JUS Z.C2 коју је донео Савезни завод за стандардизацију 1970. године. Стандарди групе JUS Z.C2 су ревидирани 1981. године када су објављене њихова нова издања. Њихова обавезна примена је посебно потврђена доношењем наредби [7,8]. У нашој садашњој држави дефинисани су Правилником [5], који између осталог прописује обавезну примену стандарда SRPS Z.C2.020:1981 (којим се утврђују дефиниције, класификација и општи захтеви који се односе на све стандардне типове ручних и превозних апарата за гашење пожара); SRPS Z.C2.022:1981 (којим се утврђују методе испитивања ручних и превозних апарата за гашење пожара) као и стандарде SRPS Z.C2.35:1981, SRPS Z.C2.40:1981, SRPS Z.C2.135:1981, и SRPS Z.C2.140:1981. Указујемо да су наведени технички прописи донети пре 45 година и да нису у складу са актуелном техничком регулативом развијених земаља.

Први национални пропис који је дефинисао класе пожара, је југословенски стандард са обавезном применом JUS Z.C0.003:1979, који је практично преузео одредбе европског стандарда EN 2:1972. 1994. године је усвојен стандард JUS ISO 3941:1994 који је идентичан са међународним стандардом ISO 3941:1977, а 2011. европски стандард SRPS EN 2:2011, који је идентичан са европским стандардом EN 2:1992 + A1:2004. С обзиром да је недавно усвојено ново издања техничког прописа ISO 3941:2026. може се очекивати да се у наредном периоду усвоје одговарајући европски и национални прописи.

2. Обавеза поседовања ручних и превозних апарата за гашење пожара

У чланку [3] дат је преглед националних прописа који регулишу предметну област. С обзиром да је извршене битне измене неколико подзаконских аката наведених у [3], у тексту који следи се излаже преглед актуелних прописа.

2.1 Члан 17. Закона о запаљивим и горивим течностима и запаљивим гасовима (Службени гласник РС 54/2015), прописује да Објекти и постројења са запаљивим и горивим течностима и запаљивим гасовима морају бити опремљени потребним апаратима за почетно гашење пожара.

2.2 Члан 2. Уредбе о обавезним средствима и опреми за личну, узајамну и колективну заштиту од елементарних непогода и других несрећа (Службени гласник РС 3/11 и 37/15), прописује власнику стамбене јединице, односно куће да за потребе личне заштите и спасавања и заштите и спасавања чланова породичног домаћинства, као и имовине, набави и држи исправном стању апарат за гашење почетних пожара – S6 или еквивалентан њему. Члан 6. Исте Уредбе налаже скупштина станара зграде у стамбеним зградама, које се у складу са законом налазе у етажном власништву грађана, а које имају најмање два или више спратова, да набави и држи у исправном стању најмање један ватросни апарат по спрату, у складу са прописима из прописа о заштити од пожара.

2.3 Члан 24. Уредбе о мерама заштите од пожара при извођењу радова заваривања, резања и лемљења (Службени гласник СРС 50/79), налаже да се на местима заваривања обезбеде одговарајући апарати за гашење пожара.

2.4 Правилник о техничким нормативима за безбедност од пожара и експлозија постројења за течни нафтни гас и о ускладиштавању и претакању течног нафтног гаса (Службени гласник РС 77/21 и 41/25) налаже у члану 33 да Надземни резервоар за течни нафтни гас мора бити заштићен једним мобилним уређајем за гашење пожара капацитета пуњења најмање 50 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара, а више надземних резервоара

морају бити заштићени са по једним таквим уређајем на свака два резервоара. Изузетно од наведеног, надземни мали и преносни резервоари постављени појединачно или у систему код потрошача морају бити заштићени санајмање два мобилна уређаја за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха или другог одговарајућег средства. Члан 44 прописује исту обавезу за подземне резервоаре. Члан 79 прописује да Претакалиште мора бити заштићено са најмање једним мобилним уређајем за гашење пожара капацитета пуњења најмање 50 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење, по свакој прикљученој транспортној цистерни; пумпе и компресори морају бити заштићени са најмање два мобилна уређаја за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха или другог одговарајућег средства; место за претакање малих резервоара код потрошача мора бити заштићено са најмање два мобилна уређаја за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха или другог одговарајућег средства. Члан 93 прописује да грађевински објект намењен искључиво за пуњење боца и/или преносних резервоара мора бити заштићен мобилним уређајима за гашење пожара постављених тако да се на сваких 100 kg гаса у боцама, односно на сваки кубни метар гаса у преносним резервоарима обезбеди 9 kg праха или другог одговарајућег средства. Члан 106 прописује да складиште боца са течним нафтним гасом мора бити заштићено мобилним уређајима за гашење пожара постављених тако да се на сваких 500 kg гаса у боцама, односно на сваки кубни метар гаса у преносним резервоарима обезбеди 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара. Члан 122 прописује да систем са боцама мора бити заштићен мобилним уређајима за гашење пожара, постављени тако да се на сваких 100 kg гаса у боцама обезбеди 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара. Члан 123 прописује исту обавезу за систем са резервоарима. Члан 137 прописује да испаривач мора бити заштићен са најмање једним мобилним уређајем за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха или другог одговарајућег средства.

2.5 Правилник о техничким нормативима за безбедност од пожара и експлозија постројења и објеката за запаљиве и гориве течности и о ускладиштавању и претакању запаљивих и горивих течности (Службени гласник РС 114/2017 и 85/2021) у члану 70 прописује да сваки надземни резервоар са горивим течностима мора бити заштићен са најмање два мобилна уређаја за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха или другог одговарајућег средства, а више надземних резервоара морају бити заштићени са по два таква уређаја на свака два резервоара; а да надземни резервоар са запаљивим течностима мора бити заштићен са најмање једним мобилним уређајем за гашење пожара капацитета пуњења најмање 50 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара, а више надземних резервоара морају бити заштићени са поједним таквим уређајем на свака два резервоара. Члан 75. да просторија за смештај надземних резервоара, уколико се они постављају у затвореном простору мора бити заштићена мобилним уређајима за гашење пожара чији број се одређује у складу са чланом 70. Исто је у члану 89. прописано за подземне резервоаре. Чланом 107 је прописано да се у непосредној близини контејнера у коме се складиште запаљиве или гориве течности мора се налазити мобилни уређај за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха односно другог одговарајућег средства. Члан 111 прописује да складиште посуда са запаљивим или горивим течностима на отвореном простору Складиште посуда на отвореном простору мора бити заштићено мобилним уређајима за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха односно другог одговарајућег средства. Број мобилних уређаја за гашење пожара се одређује према упутству произвођача, тако да растојање између две групе уређаја износи највише 10 m. Члан 112. прописује се да просторија у којој се складиште посуде за запаљиве или гориве течности мора бити заштићена

мобилним уређајима за гашење пожара, при чему сваки уређај има најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење, при чему растојање између уређаја не сме да буде веће од 10 m. У члану 135. је прописано да се укупан број мобилних уређаја за гашење пожара за заштиту претакалишта за запаљиве или гориве течности дефинише према упутству произвођача, тако да уређаји садрже најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства зависи од површине која се штити и они се морају поставити тако да удаљеност између два мобилна уређаја не буде већа од 10 m. За време претакања мора се уз транспортну цистерну обезбедити најмање један уређај који садржи најмање 50 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара.

2.6 Правилник о техничким нормативима за безбедност од пожара и експлозија станица за снабдевање горивом превозних средстава у друмском саобраћају, мањих пловила, мањих привредних и спортских ваздухоплова (Службени гласник РС 54/17, 34/19 и 92/21) у члану 34. прописује да се поред свака два уређаја за точење горива мора се налазити по један мобилни уређај за гашење пожара капацитета пуњења најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара, а да се уз уређаје за измену уља у мотору и контролу притиска у пнеуматизима мора се налазити један мобилни уређај за гашење пожара капацитета пуњења најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара. У истом члану је дефинисано да се у просторији за смештај запосленог особља, мора се налазити најмање један мобилни уређај за гашење пожара капацитета пуњења најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара. Члан 35. истог Правилника прописује да се за време претакања горива из ауто-цистерне у резервоар, на месту на коме се врши претакање, мора налазити припремљен за употребу један мобилни уређај за гашење пожара капацитета пуњења најмање 50 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара. Изузетно на месту претакања горива из ауто-цистерне у резервоар може се уместо мобилног уређаја за гашење пожара капацитета пуњења најмање 50 kg праха користити шест мобилних уређаја за гашење пожара капацитета пуњења најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара, с тим да тим апаратима рукују најмање три лица. Члан 36. истог Правилника прописује да се у близини места на којима је могућност просипања запаљивих и горивих течности на станици највећа, постављају се сандуци са песком запремине најмање 0,03 m³.

2.7 Правилник о техничким нормативима за пројектовање, грађење, погон и одржавање гасних котларница (Службени лист СФРЈ 10/90 и 52/90) у члану 21. прописује за гасне котларнице следећу мобилну опрему за гашење пожара: за котларнице површине пода до 50 m² - два S6 апарата и један CO₂ апарат; за котларнице површине пода од 50 m² до 400 m² - два S9 апарата, један S6 апарат и један CO₂ апарат; а за котларнице површине пода преко 400 m², мобилна опрема бира се на основу прорачуна. Исти члан дефинише да се апарати постављају на уочљиво и лако приступачно место уз зид и непосредно поред врата, а највише до 1,5 m² изнад тла. Међусобна удаљеност апарата не сме бити већа од 20 m. Ако се осим гасовитог горива користи и течно гориво, у котларници се мора налазити и сандук са песком.

2.8 Правилник о техничким нормативима за безбедност од пожара и експлозија при складиштењу и држању уља за ложење и гасних уља (Службени гласник РС 102/20, 122/20 и 90/21) у члану 28 да се у котларницама које су изграђене као посебан грађевински објекат, као и просторијама котларнице смештеним у згради потрошача или уз зграду потрошача мора предвидети сандук са песком садржине до 0,25 m³ са лопатом, као и потребан број мобилних уређаја за гашење пожара, у складу са техничким прописима и упутствима произвођача уређаја и опреме, али не мање од два апарата типа S-9. Исти члан обавезује да се у просторијама

у којима се држи или складишти уље за ложење морају бити постављена најмање два мобилна уређаја за гашење пожара капацитета пуњења 9 kg праха или другог одговарајућег средства.

2.9 Члан 132. Правилника о техничким нормативима за уређаје у којима се наносе и суше премазна средства (Службени лист СФРЈ 57/85) прописује да се у просторима лакирнице морају обезбедити одговарајући апарати за гашење пожара.

2.10 Правилник о техничким нормативима за безбедност од пожара и експлозија објеката малопродаје боца са течним нафтным гасом (Службени гласник РС 75/19 и 85/21) у члану 14. прописује да објекат за малопродају боца са течним нафтным гасом капацитета до 1 000 kg мора бити опремљен са најмање два мобилна уређаја за гашење пожара капацитета пуњења најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара, а објекат капацитета већег од 1 000 kg са најмање четири мобилна уређаја за гашење пожара капацитета пуњења најмање 9 kg праха или другог одговарајућег средства за гашење пожара.

2.11 Уредба о техничким захтевима о безбедности од пожара и експлозија станица за снабдевање бродова и техничких пловних објеката течним горивом (Службени гласник РС 115/13) у члану 56. прописује да на свакој станици морају бити постављена најмање три ватрогасна апарата по 9 kg, као и један превозни ватрогасни апарат од најмање 50 kg средстава за гашење за класу пожара А, В и С, распоређених на следећи начин: поред снабдевачке јединице апарат од најмање 50 kg; поред транспортне јединице апарат од 9 kg; поред мерила апарат од 9 kg; и поред резервоара станице апарат од 9 kg. Члан 59. истог Правилника дефинише да се пре и за време истакања горива из аутоцистерне возила цистерне у резервоаре на станици мора припремити превозни ватрогасни апарат од најмање 50 kg средстава за гашење за класу пожара А, В и С.

2.12 Обавеза држања апарата у електроенергетским постројењима регулисана је члановима 32, 33, 34 и 3. Правилника о техничким нормативима за заштиту електроенергетских постројења и уређаја од пожара (Службени лист СФРЈ 74/90).

2.13 Према члану 79. Правилника о техничким нормативима за заштиту високих објеката од пожара (Службени гласник РС 80/15, 67/17, 103/18) у високом објекту мора се налазити одговарајући број апарата за почетно гашење пожара, у складу са техничким прописима и упутствима произвођача апарата и опреме. Највећа удаљеност између места на којем је смештен апарат за почетно гашење пожара и места на којем се може затећи особа у случају пожара не сме бити већа од 20 m.

2.14 Члан 4. Правилника о техничким нормативима за пекаре (Службени лист СРЈ 13/92) прописује обавезу држања противпожарних апарата у пекарама.

2.15 Правилник о техничким нормативима за заштиту угоститељских објеката од пожара (Службени гласник РС 20/19) у члану 44. дефинише да се у угоститељском објекту мора налазити одговарајући број апарата за почетно гашење пожара, у складу са техничким прописима и упутствима произвођача апарата и опреме, али не мање од два апарата типа S9 на свакој етажи угоститељског објекта. Највећа удаљеност између места на којем је смештен апарат за почетно гашење пожара и места на којем се може затећи особа у случају пожара не сме бити већа од 20 m.

2.16 Правилник о техничким нормативима за заштиту индустријских објеката од пожара (Службени гласник РС 1/18 и 81/23) у члану 30. прописује да се у индустријским објектима, у зависности од врсте технолошког процеса, мора предвидети потребан број мобилних уређаја за гашење пожара, у складу са техничким прописима и упутствима произвођача уређаја и опреме.

2.17 Правилник о заштити на раду и о техничким мерама за развијаче ацетилена и ацетиленске станице (Службени лист СФРЈ 6/67, 29/67 и 27/69) у члану 68 прописује да се запаљени ацетилен гаси сувим песком или апаратима за гашење пожара типа CO₂.

2.18 Правилник о техничким нормативима за заштиту од пожара стамбених и пословних објеката и објеката јавне намене (Службени гласник РС 22/19) у члану 58 да се у стамбеним, пословним и јавним објектима мора предвидети потребан број мобилних уређаја за гашење пожара, у складу са техничким прописима и упутствима произвођача уређаја и опреме.

2.19 Општи правилник о хигијенским и техничким заштитним мерама при раду, (Службени лист ФНРЈ 16/47 и 36/50) у члану 11 прописује употребу песка или апарата за гашење пожара пеном на местима где се за гашење не сме користити вода.

2.20 Члан 16 Правилника о подели моторних и прикључних возила и техничким условима за возила у саобраћају на путевима, *Службени гласник РС*, 40/2012, 102/2012, 19/2013, 41/2013, 102/2014, 41/2015, 78/2015, 111/2015, 14/2016, 108/2016, 7/2017, 63/2017, 45/2018, 70/2018, 95/2018, 104/2018, 93/2019, 2/2020, 64/2021, 129/2021 и 48/2023) прописује да се преносни апарат за гашење почетних пожара, са важећим доказом о исправности у складу са препоруком произвођача, мора постојати и бити постављен на доступном месту, тако да се у случају пожара може употребити у моторним возилима, осим у возилима врсте L и у возилима врсте M₁ којима се не врши јавни превоз путника у саобраћају на путевима. Апарат за гашење пожара мора гасити пожаре класа А, В и С и електро инсталација под напоном. Средство за гашење је суви прах или еквивалентна количина другог погодног средства за гашење, у складу са препоруком произвођача тог средства. На декларацији апарата за гашење почетних пожара мора бити наведен податак о еквивалентној количину сувог праха коју замењује средство за гашење које се налази у апарату. У возилима врсте M₁ којима се врши јавни превоз путника мора се налазити најмање један апарат са средством за гашење у еквивалентној количини 1 kg сувог праха. У возилима врсте M₂, M₃, N₁, N₂, N₃, K_{5a} и K_{5b} мора се налазити најмање један апарат са средством за гашење у еквивалентној количини 2 kg сувог праха. У прикључним возилима за јавни превоз путника, мора се налазити најмање један апарат са средством за гашење у еквивалентној количини 3 kg сувог праха.

3. Класификација пожара

Избор типа мобилног уређаја за гашење пожара који ће се користити у неком простору, јако је битно дефинисати класе пожара које су могуће у предметном простору. Национални технички пропис који дефинише класификацију пожара је SRPS EN 2:2011, који је идентичан са европским стандардом EN 2:1992 + A1:2004.

Табела 1. Класификација пожара према SRPS EN 2:2011

Класа пожара	Дефиниција
A	пожари чврстих запаљивих материја
B	пожари запаљивих течности или топљивих чврстих материја
C	пожари запаљивих гасова
D	пожари запаљивих метала
F	пожари масноћа у кухињским апаратима

Претходни технички прописи су и класу Е - којој су припадали пожари на уређајима и инсталацијама под електричним напоном (електромотори, трансформатори, разводна постројења и слично). Недавно усвојено издање техничког прописа ISO 3941:2026 уводи класу пожар L која обухвата пожаре на уређајима који користе литијмске батерије.

Табела 2. Преглед техничких прописа

национални пропис	европски пропис	међународни пропис	класе пожара
JUS Z.C0.003:1979	EN 2:1972	-	A, B, C, D, E
JUS ISO 3941:1994	EN 2:1992	ISO 3941:1977	A, B, C, D
SRPS EN 2:2011	EN 2:1992 + A1:2004	ISO 3941:2007	A, B, C, D, F

4. Одређивање неопходног броја мобилних уређаја и правила за њихово размештање

У радовима [1,2] су детаљно анализирани поступци за избор мобилних уређаја за гашење пожара у складу са EN, BS и NFPA нормама, као и дугогодишњом националном праксом. У тексту који следи излажу се препоруке аутора за избор типа, броја и утврђивања распореда у случајевима када то није одређено националним прописима. Као основни параметри изабрани су класа опасности од пожара и капацитет гашења. Капацитет гашења преносних уређаја за гашење пожара је дефинисан групом стандарда SRPS EN 3. За уређаје који су у складу са правилником [5] а не поседују исправе о усаглашености са групом стандарда SRPS EN 3 капацитет гашења се утврђује у складу са Табелом 3. Капацитет гашења превозних уређаја за гашење пожара је дефинисан групом стандарда SRPS EN 1866. За уређаје који су у складу са правилником [5] а не поседују исправе о усаглашености са групом стандарда SRPS EN 1866 капацитет гашења се утврђује у складу са Табелом 3.

Анализа дата у [2] показује да су S апрати најефикаснији за гашење најчешћих типова пожара. Поред тога, њихова набавна цена и цена одржавања су (што у овом раду није посебно разматрано) су повољније у односу на друге типове апарата. S апрати се не смеју користити за гашење уређаја који су под напоном већим од 1.000 V, као ни за гашење опреме и уређаја које би прах могао да оштети.

Апарате типа CO₂10 треба избегавати, где год је то могуће, јер је њихова цена отприлике три пута већа од цене CO₂5 апарата. Према томе за просторе у којима су инсталиране машине и уређаји који раде под напоном између 1.000 V и 10.000 V треба предвидети CO₂5 апарате.

За гашење електронске опреме и уређаја који би били оштећени у случају контакта са сувим прахом или угљен-диоксидом, неопходно је обезбедити одговарајуће апарате, пуњене неком од замена за халон.

Укупан капацитет гашења пожара класе А групе преносних уређаја за гашење пожара се одређује сабирањем нумеричких делова ознаке капацитет гашења одређеног групом стандарда SRPS EN 3, односно за уређаје, који нису атестирани у складу са SRPS EN 3, а стављени су у употребу пре ступања на снагу овог Правилника, на основу Табеле 3.

Табела 3. Капацитет гашења који су у складу са [5] али не и са хармонизованим стандардом

Ознака апарата	Капацитет класа А	Капацитет класа В	стандард
S1	3A	5B	SRPS EN 3
S2	5A	8B	SRPS EN 3
S3	8A	13B	SRPS EN 3
S6	13A	21B	SRPS EN 3
S9	21A	34B	SRPS EN 3
S12	34 A	55B	SRPS EN 3
S50	-	II B	SRPS EN 1866
CO22	-	13B	SRPS EN 3
CO23	-	21B	SRPS EN 3
CO25	-	34B	SRPS EN 3
CO210	-	55 B	SRPS EN 1866
CO230	-	89 B	SRPS EN 1866
CO ₂ 60	-	144 B	SRPS EN 1866

Пример: 2 уређаја капацитета гашења 21А и 3 уређаја капацитета гашења 27А имају укупан капацитет гашења 123А.

4.1. Размештање преносних мобилних уређаја за гашење пожара класе А

У свакој етажи грађевинског објекта мора се налазити најмање један преносни уређај за гашење пожара капацитета гашења најмање 13А. Највеће дозвољено растојање произвољне тачке грађевинског објекта од најближег преносног уређаја за гашење пожара класе А је 20 m. Највеће дозвољено растојање између два преносна уређаја за гашење пожара класе А је 30 m, при чему се пређени пут степеништем рачуна као дужина степеништа помножена са 1,5. Ако у пожарном сектору постоји опасност од задимљења, онда је највеће дозвољено растојање између два преносна уређаја за гашење пожара класе А је 20 m, при чему на свакој етажи морају налазити бар 2 преносна уређаја за гашење пожара.

Укупан капацитет гашења пожара класе А групе преносних уређаја за гашење пожара се одређује сабирањем нумеричких делова ознаке капацитета гашења одређеног групом стандарда SRPS EN 3, односно на основу Табеле 3.

Пример: 2 уређаја капацитета гашења 21А и 3 уређаја капацитета гашења 27А имају укупан капацитет гашења 123А.

Минимални укупни капацитет групе мобилних уређаја за гашење пожара класе А, намењених за заштиту једног пожарног сектора израчунава се према Табеле 4.

Табела 4. Минимални укупни капацитет групе уређаја за гашење пожара класе А

Површина пожарног сектора [m ²]	Без опасности од брзог задимљења	Присутна опасности од брзог задимљења
до 50	13А	13А
50-100	13А	13А
100-150	13А	26А
150-200	26А	34А
200-300	26А	42А
300-400	26А	50А
400-500	34А	60А
500-750	50А	80А
750-1000	65А	100А
На сваких даљих 500	34А	55А

4.2. Размештање преносних мобилних уређаја за гашење пожара класе В, С, D и F

Највеће дозвољене растојање произвољне тачке грађевинског објекта, која може бити захваћена пожарима класе В, D или F до најближег мобилног уређаја за гашење пожара, атестираног за гашење пожара предметне класе пожара је 10 m. Мобилни уређај за гашење пожара мора бити на истој етажи, на којој се налази жариште потенцијалног пожара.

На растојању већем од 2 m а мањем од 20 m, од површине која може бити захваћена пожаром класе В, поставља се група мобилних уређаја атестираних за гашење пожара класе В. При томе се за угрожену површину већу од 1 m² а мању од 2 m² постављају најмање два уређаја, а за угрожене површине веће од 3 m² постављају најмање три уређаја. Њихови минимални капацитети гашења дати су у Табели 5. Сви мобилни уређај за гашење пожара мора бити на истој етажи, на којој се налази жариште потенцијалног пожара.

На растојању већем од 2 m а мањем од 20 m, од површине која може бити захваћена пожаром класе D, поставља се група мобилних уређаја за гашење пожара чији се укупни капацитет гашења пожара класе D, израчунава према упутству произвођача.

На растојању мањем од 20 m од површине која може бити захваћена пожаром класе F, поставља се група мобилних уређаја. Њихови минимални капацитети гашења дати су у Табели 6.

На етажи на којој постоји потенцијално жариште пожара класе пожара С, постављају се најмање два мобилна уређај за гашење пожара, атестирана за гашење пожара класе С, на растојању од потенцијалног жаришта, већем од 2 m а мањем од 20 m.

Табела 5. Минимални укупни капацитет групе уређаја за гашење пожара класе В

угрожена површина [m ²]	минималан број уре- ђаја	минималан капацитет гашења једног уре- ђаја
0,14	1	21B
0,23	1	34B
0,37	1	55B
0,47	1	70B
0,59	1	89B
0,75	1	113B
0,96	1	144B
1,22	2	183B
1,41	2	113B
1,80	2	144B
2,29	2	183B
2,88	2	144B
3,66	3	183B
4,66	3	233B

Табела 6. Минимални укупни капацитет групе уређаја за гашење пожара класе F

угрожена повр- шина [m ²]	минималан број уређаја	минималан капацитет гашења јед- ног уређаја
0,015 m ²	1	5 F
0,020 m ²	2	5F
0,040 m ²	1	25F
0,060 m ²	1	40F
0,110 m ²	1	75F
0,180 m ²	2	40F
0,240 m ²	2	75F
0,270 m ²	2	75F
0,300 m ²	2	75F
0,400 m ²	2	75F

5. Закључак

Правилан избор и одговарајући распоред мобилних уређаја за гашење пожара је од изузетног значаја за благовремено гашење пожара у почетној фази. Избор и размештање уређаја који постављају у грађевинским објектима су разматрани у радовима [1,2]. С обзиром да је од објављивања радова [1,2] прошло 8 година, у току којих је развој технологије довео до појаве нових пожарних опасности, као и до нових технички решења у области гашења пожара, јавила се објективана потреба за унапређење препорука датих у [1,2], што је и предмет овог у рада. У другом поглављу је извршено и ажурирање прегледа обавеза прописаних националном правном регулативом са актуелним прописима. За случајеве који нису нормирани правним техничким прописима дата су практична упутства за избор и распоређивање мобилних уређаја за гашење пожара, која су складу са EN, BS и NFPA нормама, као и дугогодишњом националном праксом.

6. References

- [1] **Аранђеловић, И, Р. Рајић**, Избор типа и распоред противпожарних апарата, Зборник радова 31. *Међународног конгреса о процесној индустрији PROCESING '18*, СМЕИТС, Бајина Башта, 2018, pp. 153-161.
- [2] **Аранђеловић, И., С. Генић, Р. Рајић**, Одређивање распореда апарата за гашење пожара у неиндустријским објектима, Зборник радова *Међународне научне конференције Безбедносни инжењеринг; Заштита од пожара и експлозије*, Висока техничка школа струковних студија Нови Сад, Нови Сад 2018, pp. 209–216.
- [3] **Arandelović, I., R. Rajić, N. Tanasić**, Pregled i klasifikacija nacionalnih propisa iz oblasti zaštite od požara, *Procesna tehnika*, 34:2 (2022), pp. 30–35.
- [4] **Рајић, Р., Н. Танасић, И., Аранђеловић**, Мобилни уређаји за гашење пожара у моторним возилима, Зборник радова 2. *Научно – стручног скупа Добра пракса у друмском саобраћају и транспорту*, Академија техничких струковних студија Београд, Београд, 2024, pp. 690 – 695.
- [5] ***, Правилник о техничким и другим захтевима за ручне и превозне апарате за гашење пожара, Службени гласник РС 74/09.
- [6] ***, Општи правилник о хигијенским и техничким заштитним мерама при раду, Службени лист ФНРЈ 16/47 и 36/50.
- [7] ***, Наредба о обавезном атестирању ручних и превозних апарата за гашење пожара, Службени лист СФРЈ 16/83.
- [8] ***, Наредба о одређивању апарата за гашење пожара који се могу стављати у промет ако су снабдевени гаратним листом и техничким упутством о најмањем трајању гарантног рока, обезбеђеног сервисирања за те апарате, Службени лист СФРЈ 35/83.

Stručni rad

Ključne reči:
upravljanje kvalitetom;
vizitorski centar;
održiva energetika

Key words:
quality management;
visitor center;
sustainable energy

INTEGRISANI FILOZOFSKO KOMUNIKOLOŠKI PRISTUP UPRAVLJANJU KVALITETOM: HERMENEUTIKA, TEHNIKA I AKTERSKE MREŽE U POSTROJENJIMA ODRŽIVE ENERGETIKE

**INTEGRATED PHILOSOPHICAL–COMMUNICOLOGICAL
APPROACH TO QUALITY MANAGEMENT:
HERMENEUTICS, TECHNOLOGY AND ACTOR-NETWORKS
IN SUSTAINABLE ENERGY FACILITIES**

Andrea RATKOVIĆ NOVKOVIĆ*
* andrea.ratkovicnovkovic@elixircraft.rs

Public Relations and Visitor Center Coordinator,
Eco Energy Complex
ORCID: 0009-0007-1365-0757

Rad razmatra mogućnost da se upravljanje kvalitetom u postrojenjima održive energetike tumači kao prošireni organizacioni okvir koji, pored tehničkih i proceduralnih pokazatelja, obuhvata transparentnost, edukaciju javnosti i društvenu legitimnost. Polazeći od studije slučaja Vizitorskog centra Energane na otpad u Prahovu, rad razvija integrisani filozofsko-komunikološki model zasnovan na hermeneutici, teoriji komunikativne racionalnosti, narativnom identitetu, filozofiji tehnike, teoriji akterskih mreža i sociologiji znanja. Metodološki, istraživanje je koncipirano kao preoperativna analitička rekonstrukcija koja povezuje teorijsku analizu, studiju slučaja i interpretaciju planiranih komunikacionih i edukativnih funkcija Vizitorskog centra. Rezultati analize ukazuju na to da se kvalitet u ovakvim sistemima ne može svesti isključivo na tehničku usaglašenost i proceduralnu kontrolu, već ga treba razumeti i kao sposobnost kompanije da tehnološke procese učini razumljivim, proverljivim i društveno prihvatljivim. Posebno se apostrofira mogućnost posmatranja Vizitorskog centra kao prevodilačkog prostora između tehničkog sistema, institucionalnih zahteva i očekivanja zainteresovanih strana. Praktični doprinos rada ogleda se u predlogu konceptualnog modela koji se može dalje operacionalizovati povezivanjem sa principima upravljanja kvalitetom prema ISO 9001 i sa savremenim okvirima održivosti i ESG izveštavanja.

This paper examines the possibility of interpreting quality management in sustainable energy plants as an expanded organizational framework that includes not only technical and procedural indicators, but also transparency, public education, and social legitimacy. Drawing on the case study of the Visitor Center of the waste-to-energy plant in Prahovo, the paper develops an integrated philosophical-communication model grounded in hermeneutics, communicative rationality, narrative identity, philosophy of technology, actor-network theory, and sociology of knowledge. Methodologically, the research is designed as a pre-operational analytical reconstruction that combines theoretical analysis, case-study reasoning, and interpretation of the planned communication and educational functions of the Visitor Center. The findings indicate that quality in such systems should not be reduced to technical compliance and procedural control alone, but should also be understood as the company's capacity to make technological processes understandable, verifiable, and socially acceptable. The analysis further suggests that the Visitor Center can function as a translational space

between the technical system, institutional requirements, and stakeholder expectations. The practical contribution of the paper lies in the proposed conceptual model, which can be further operationalized through alignment with ISO 9001 quality management principles and contemporary sustainability and ESG disclosure frameworks.

1. Uvod

Savremena industrijska postrojenja održive energetike predstavljaju kompleksne tehnološko-organizacione sisteme u kojima se tehnički, društveni i komunikacijski procesi međusobno prepliću. U takvom kontekstu, upravljanje kvalitetom više nije moguće posmatrati isključivo kroz normativne, proceduralne ili tehničke parametre, već zahteva širu perspektivu koja obuhvata načine razumevanja tehnologije, interpretaciju internih praksi i dinamiku odnosa između institucija i javnosti. Kvalitet se ovde posmatra relacijski, kao međudejstvo industrije, tehnologije i društva, pa se upravljanje kvalitetom odnosi ne samo na tehničke i proceduralne pokazatelje, već i na razumevanje tehnologije, komunikaciju sa javnošću, interpretaciju praksi i društvenu legitimaciju industrijskih procesa. Posebno mesto u ovoj dinamici zauzimaju vizitorski centri koji funkcionišu kao otvoreni prostori u kojima se omogućava razumevanje kompleksnih tehnoloških procesa, oblikuju narativi o ulozi u javnosti i grade uslovi za poverenje i legitimnost. U tom smislu, Energana na otpad u Prahovu pruža prikladan empirijski okvir za promišljanje ovih pitanja jer pokazuje kako transparentnost procesa i edukativna infrastruktura postaju sastavni elementi celokupnog sistema kvaliteta, odnosno kako sistem kvaliteta nije samo tehnički, već i integrisani tehnički, komunikacioni i društveni okvir.

Uprkos rastu interesovanja za pitanja održivosti, javne komunikacije i percepcije tehnoloških rizika, u postojećoj literaturi retke su studije koje ove fenomene razmatraju iz perspektive filozofske hermeneutike, filozofije tehnike, teorije akterskih mreža i sociologije znanja. Takođe, još ređe se ovi teorijski okviri povezuju sa konceptima upravljanja kvalitetom ili sa infrastrukturu vizitorskog centra kao delom kompanijske prakse. Imajući to u vidu, ovaj rad nastoji da integriše Gadamerovu teoriju razumevanja, Habermasovu komunikativnu racionalnost, Rikerov narativni identitet, Hajdegerovo poimanje tehnike, Laturovu teoriju aktera i Manhajmovu dijagnostiku društvenih promena u jedinstven analitički okvir primenjen na industrijsko postrojenje održive energetike. Rad polazi od pretpostavke da takvo objedinjavanje pruža mogućnost za dublje i preciznije razumevanje kvaliteta kao relacijski zasnovane kategorije u kojoj su edukacija, transparentnost i društvena održivost međusobno uslovljene. Cilj je da se pokaže da Vizitorski centar i otvorena komunikacija na kojoj se on zasniva nisu tek dodatak složenom tehničkom sistemu kakav je Energana na otpad u Prahovu, već bitan činilac kvaliteta i dugoročne društvene legitimnosti. Drugim rečima, rad nastoji da Vizitorski centar predstavi kao mesto gde se tehnološki procesi prevode u društveno razumljive strukture značenja, čime se dodatno jača uloga postrojenja kao odgovornog aktera u javnom prostoru. Upravo integracija ovih dimenzija predstavlja važan preduslov stabilnosti, prihvatanja i dugoročne održivosti celokupnog sistema.

2. Metodološki pristup

Istraživanje je zasnovano na kvalitativnom i konceptualnom pristupu, a uz primenu studije slučaja i analitičke rekonstrukcije kao osnovne metodološke strategije. Predmet analize jeste Vizitorski centar Energane na otpad u Prahovu posmatran kao komunikacioni, edukativni i organizacioni element šireg sistema upravljanja kvalitetom. Osnovni cilj rada nije empirijsko merenje efekata, već teorijsko uobličavanje modela koji pokazuje na koji način transparentnost, interpretacija

tehnoloških procesa i odnos prema zainteresovanim stranama mogu biti uključeni u prošireni pojam kvaliteta u održivoj energetici.

Analiza se oslanja na tri grupe izvora: relevantnu filozofsku i društveno-teorijsku građu, literaturu iz oblasti upravljanja kvalitetom i održivosti, kao i raspoložive projektne i konceptualne elemente koji se odnose na planiranu funkciju Vizitorskog centra. U analitičkom smislu, teorijski pojmovi nisu korišćeni ilustrativno, već kao operativne kategorije za tumačenje četiri dimenzije proširenog kvaliteta: hermeneutičke, komunikativno-transparentne, narativne i mrežno-institucionalne. Na taj način uspostavlja se veza između filozofske interpretacije, korporativne komunikacije i savremenih zahteva za kvalitet, odgovornost i održivost (Gadamer, 1978; Habermas, 2017; Ricoeur, 2004; Latour, 2005; Manhajm, 1968).

Ograničenje rada proizlazi iz činjenice da Vizitorski centar u trenutku izrade teksta još nije operativan, pa zaključci nemaju status empirijski potvrđenih nalaza o iskustvu posetilaca. Zbog toga, rad treba razumeti kao preoperativni model i osnovu za buduća istraživanja. Njegova empirijska provera mogla bi da se sprovede nakon otvaranja centra kroz anketiranje posetilaca, polustrukturisane intervjuje, analizu percepcije transparentnosti i razumevanja tehnoloških procesa, kao i kroz praćenje pokazatelja poverenja, zadovoljstva i kvaliteta komunikacije sa zainteresovanim stranama.

U cilju buduće empirijske operacionalizacije predloženog modela, moguće je definisati skup kvalitativnih i kvantitativnih indikatora koji bi omogućili proveru njegove praktične primenljivosti. Hermeneutička dimenzija kvaliteta mogla bi se analizirati kroz nivo razumevanja tehnoloških procesa kod posetilaca, sposobnost interpretacije osnovnih funkcija postrojenja i stepen percepcije transparentnosti sistema. Komunikativno-transparentna dimenzija može se operacionalizovati pomoću indikatora kao što su poverenje u instituciju, procena dostupnosti i razumljivosti informacija, zadovoljstvo komunikacijom sa stručnim osobljem i spremnost zainteresovanih strana na dijalog. Narativna dimenzija mogla bi se pratiti kroz percepciju institucionalnog identiteta, doslednosti korporativnih vrednosti i društvene odgovornosti postrojenja, dok bi ontološko-mrežna dimenzija bila analizirana kroz mapiranje odnosa između tehničkih, institucionalnih i društvenih aktera uključenih u funkcionisanje sistema. Buduća empirijska istraživanja mogla bi obuhvatiti kombinaciju metoda kao što su anketiranje posetilaca, polustrukturisani intervjui sa zaposlenima i predstavnicima lokalne zajednice, fokus grupe, analiza medijskog diskursa i praćenje komunikacionih indikatora povezanih sa transparentnošću i poverenjem. Na taj način, predloženi filozofsko-komunikološki model mogao bi biti razvijen iz konceptualnog okvira u operativni alat za procenu kvaliteta i društvene održivosti industrijskih postrojenja održive energetike.

3. Teorijski okvir

Rezonovanje načina na koji se industrijski tehnološki procesi predstavljaju, razumeju i prihvataju u javnoj sferi zahteva teorijski horizont koji prevazilazi tehničke opise i uključuje dublje filozofsko-komunikološke uvide. U ovom radu, takav kontekst zasniva se na tri komplementarne perspektive: hermeneutičkoj filozofiji Hansa-Georga Gadamera, teoriji komunikativne racionalnosti Jirgena Habermasa i narativnoj hermeneutici Pola Rikera (Gadamer, 1978, Habermas, 2017, Ricoeur, 2004). Ove tri tradicije omogućavaju da se Vizitorski centar Energane na otpad u Prahovu razume kao prostor interpretacije, konstruktivnog dijaloga i narativnog konstruisanja identiteta. U toj perspektivi, javno razumevanje tehnologije shvata se kao hermeneutički događaj, komunikacija kao proces zajedničkog razumevanja, a institucionalna legitimnost kao rezultat otvorene, argumentovane i transparentne komunikacije sa zajednicom. Time se stvaraju teorijske pretpostavke za razumevanje

Vizitorskog centra ne samo kao edukativnog segmenta industrijskog postrojenja, već kao bitnog elementa u oblikovanju poverenja, naraciji institucionalnih vrednosti i uspostavljanju relacije između tehnologije i javnosti.

Gadamerova hermeneutička perspektiva omogućava da se javno razumevanje tehnologije posmatra ne kao puki prenos informacija, već kao hermeneutički događaj. Prema ovom filozofu, razumevanje nije samo mehanički tok prijema poruka, nego dinamički proces u kojem se ukrštaju horizonti strana koje aktivno učestvuju u razgovoru i predmeta razgovora koji treba da se razume (Gadamer, 1978). U tom smislu, Vizitorski centar industrijskog postrojenja može se shvatiti kao prostor interpretacije, gde posetilac dolazi u kontakt sa tehnološkim procesima kroz širok spektar različitih narativnih struktura i međusobno upoređivanje sopstvenog predrazumevanja sa novim informacijama koje institucija nudi, a u cilju postizanja obuhvatnijeg razumevanja. Prema Gadameru, „u provođenju razumijevanja dolazi zbiljski do stapanja horizonata“ (Gadamer, 1978: 340), pri čemu je važno naglasiti da „steći horizont uvijek znači učiti da gledamo preko onog što je blizu i preblizu, ne samo da bismo od toga odvojili pogled već da bismo ga bolje vidjeli u jednoj većoj cjelini i u pravilnijim razmjerama“ (Gadamer, 1978: 339). Takav pristup pretpostavlja da Vizitorski centar nije isključivo komunikacioni kanal čija je funkcija da jednosmerno (a neretko i selektivno) prenosi informacije, već prostor u kojem se podstiče razumevanje kao interakcija između posetioca, interpretativnog materijala i tehnološkog procesa. Dakle, tehnologija u ovom kontekstu nije samo predmet tehničkog opisa, već i predmet interpretacije, a Vizitorski centar postaje mesto gde se stvara smisao koji povezuje tehnički sistem sa kulturnim, društvenim i vrednosnim okvirom uže i/ili šire zajednice. Hermeneutika tako obezbeđuje teorijsku osnovu za tumačenje načina na koji javnost dolazi do razumevanja složenih industrijskih sistema.

Nadalje, Habermasova teorija komunikativne racionalnosti pruža konceptualne kriterijume za razumevanje transparentnosti kao normativnog zahteva modernih institucija (Habermas, 2017). U njegovoj teoriji, komunikacija je usmerena ka postizanju međusobnog razumevanja, zasnovana na argumentaciji, razmeni razloga i verifikaciji informacija, a ne na pokušajima manipulacije. Ovo znači da institucije (uključujući industrijska postrojenja) stiču legitimnost svaki put kada omoguće javnosti pristup informacijama na način koji je otvoren, razumljiv i uključen u racionalno-javne procese. Iz te perspektive, Energana i Vizitorski centar mogu se poistovetiti sa delom javne sfere jer služe kao mesta gde se odvija komunikacija između industrije i zajednice/javnosti. U habermasovskom okviru komunikativne racionalnosti, transparentnost se može razumeti kao deo strukture komunikativne akcije budući da informacije o tehnologiji, rizicima, procedurama i merama zaštite moraju biti iznete tako da omogućavaju formiranje racionalnog suda (Habermas, 2017). U tom smislu, otvorena komunikacija između industrije i zajednice/javnosti nije samo poželjan dodatak, nego osnovni uslov legitimnosti. Vizitorski centar time postaje ključni element kvaliteta institucionalnog delovanja jer doprinosi stvaranju poverenja putem pristupačne, argumentovane i javno dostupne komunikacije.

Filozofija narativa Pola Rikera omogućava razumevanje načina na koji institucije grade narativni identitet (Ricoeur, 2004). Prema ovom filozofu, identitet nije statična kategorija, već se konstituiše u procesu pripovedanja, kroz način na koji pojedinac, zajednica ili institucija organizuju svoje iskustvo u koherentnu priču. Primena ovih uvida na industrijsko postrojenje znači da Vizitorski centar ne prenosi samo informaciju, već oblikuje narativ tipa: „Ko smo mi?“ i „Šta radimo?“. Na taj način, tehnologija postaje razumljiva kroz priču, objašnjenja, dijagrame, istorijske prikaze, vrednosne pozicije i interpretacije koje se nude posetiocu. Oslanjajući se na Rikerov koncept narativnog identiteta, Vizitorski centar može se razumeti kao prostor narativne artikulacije institucionalnog identiteta; u njemu se tehnološki procesi Energane povezuju sa vrednostima održivosti, odgovornosti, brige za

zajednicu i racionalnog upravljanja resursima (Ricoeur, 2004). Ova narativna struktura ne služi dekorativnoj funkciji, već postaje konstitutivni element načina na koji javnost formira percepciju o tehnološkim praksama, njihovoj legitimnosti i njihovom mestu u društvu.

U narednim poglavljima, ovaj teorijski okvir biće nadograĐen pomoću perspektiva Hajdegera, Latura i Manhajma, koje omogućavaju produbljivanje ontološke, mrežne i sociološke dimenzije razumevanja tehnoloških sistema. Na taj način se, uz postojeće hermeneutičke, komunikativne i narativne pristupe, formira integrisani konceptualni horizont koji obuhvata i način ontološke pojavnosti tehnike, relacijski karakter akterskih mreža i društvene procese oblikovanja poverenja i legitimnosti. Preciznije, time se konstituiše analitički okvir koji omogućava sveobuhvatnije sagledavanje kvaliteta u industrijskim postrojenjima održive energetike.

4. Tehnologija kao predmet razumevanja

Dok su Gadamer, Habermas i Riker omogućili razumevanje tehnologije kao interpretativnog, komunikativnog i narativnog fenomena, Hajdeger otkriva dublju, ontološku dimenziju tehnike, bez koje integrisani filozofsko-komunikološki pristup upravljanju kvalitetom ostaje nepotpun. Njegovo promišljanje tehnike pomera fokus sa onoga šta tehnika radi na pitanje kako se svet kroz tehničku praksu uopšte pokazuje. Upravo ta dimenzija ima presudni značaj za razumevanje modaliteta na koji industrijsko postrojenje održive energetike ulazi u odnos sa zajednicom/javnošću, načinima tumačenja i percepcije rizika, ali i za to kako se gradi ili narušava poverenje u tehničke sisteme. Hajdeger odbacuje shvatanje tehnike kao neutralnog sredstva i uvodi pojam „Gestell“ (po-stav), pod kojim podrazumeva način na koji tehnološki sistem organizuje i otkriva svet tako da on postaje vidljiv, merljiv i operativan (Heidegger, 1982). S tim u vezi, ovaj filozof iznosi sledeće obrazloženje:

Po-stav se na nas svuda odnosi neposredno. On je, ako još smemo tako reći, stvarniji od svih atomskih energija i čitavog sveta mašina, stvarniji nego snaga organizacije, informacije i automatizacije. Jer, ono što zovemo po-stavom više ne zatičemo u horizontu predstavljanja koji nam dopušta da o biću bivstvujućeg razmišljamo kao o prisutnosti; po-stav se na nas više ne odnosi kao nešto prisutno, te nam je stoga u prvi mah stran. On ostaje stran pre svega zato što nije nešto poslednje, nego nam najpre daje ono što zapravo prožima konstelaciju bića i čoveka. Sadržavanje čoveka i bića na način uzajamnog izazivanja pokazuje nam, sa zaprepašujućom snagom, da je – i kako – čovek prisajedinjen biću, a da je – i kako – biće dodeljeno čoveku. U po-stavu vladaju neobično prisajedinjavanje i neobično dodeljivanje. Mi ovo prisajedinjavanje i dodeljivanje, u kojima su čovek i biće dati jedno drugom, moramo prosto da iskusimo (...) (Heidegger, 1982: 51-52)

Energana na otpad tako nije samo infrastruktura za energetske valorizovanje otpada; ona je izraz odreĐenog načina postavljanja sveta u kojem se otpad transformiše u resurs, tokovi materije pretvaraju u parametre, energija oblikuje kao merljiva jedinica, dok se rizik prikazuje kroz grafike i brojčane indikatore. Ovaj preobražaj nije isključivo tehnički budući da oblikuje ne samo način na koji ljudi doživljavaju industrijsko postrojenje, već i način na koji percipiraju svet oko sebe. Time se dimenzija kvaliteta pomera izvan granica tehničkih specifikacija i ulazi u polje ontologije, odnosno u modus na koji posetilac doživljava i razume svet koji mu se otkriva. Ukoliko je tehnika način otkrivanja sveta, onda je Vizitorski centar prostor u kojem se posetiocu omogućava susret sa načinom na koji sistem otkriva resurse, rizike i procese, tehnički sistem prevodi u oblik koji se može razumeti, odnosno „Gestell“ postrojenja čini vidljivim, transparentnim i interpretativno pristupačnim. Na taj način Vizitorski centar deluje kao interpretativni balans Hajdegerove problematizacije tehnike. Naime, dok tehnološki sistem po sebi teži instrumentalizaciji, Vizitorski centar omogućava vraćanje

tehničkog sistema u horizont razumevanja, dijaloga i značenja, čime se njegov način otkrivanja sveta otvara za javnost, odnosno odbija da ostane skriven u stručnim i proceduralnim kodovima.

Hajdegerovo poimanje tehnike objašnjava zašto percepcija rizika nikada nije samo funkcija statistike. Naime, ljudi ne reaguju samo na brojčane vrednosti emisija, već i na iskustvo prisutnosti samog postrojenja – na ambijent i ukupnu atmosferu koji tehnologija proizvodi u njihovom svakodnevnom okruženju. Upravo iz tog razloga, dva tehnički jednaka sistema mogu izazvati potpuno drugačije reakcije javnosti; narativ i način predstavljanja tehnologije postaju deo samog kvaliteta, dok se poverenje ne zasniva isključivo na činjenicama, već na celovitom doživljaju tehnologije. Upravljanje kvalitetom, nadalje, posmatrano iz hajdegerovske perspektive, obuhvata i ontološku održivost: u kojoj meri tehnološki sistem omogućava zajednici da svet koji otkriva doživi kao smislen, bezbedan i razumljiv.

Dok sa Gadamerom deli hermeneutičko poreklo tj. stav da razumevanje tehnike nije neutralan čin, već da je isti uslovljen horizontom posmatrača, Hajdeger proširuje Habermasovu koncepciju transparentnosti ističući da ono što je jasno i proverljivo ne mora nužno biti i egzistencijalno smisleno. U konačnom, sa Rikerom se povezuje u ideji narativa ističući da svet koji tehnika otkriva mora biti ispričan tako da bude deo identiteta zajednice i institucije. Na taj način Hajdeger nadograđuje prethodno postavljen teorijski okvir dodajući dimenziju načina na koji se tehnika pojavljuje, a što postaje sastavni deo kvaliteta (Heidegger, 1982, Gadamer, 1978, Ricoeur, 2004). U kontekstu upravljanja kvalitetom u održivoj energetici, hajdegerovska filozofija tehnike omogućava da razumemo da je kvalitet ujedno i način pojavnosti tehnološkog sistema, da edukacija i transparentnost nisu samo dopunske aktivnosti, već deo ontološkog čina otkrivanja tehnologije, da Vizitorski centar stabilizuje ne samo znanje, već i osećaj sigurnosti i poverenja zajednice, kao i da percepcija rizika proizilazi iz načina na koji se tehnologija doživljava, a ne samo iz toga šta meri. U nastavku rada, analiza će biti proširena uvidima Latureve teorije aktera koja omogućava sagledavanje industrijskog postrojenja kao mreže međusobno povezanih ljudskih i neljudskih aktera, te Manhajmovom sociologijom znanja koja objašnjava kako se vrednosne orijentacije i društveni konteksti oblikuju oko tehnoloških sistema. Na taj način, sledeća poglavlja logično nadovezuju i dopunjuju dosadašnje hermeneutičke, komunikativne i narativne uvide, otvarajući put integrisanom pristupu razumevanju kvaliteta u održivoj energetici.

5. Tehnologija kao mreža aktera

Latur uvodi radikalno drugačiji način razumevanja tehnike i tehnologije, pomerajući fokus sa esencije tehnološkog objekta na mrežu odnosa koja omogućava da tehnološki sistem funkcioniše, opstaje i proizvodi efekte (Latour, 2005). Za razliku od tradicionalnih teorija koje prave strogu razliku između društvenog i tehničkog, Latur insistira na tome da je takva podela veštačka budući da je svaka tehnologija ujedno društvena, te da je svaki društveni proces uvek materijalno-tehnički utemeljen. U tom konceptualnom okviru pridev *društveno* ne označava izdvojeni entitet među drugim entitetima, već specifičan modalitet povezivanja među stvarima koje, posmatrane same po sebi, ne poseduju društvena svojstva. Upravo iz tog razloga, Laturev pristup je ključan za razumevanje industrijskog postrojenja održive energetike, gde se vrednovanje kvaliteta ne tiče samo tehničke pouzdanosti, već i stabilnosti odnosa između ljudi, institucija, normi i materijalnih elemenata.

Latureva aktantsko-mrežna teorija polazi od načela simetrije, prema kojem su ljudski i neljudski akteri ravnopravni u oblikovanju sistema, a njihova agensnost ne zavisi od toga da li su subjekti ili objekti. On podvlači da tehnologije, uređaji, dokumenti, propisi i prirodni procesi imaju jednako

važnu ulogu kao i ljudi u formiranju ishoda u mreži. Ovo stanovište je jasno artikulirano u savremenim interpretacijama njegove teorije, gde se ističe da ona tretira ljude, tehnologije, ideje i objekte kao jednako važne aktere koji oblikuju ishode. To znači da industrijsko postrojenje samo po sebi nije centralni agent, već da je čvorište mnogostrukih veza: senzora, protokola, zaposlenih, standarda, dozvola, algoritama, normi i očekivanja zajednice. Kvalitet i održivost proizlaze iz toga kako su te veze organizovane i stabilizovane. Latur tvrdi da svet nije sastavljen od odvojenih entiteta, već od heterogenih mreža koje se neprestano preoblikuju i učvršćuju. Društveni poredak, tehnički sistem ili naučni rezultat nisu unapred dati entiteti, već postignuća složenih, heterogenih mreža. Za Energana na otpad ovo znači da sistem nije samo skup uređaja i ljudi, već mreža međuzavisnosti, zatim da kvalitet nije atribut objekta, već stanje mreže, kao i da održivost nije svojstvo tehnologije, već rezultat dugotrajnog usklađivanja aktera. Dakle, u svetlu Latureve teorije, Energana na otpad se javlja kao mreža u kojoj učestvuju: građani (kao nosioci percepcija i normativnih očekivanja), operateri, mašine, mreža senzora, pravni standardi, laboratorijske analize, odlagališta otpada, regulatorne agencije, pa čak i atmosferski i termodinamički procesi. Svi ovi entiteti su aktanti koji zajedno proizvode stabilnost ili nestabilnost sistema.

Jedan od ključnih pojmova u Laturevoj teoriji je prevođenje tj. proces u kojem akteri usklađuju svoje interese, redefinišu identitete i stabilizuju odnose u mreži. Prevođenje je mehanizam preko kojeg se gradi jedinstveni sistem iz mnoštva heterogenih elemenata. To je proces u kojem akteri pregovaraju, redefinišu i stabilizuju svoje uloge i odnose. U kontekstu Energane, proces prevođenja obuhvata kako senzori pretvaraju fizičke procese u podatke, kako inženjeri te podatke preoblikuju u operativne odluke, kako se pravni standardi transponuju u tehničke zahteve, te kako Vizitorski centar tehnički sistem prevodi u narativ razumljiv zajednici/javnosti. Kvalitet sistema zavisi od toga koliko su ovi prevodi stabilni i razumljivi jer svaki poremećaj (kvar senzora, medijski nesporazum, nedovoljno razumljiv prikaz rizika) menja konfiguraciju mreže. U integrisanom okviru ovog rada, Vizitorski centar predstavlja idealnu ilustraciju Laturevog učenja. On funkcioniše kao mrežno čvorište u kojem se susreću i stabilizuju interesi različitih aktera: inženjera (koji objašnjavaju procese), tehnologije (koje vizualizuju podatke), lokalne zajednice (koja traži razumevanje i sigurnost), regulatornih tela (koja zahtevaju standarde i nadzor), te narativa (koji treba da bude dosledan praksama). Vizitorski centar u tom smislu nije samo komunikacijski dodatak, već je mehanizam stabilizacije mreže aktera jer omogućava prevođenje između tehničkih procesa i društvenih očekivanja. Time se direktno utiče na kvalitet u proširenom smislu; kvalitet kao sposobnost mreže da ostane koherentna, transparentna i poverljiva.

Laturev doprinos prirodno se povezuje sa Gadamerom budući da je i kod jednog i kod drugog filozofa naglašena relacijska priroda razumevanja. Slična veza uspostavlja se i sa Habermasom jer komunikativna transparentnost predstavlja uslov stabilnosti i legitimnosti odnosa unutar mreže aktera. Rikerova perspektiva je takođe kompatibilna sa Laturevim pristupom jer mreža mora biti narativno predstavljena kako bi postala ne samo prepoznatljiva, nego i društveno prihvatljiva. Konačno, Laturev okvir konkretizuje Hajdegerovo razumevanje ontološkog otkrivanja sveta, pokazujući kako se to otkrivanje ostvaruje kroz materijalne i društvene veze koje konstituišu akterske mreže (Latour, 2005; Gadamer, 1978; Habermas, 2017; Ricoeur, 2004; Heidegger, 1982). Latureva perspektiva doprinosi integrisanom filozofsko-komunikološkom pristupu upravljanju kvalitetom time što kvalitet pozicionira kao stanje mreže, a ne kao svojstvo izolovanog objekta. Ona pokazuje da su komunikacija i edukacija sastavni elementi mreže, a ne naknadni prilozi tehnici, te da je poverenje rezultat stabilizacije aktera, a ne samo političke odluke ili informativnih kampanja. Istovremeno, Laturev okvir omogućava operacionalizaciju kvaliteta kroz mapiranje aktera, analizu prevoda i stabilnosti veza,

čime priprema teren za Manhajmovu dijagnostiku društvenih promena budući da mreže uvek deluju u konkretnim istorijskim i vrednosnim kontekstima.

6. Odgovornost industrije

Manhajm je velikim delom posvećen razumevanju načina na koji se društvene promene odražavaju na sisteme znanja, institucije i kolektivne orijentacije (Manhajm, 1968). On tvrdi da različite društvene grupe razvijaju različite načine mišljenja zasnovane na sopstvenom društvenom položaju i iskustvu, a što predstavlja njegovu čuvenu koncepciju relacionizma. Promene u industrijama i tehnologijama ne utiču jednako na sve segmente društva budući da stvaraju raskorak u znanju, doživljaju rizika i razumevanju svrhe industrijskih postrojenja. Ovaj uvid je presudan za održivu energetiku jer tehnološki sistem može biti objektivno bezbedan, ali ako različite društvene grupe imaju različite društvene pozicije, njihova tumačenja rizika i poverenja biće divergentna. Upravljanje kvalitetom, stoga mora obuhvatiti i upravljanje društvenim očekivanjima, a što je direktan rezultat Manhajmove dijagnostike modernog društva.

Manhajmova osnovna teza glasi da se modernost suočava sa pluralnošću ideologija i vrednosnih sistema koji su posledica istorijskih lomova i ubrzanih promena (ratovi, tehnološke tranzicije, društvene krize). Njegovo shvatanje modernosti opisuje fragmentaciju zajedničkih značenja i rastuću nesigurnost u institucije. U analizi posleratne Evrope, Manhajm naglašava da su raspad konsenzusa i kriza vrednosti tipična obeležja modernog društva, te da različite ideologije nastaju kao odgovori na društvene lomove. Iako svoje uvide razvija u kontekstu rane modernosti, njegove dijagnostike pluralizacije vrednosti, krize institucionalnog poverenja i fragmentacije zajedničkih značenja ostaju podjednako relevantne i za savremenu fazu kasne ili refleksivne modernosti. Stoga je njegovo razumevanje modernog društva primenljivo i na savremeni kontekst energetskih tranzicija i održivosti. Imajući u vidu da industrija održive energetike deluje u kontekstu klimatskih promena, ekoloških zahteva, energetske tranzicije, ali i lokalnih socio-ekonomskih tenzija, ne sme se smetnuti s uma da upravo u takvim okolnostima odgovornost industrije nije samo regulatorna, već i sociološka i etička.

Manhajm razvija ideju da društvo ne može opstati bez aktivnog socijalnog planiranja, jer *laissez-faire* poredak, odnosno prepuštanje društvenih procesa spontanim tokovima bez koordinisanog planiranja ili institucionalnog posredovanja, u periodima dubokih transformacija proizvodi kaos i krize legitimiteta. Prema njegovom mišljenju, moderno društvo zahteva institucije koje svesno upravljaju informacijama, transparentno komuniciraju i odgovorno grade poverenje. Kada taj uvid prevedemo u kontekst održive energetike dolazimo do zaključka da industrijsko postrojenje ima aktivnu odgovornost da gradi poverenje, da Vizitorski centar funkcioniše kao deo planirane infrastrukture javne orijentacije, zatim da transparentnost nije dobra volja, već normativni zahtev modernog društva, kao i da su kvalitet i legitimitet nerazdvojivi od društvene odgovornosti. Drugim rečima, Manhajm pruža teorijski osnov da se komunikacija, edukacija i javno uključivanje tretiraju kao integralni deo sistema kvaliteta industrije, a ne kao dodatne aktivnosti.

Osnovna poenta Manhajmove sociologije znanja jeste da se uverenja i interpretativni obrasci uvek formiraju u društvenim kontekstima. Saznanje o industriji (npr. da je proces bezbedan) nije neutralna činjenica, već je deo kolektivnog tumačenja koje se menja kroz komunikaciju, iskustvo i institucionalni kredibilitet. U tom smislu, statističko saznanje o emisijama i rizicima ima smisla samo ako se uklopi u društveni okvir razumevanja, poverenje u industriju zavisi od toga da li zajednica veruje njenoj interpretaciji sveta, dok Vizitorski centar postaje mesto gde se proizvodi i stabilizuje zajedničko razumevanje. Manhajmov stav da se ideje oblikuju u odnosu na društveni položaj i istorijski kontekst

direktno objašnjava zašto industrija mora aktivno raditi na komunikaciji. Znanje nije samo tehnički resurs, već društvena činjenica koja se gradi u mreži odnosa između industrije, zajednice, medija i institucija. Manhajmovo insistiranje na odgovornosti institucija i potrebi za demokratskim planiranjem dobija novu dimenziju kada se primeni na industrije koje upravljaju infrastrukturom visokog uticaja (energetika, otpad, zaštita životne sredine). Njegovo stanovište da su moderni sistemi skloni krizama, te da je neophodna koordinirana institucionalna briga o dugoročnim posledicama, otvara put razumevanju odgovornosti industrije kao obaveze kako prema sadašnjim generacijama (bezbednost i transparentnost) tako i prema budućim naraštajima (održivost i klimatska stabilnost). Uz to, ne smeju se zanemariti ni obaveze prema društvenom poretku (legitimitet i stabilnost institucija). Drugim rečima, industrija je akter društvene stabilnosti, a ne samo ekonomskog rasta.

U ovom radu Manhajm zauzima ključnu sociološku poziciju u filozofsko-komunikološkoj osnovi upravljanja kvalitetom. Gadamer objašnjava hermeneutičko razumevanje tehnologije, Habermas normativnu osnovu komunikativne transparentnosti i racionalne javnosti, Riker narativni identitet institucije, Hajdeger ontološki način pojavljivanja tehnike, Latur relacijski i mrežni karakter tehničkih sistema, a sam Manhajm društvene promene, legitimitet, vrednosnu orijentaciju i institucionalnu odgovornost. Nadalje, on uvodi element društvene reprodukcije poverenja, naglašavajući da kvalitet nije samo tehničko svojstvo sistema, nego i pitanje društvene interpretacije, vrednosne usklađenosti i institucionalne odgovornosti. Iz svega rečenog proizilazi da se Manhajm prirodno uklapa u centralnu tezu rada da je upravljanje kvalitetom u održivoj energetici interdisciplinarni i relacijski proces koji povezuje tehnološke performanse, komunikativnu transparentnost, hermeneutičko razumevanje i društveni legitimitet (Manhajm, 1968; Habermas, 2017; Latour, 2005).

7. Studija slučaja: Vizitorski centar i Energana na otpad u Prahovu (pre-operativna analitička rekonstrukcija)

U ovoj studiji slučaja analizira se Vizitorski centar Energane na otpad u Prahovu u fazi njegovog konceptualnog i infrastrukturnog razvoja, budući da u trenutku izrade rada Centar još uvek nije otvoren za javnost. Stoga, umesto evaluacije postojećih praksi, pristup se zasniva na analitičkoj rekonstrukciji tj. metodi koja omogućava primenu teorijskog okvira na projektovanu strukturu vizitorskog iskustva, planirane sadržaje i ulogu Vizitorskog centra u budućem sistemu kvaliteta postrojenja. Primarna intencija je da se pokaže kako integrisani filozofsko-komunikološki okvir može biti implementiran u posetilačkom okruženju industrijskog postrojenja održive energetike, iako sam Centar još nije operativan. Pri tome, analitička rekonstrukcija počiva na dostupnim elementima: projektnoj dokumentaciji, idejnom dizajnu vizitorskog prostora, konceptualnim edukativnim materijalima i planiranoj komunikacionoj strategiji postrojenja. Na taj način, studija slučaja omogućava da se četiri dimenzije proširene metrike kvaliteta (hermeneutička, komunikativno-transparentna, narativna i ontološko-mrežna) prikažu kao predviđeni funkcionalni elementi Vizitorskog centra.

Iako neposredna iskustva posetilaca još ne postoje, predviđeni interpretativni moduli Vizitorskog centra ukazuju na to kako će hermeneutička dimenzija biti ostvarena. Naime, tok posete je koncipiran tako da posetioca vodi od šireg konteksta održive energetike ka razumevanju konkretnih procesa Energane, kroz kombinaciju naracije, vizuelnih prikaza i fizičkog uvida u tehnologiju. Upravo to omogućava usaglašavanje predznanja posetioca sa novim informacijama, a što je osnovni Gadamerov hermeneutički uslov razumevanja. Kroz planirane sadržaje, posetiocu se omogućava aktivno tumačenje tehnoloških procedura, čime se Vizitorski centar pozicionira kao prostor transformacije horizonta razumevanja, a ne puke prezentacije informacija.

U skladu s habermasovskim principima komunikativne racionalnosti, planirane aktivnosti i sadržaji predviđaju jasno prezentirane podatke o tehnološkim procesima, bezbednosnim procedurama, merama zaštite životne sredine i kontrolama emisija. Informacioni paneli, vizualizacije performansi i dostupnost ključnih podataka imaju za cilj da omoguće racionalno preispitivanje i proverljivost tehnoloških informacija. Tokom posete planirana je dvosmerna komunikacija između stručnih vodiča i posetilaca, čime Vizitorski centar funkcioniše kao mikro-javna sfera u kojoj se legitimitet tehnološkog sistema gradi putem direktne, otvorene i argumentovane komunikacije. Time se transparentnost postrojenja ne tretira kao komunikacijska dopuna, već kao strukturni element kvaliteta.

U fazi projektovanja već je oblikovan koherentan narativ o ulozi Energane u lokalnoj (ali i široj) zajednici, njenim vrednostima održivosti i odgovornog upravljanja resursima. Tok kretanja posetilaca Vizitorskog centra predviđa narativno organizovan prikaz tehnoloških procesa, koji nije samo tehničko objašnjenje, već deo šire priče o transformaciji otpada u energiju, društvenoj odgovornosti postrojenja, smanjenju ekološkog opterećenja i održivim praksama. U skladu sa Rikerovim konceptom narativnog identiteta, postrojenje se posredstvom Vizitorskog centra ne predstavlja kao puki tehnički dodatak, već kao akter sa identitetom i misijom. Koherentnost između planiranog narativa i projektovanih praksi postaje važan indikator kvaliteta, budući da narativ oblikuje način na koji će javnost doživeti tehnologiju i njenu legitimnost.

Planirane aktivnosti i sadržaji Vizitorskog centra omogućavaju, nadalje, implementaciju uvida Hajdegera, Latura i Manhajma u operacionalni okvir upravljanja kvalitetom. Hajdegerovska dimenzija ogleda se u načinu na koji Centar treba da otkriva svet tehnologije: posetiocu se omogućava uvid u to kako tehnološki sistem tretira otpad kao resurs, kako rizici postaju merljivi i kako se svet pojavljuje u tehničkoj formi. Time se tehnologija prevodi iz apstraktne infrastrukture u iskustveni, smisleni horizont. Latureva mrežna perspektiva prisutna je u načinu na koji Vizitorski centar funkcioniše kao čvorište prevođenja između aktera: projektovana struktura omogućava susret tehničkih podataka, regulatornih okvira, stručnih tumačenja, vrednosnih očekivanja zajednice i institucionalnih narativa. Kvalitet se tu shvata kao stanje stabilnosti mreže, a Centar je zamišljen kao ključni element njene stabilizacije. Manhajmova sociološka dimenzija odnosi se na predviđeni način na koji Vizitorski centar treba da upravlja divergentnim očekivanjima i vrednosnim orijentacijama različitih društvenih grupa. Edukativni sadržaji osmišljeni su tako da unaprede razumevanje savremenih ekoloških i energetskih izazova i time doprinesu dugoročnoj legitimnosti postrojenja.

U ovoj analitičkoj rekonstrukciji, Vizitorski centar funkcioniše kao primenjeni model integrisanog filozofsko-komunikološkog pristupa upravljanju kvalitetom. Četiri dimenzije proširenog kvaliteta jasno su ugradive u njegovu projektovanu strukturu: hermeneutička (kroz interpretativnu organizaciju sadržaja), komunikativna (kroz planiranu transparentnost), narativna (kroz artikulisani identitet postrojenja) i ontološko-mrežna (kroz stabilizaciju odnosa između tehnike, institucije i zajednice). Na taj način, Vizitorski centar Energane na otpad u Prahovu predstavlja idealnu ilustraciju na koji način se filozofske teorije mogu integrisati u operativni model industrijske komunikacije i kako transparentnost, edukacija i narativna koherencija postaju strukturni elementi kvaliteta i legitimiteta savremenog postrojenja održive energetike.

Važno je naglasiti i da se predloženi integrisani model može tumačiti kao dopuna klasičnom razumevanju upravljanja kvalitetom u skladu sa principima na kojima počiva ISO 9001. Posebno su relevantni usmerenost na zainteresovane strane, rukovođenje, uključivanje ljudi, procesni pristup, stalno unapređenje, odlučivanje na osnovu dokaza i upravljanje odnosima. U tom okviru, Vizitorski centar se ne pojavljuje samo kao komunikacioni dodatak, već kao kompanijski mehanizam koji podržava razumevanje potreba zainteresovanih strana, jača doslednost komunikacionih procesa i

doprinosi poverenju u sistem kvaliteta. Transparentna prezentacija tehnoloških procesa, bezbednosnih procedura i mera zaštite životne sredine može se posmatrati kao deo šire kompanijske kulture da kvalitet učini proverljivim i razumljivim (ISO, 2025; ISO, 2026). Model je istovremeno kompatibilan sa savremenim okvirima održivosti i ESG izveštavanja, koji naglašavaju značaj strategije, upravljanja rizicima i merljivih pokazatelja performansi. U tom smislu, komunikaciona i edukativna infrastruktura Vizitorskog centra može imati važnu ulogu u jačanju društvene dimenzije održivosti, posebno u oblastima transparentnosti, odnosa sa zajednicom, razumevanja rizika i legitimiteta industrijskog delovanja. Time se pokazuje da kvalitet u održivoj energetici nije samo pitanje tehničke pouzdanosti postrojenja, već i sposobnosti industrije da odgovorno objasni sopstvene procese, upravlja očekivanjima javnosti i pokaže povezanost između operativnih performansi, društvene odgovornosti i dugoročne održivosti (IFRS Foundation, 2026).

Integrisani filozofsko-komunikološki model razvijen u ovom radu može se dodatno povezati sa osnovnim principima standarda ISO 9001 kroz operacionalizaciju komunikacionih i interpretativnih procesa unutar sistema kvaliteta. Hermeneutička dimenzija modela posebno je kompatibilna sa principom usmerenosti na zainteresovane strane budući da podrazumeva razumevanje potreba, očekivanja i interpretativnih horizonata različitih društvenih grupa. Habermasovski koncept komunikativne racionalnosti korespondira sa principima odlučivanja zasnovanog na dokazima, transparentnosti procesa i upravljanja odnosima jer insistira na proverljivosti informacija, argumentovanoj komunikaciji i dostupnosti relevantnih podataka zainteresovanim stranama. Rikerov koncept narativnog identiteta povezan je sa institucionalnom kulturom, strateškom komunikacijom i doslednošću institucionalnih vrednosti, dok Laturova teorija akterskih mreža omogućava razumevanje sistema kvaliteta kao mreže međuzavisnih tehničkih, ljudskih i regulatornih elemenata čija stabilnost direktno utiče na performanse organizacije.

Predloženi model istovremeno pokazuje visok stepen kompatibilnosti sa savremenim ESG okvirima i principima održivosti. U okviru ESG paradigme, transparentnost tehnoloških procesa, komunikacija sa zajednicom, upravljanje percepcijom rizika i društvena legitimnost predstavljaju značajne pokazatelje društvene i upravljačke dimenzije održivosti. Vizitorski centar u tom smislu može imati funkciju institucionalnog mehanizma za jačanje „stakeholder engagement“ procesa, unapređenje društvenog poverenja i podršku odgovornom korporativnom upravljanju. Time se kvalitet više ne određuje isključivo tehničkim performansama sistema, već i sposobnošću kompanije da kroz otvorenu komunikaciju, edukaciju i participativni pristup obezbedi dugoročnu društvenu prihvatljivost i održivost tehnološkog sistema.

8. Zaključak

Analiza sprovedena u radu pokazuje da se upravljanje kvalitetom u postrojenjima održive energetike može produktivno proširiti izvan usko tehničkog i proceduralnog okvira. Povezivanjem hermeneutike, komunikativne racionalnosti, narativnog identiteta, filozofije tehnike, teorije akterskih mreža i sociologije znanja, kvalitet je određen kao relacijska i višedimenzionalna kategorija koja uključuje razumevanje tehnologije, transparentnost institucionalnog delovanja, društvenu legitimnost i stabilnost odnosa sa zainteresovanim stranama. Na primeru Vizitorskog centra Energane na otpad u Prahovu pokazano je da edukativna i komunikaciona infrastruktura može imati status strukturnog elementa sistema kvaliteta. Vizitorski centar u tom smislu funkcioniše kao prostor tumačenja, provere, narativnog oblikovanja identiteta i posredovanja između tehničkog sistema i javnosti. Takva funkcija posebno je značajna u oblastima u kojima percepcija rizika, poverenje i društvena prihvatljivost neposredno utiču na legitimitet industrijskog postrojenja.

Originalnost predloženog pristupa ogleda se u tome što Vizitorski centar ne posmatra kao spoljni komunikacioni dodatak industrijskom sistemu, već kao njegov unutrašnji, funkcionalni i legitimacioni element. Time se otvara prostor za drugačije razumevanje kvaliteta u savremenim postrojenjima održive energetike: kvalitet nije samo pitanje tehničke ispravnosti i usaglašenosti sa standardima, već i sposobnosti kompanije da svoje procese učini interpretativno dostupnim, društveno proverljivim i komunikativno održivim. U tom smislu, Vizitorski centar može biti shvaćen kao mesto na kome se tehnički sistem prevodi u javno razumljiv oblik, a institucionalna odgovornost dobija konkretnu prostornu i institucionalnu formu.

Praktična vrednost predloženog modela ogleda se u tome što omogućava povezivanje filozofsko-komunikološke analize sa principima ISO 9001 i sa savremenim zahtevima održivosti i ESG izveštavanja. Time se otvara mogućnost da se transparentnost, edukacija, komunikacija sa zainteresovanim stranama i narativna koherentnost tretiraju kao merljive i upravljive dimenzije kvaliteta, a ne kao sporedne aktivnosti kompanije. Istovremeno, potrebno je naglasiti da je rad zasnovan na preoperativnoj analitičkoj rekonstrukciji, pa njegove nalaze treba empirijski proveriti nakon otvaranja Vizitorskog centra. Buduća istraživanja mogu obuhvatiti anketiranje posetilaca, intervju sa zaposlenima i predstavnicima zajednice, kao i praćenje pokazatelja poverenja, razumevanja tehnoloških procesa i zadovoljstva komunikacijom. Na taj način predloženi model može biti dalje razvijen iz konceptualnog okvira u operativni alat za unapređenje kvaliteta i društvene održivosti industrijskih postrojenja.

9. Literatura

- [1] *** Introduction to the ISSB and IFRS Sustainability Disclosure Standards, IFRS Foundation, London, United Kingdom, 2026.
- [2] *** ISO 9001 explained, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2026.
- [3] *** Quality management principles, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.
- [4] **Agaton, C. B., Santos, M. J. A.**, Social Acceptability of Waste-to-Energy: Research Hotspots, Technologies, and Factors, *Clean Technologies*, 7 (2025), 3, Article 63.
- [5] **Bullock, O. M., Colón Amill, D., Shulman, H. C., Dixon, G. N.**, Jargon as a barrier to effective science communication: Evidence from metacognition, *Public Understanding of Science*, 28 (2019), 8, pp. 845–853.
- [6] **Gadamer, H.-G.**, *Istina i metoda*, Veselin Masleša, Sarajevo, 1978.
- [7] **Habermas, J.**, *Teorija komunikativnog delovanja I i II*, Akademska knjiga, Novi Sad, 2017.
- [8] **Heidegger, M.**, *Mišljenje i pevanje*, Nolit, Beograd, 1982.
- [9] **Iannaccone, B., Šoltésová, M., Molokáč, M., Taušová, M.**, The Role of the Visitor Center in Destination Development, *Sustainability*, 16 (2024), 22, Article 10062.
- [10] **Kato-Nitta, N., Maeda, T., Iwahashi, K., Tachikawa, M.**, Understanding the public, the visitors, and the participants in science communication activities, *Public Understanding of Science*, 27 (2018), 7, pp. 857–875.
- [11] **Latour, B.**, *Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network-Theory*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 2005.
- [12] **Manhajm, K.**, *Ideologija i utopija*, Nolit, Beograd, 1968.
- [13] **Ricoeur, P.**, *Sopstvo kao drugi*, Jasen, Beograd; Nikšić, 2004.

Originalni naučni rad

Ključne reči:

*mobilno učenje; kvalitet usluga;
menadžment kvaliteta; PLS-SEM*

FAKTORI KOJI UTIČU NA KVALITET USLUGE U MOBILNOM UČENJU: PLS-SEM PRISTUP

Key words:

*mobile learning; service quality; quality
management; PLS-SEM*

FACTORS INFLUENCING SERVICE QUALITY IN MOBILE LEARNING: A PLS-SEM APPROACH

Lidija KRSTIĆ*

* lkrstic@tfbor.bg.ac.rs

Sanela ARSIĆ

Aleksandra RADIĆ

Isidora MILOŠEVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0009-0009-6618-4723

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0000-0002-1957-566X

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0000-0003-4253-8004

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0000-0001-5539-8253

Razvoj mobilnih tehnologija značajno je uticao na obrazovno okruženje, ističući značaj upravljanja kvalitetom i standardizacije u pružanju obrazovnih usluga. Mobilno učenje (m-učenje), kao nastavak e-učenja, omogućava studentima fleksibilan i interaktivan pristup obrazovnom sadržaju putem mobilnih uređaja, što doprinosi standardizaciji i poboljšanju kvaliteta obrazovnog procesa u visokom obrazovanju. Cilj ovog istraživanja je ispitivanje faktora koji oblikuju percepciju kvaliteta usluga mobilnog učenja, sa fokusom na očekivani napor, uticaj predavača, i ličnu inovativnost studenata. Predloženi model istraživanja testiran je korišćenjem modeliranja strukturnih jednačina parcijalnih najmanjih kvadrata (PLS-SEM), na osnovu podataka ankete prikupljenih od studenata Univerziteta u Beogradu, pružajući uvid u ključne determinante koje doprinose kvalitetu usluga mobilnom učenju. Rezultati istraživanja potvrđuju sve postavljene hipoteze, ukazujući da očekivani napor, uticaj predavača i lična inovativnost studenata imaju statistički značajan i pozitivan efekat na percepciju kvaliteta usluga mobilnog učenja. Dobijeni rezultati pružaju smernice donosiocima odluka i visokoškolskim institucijama za unapređenje dizajna i implementacije mobilnih obrazovnih platformi u cilju postizanja višeg nivoa kvaliteta i standardizacije obrazovnih usluga.

The development of mobile technologies has significantly affected the educational environment, emphasizing the importance of quality management and standardization in the provision of educational services. Mobile learning (m-learning), as a continuation of e-learning, allows students flexible and interactive access to educational content via mobile devices, which contributes to the standardization and improvement of the quality of the educational process in higher education. The aim of this research is to examine the factors that shape the perception of the quality of mobile learning services, with a focus on the expected effort, the influence of the lecturer and the personal innovativeness of the students. The proposed research model was tested using partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM), based on survey data collected from students at the University of Belgrade, providing insight into the key determinants that contribute to the quality of services in mobile learning. The research results confirm all proposed hypotheses, indicating that effort expectancy, instructor influence, and students' personal innovativeness have a statistically significant and positive effect on the perceived quality of mobile learning services. The obtained findings provide valuable guidance for decision-makers and higher education institutions in improving the design and

implementation of mobile learning platforms, with the aim of achieving higher levels of service quality and standardization in education.

1. Introduction

The rapid development of digital technologies has significantly transformed educational systems, with mobile learning (m-learning) playing an increasingly important role in higher education. Mobile learning enables students to access course content and participate in educational activities via mobile devices, providing flexibility, accessibility, and continuous learning regardless of time or location [1, 2]. In the current context of digitalization, m-learning is increasingly regarded as a key element of modern, student-centred educational approaches [3].

The effectiveness of mobile learning systems largely depends on users' perceptions of the quality of services these systems offer. Service quality in digital educational environments includes aspects such as system reliability, ease of use, speed of access to information, and ease of navigation [4]. Previous research indicates that higher perceived service quality positively affects user satisfaction, engagement, and the intention to continue using m-learning platforms [5].

Although mobile learning has been widely accepted, the factors influencing perceptions of service quality have not yet been thoroughly explored. Previous research mainly focuses on technology acceptance, while recent literature stresses the importance of examining user perceptions and individual characteristics [6]. Expected effort is a key factor, referring to how easy users perceive a system to be. Systems that are intuitive and demand little effort are more likely to be rated positively [7]. Furthermore, the influence of lecturers as a form of social influence plays a significant role in shaping students' attitudes. Support and recommendations from teachers can boost students' confidence and encourage the use of m-learning systems [8]. Personal innovativeness is also a key individual trait, as users who are open to new technologies are more likely to accept and evaluate them positively [9].

Based on the above, this paper aims to examine the influence of expected effort, instructor influence, and personal innovativeness on the quality of mobile learning services. To test the proposed model, the partial least squares structural equation modelling method was utilized. This approach enables the simultaneous examination of multiple relationships among constructs and provides reliable insights into the factors affecting service quality in the m-learning environment.

2. Literature review

In recent years, substantial research has explored the factors influencing the acceptance and use of mobile learning (m-learning), with increasing focus on service quality as a key outcome of digital education systems. Previous studies reveal that expected effort, lecturer influence, and personal innovativeness have a statistically significant impact on user behavior and their assessment of the m-learning system [10]. Similar findings are reported in other studies, where all key constructs were found to have a notable effect, with personal innovativeness often emerging as one of the strongest predictors of technology acceptance [11]. Regarding expected effort, research suggests that systems which are simple to use and intuitive are more likely to be positively evaluated by users, although its impact is sometimes less prominent compared to other factors [7].

The influence of lecturers, as a form of social influence, has been confirmed as a significant factor in educational contexts, where teacher support and recommendations foster greater confidence and willingness among students to engage with m-learning systems [8].

Personal innovativeness is consistently recognized in the literature as an important individual factor, with more innovative users demonstrating a greater propensity to accept new technologies and

a more favorable assessment of their quality [9]. In addition, contemporary research highlights that system quality, user experience, and platform design play vital roles in shaping perceptions of service quality in mobile learning [3, 5]. Recent studies also reaffirm that the combination of technological, social, and individual factors underpins the successful implementation of m-learning systems, with integrated models providing a reliable framework for analyzing these relationships [8, 12]. Based on a review of relevant literature, it can be concluded that expected effort, lecturer influence, and personal innovativeness are key determinants of perceived service quality. However, there remains a lack of research directly examining their impact on the quality of mobile learning services, representing a research gap this paper aims to address.

2.1. Research dimensions and hypothesis

Understanding the factors that influence the perception of service quality in mobile learning requires integrating technological, social, and individual determinants. Contemporary research indicates that the success of digital educational systems depends not only on technical characteristics but also on how users perceive ease of use, environmental support, and their own readiness to adopt new technologies [12, 13]. In this context, models such as UTAUT are often used to explain user behavior in digital environments, while recent research emphasizes the need to expand them by including service quality as a key outcome [5, 14]. Based on the literature review, this paper analyses expected effort, lecturer influence, and personal innovativeness as determinants of service quality in mobile learning.

Expected effort refers to the extent to which users perceive a system as simple to use and not requiring significant effort. In the context of mobile learning, this construct encompasses perceptions of ease of use, interface clarity, and speed of system adoption. Research indicates that simple and intuitive systems significantly influence perceptions of service quality, as they allow users to operate them more efficiently without additional difficulties [7]. Recent studies confirm that ease of use remains a key factor in evaluating digital educational platforms, particularly in mobile environments where quick access to information is crucial [13]. Based on this, the following hypothesis is proposed:

H1: Expected effort has a positive effect on the service quality of m-learning.

The influence of lecturers is a key form of social influence and refers to students' perception that they should use m-learning systems based on teachers' recommendations and support. In an academic environment, lecturers play an important role in shaping students' attitudes and behavior. Empirical findings indicate that teacher support positively impacts the acceptance and evaluation of digital educational systems [8]. Recent research further confirms that interaction with teachers and their involvement in technology use increase students' confidence and positively influences the perception of service quality [14]. Accordingly, the following hypothesis is proposed:

H2: Lecturer influence has a positive effect on the service quality of m-learning.

Personal innovativeness is an individual characteristic that reflects users' willingness to accept and experiment with new technologies. This construct is particularly important in the context of digital innovation and mobile learning. Previous research shows that innovative individuals are more likely to accept new technologies and develop positive attitudes towards their use [9]. Recent studies confirm that personal innovativeness significantly influences the perception of quality and the successful use of m-learning systems [12]. Such users are more open to new functionalities and more

readily recognize the advantages of digital platforms. Based on this, the following hypothesis is defined:

H3: Personal innovativeness has a positive effect on the service quality of m-learning.

The conceptual framework of this study, derived from the literature review and formulated hypotheses, is illustrated in Figure 1.

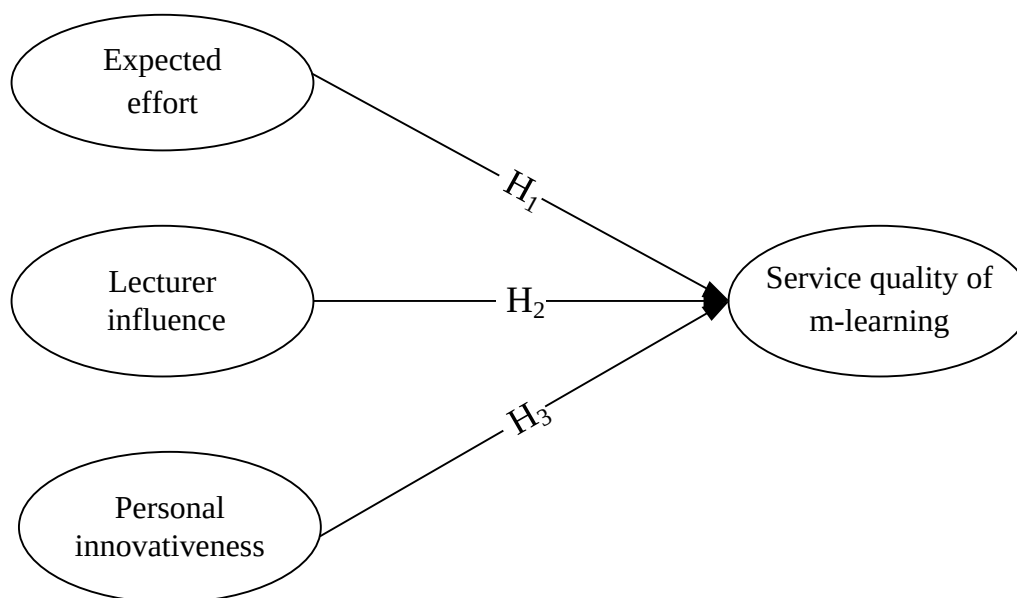


Figure 1. Conceptual model of research

3. Research methodology

For this research, empirical data were collected to examine the influence of expected effort, lecturers, and personal innovativeness on students' perceptions of the quality of mobile learning services at the University of Belgrade. A total of 247 valid responses were obtained. A five-point Likert scale was used to measure respondents' attitudes, ranging from 1 (completely disagree) to 5 (completely agree). The questionnaire used in this research was adapted from previously validated measurement scales in the relevant literature, ensuring the reliability and validity of the observed constructs [10]. The instrument is based on research into factors influencing the acceptance of mobile learning, with certain adaptations to align with the objectives of this paper. The questionnaire was divided into two parts. The first part contained questions about respondents' demographic details. The second part included statements aimed at assessing the following constructs: expected effort (EE; 3 items), lecturer influence (LI; 2 items), personal innovativeness (PI; 2 items), and service quality (SQ; 4 items). These items were developed to evaluate respondents' perceptions of how easy it is to use the m-learning system, the influence of lecturers, their willingness to adopt new technologies, and the quality of mobile learning services.

Of the 247 respondents included in the research, 99 are male and 148 are female, representing 40.1% male and 59.9% female. The results indicate that the female population is significantly more represented than the male population among respondents, and that women showed greater interest in enrolling in this faculty. The research results show the following distribution: the smallest group comprises 11 students of metallurgical engineering (4.5%), followed by 42 students of mining engineering (17.0%). In third place are 47 students of technological engineering (19.0%), while the largest

group consists of 147 students of engineering management (59.5%). The research also shows that the largest number of respondents are aged 22 to 25, with 143 students (57.9%), followed by 83 respondents aged 18 to 21 (33.6%), 19 respondents aged 26 to 30 (7.7%), and only 2 respondents over 31 years old (0.8%).

Of the total respondents, 57 (23.1%) are poorly familiar with the term e-learning, 140 (56.7%) are well aware of it, and 50 (20.2%) are very familiar with it. Most respondents are partly or well acquainted with the concept of e-learning, indicating that they do not fully understand it. Therefore, it can be concluded that e-learning is familiar to most students.

The results also show that 1 respondent (0.4%) has used a mobile phone for less than a year, while 6 students (2.4%) have reported 2 to 4 years of experience with mobile phones. The majority, 240 respondents (97.2%), have used a mobile phone for more than 5 years. This is expected, as young people today generally cannot live without mobile phones; all respondents own mobile phones and have considerable experience using them. The first mobile phone in Serbia appeared at the end of December 1995, and the year 2000 was significant for mobile phones, as it brought changes in design, screen appearance, and device features.

Based on the data obtained, 192 respondents (77.7%) have been using a smartphone for more than four years, 48 respondents (19.4%) have been using smart devices for two to four years, and only seven respondents (2.8%) have been using a smartphone for at least two years. The first phone described as a smartphone was released in 1999 and featured a touchscreen similar to those found on today's smartphones. M-learning in education is utilized by 150 respondents (60.7%), while 97 respondents (39.3%) do not use it. Based on these results, it can be concluded that more respondents use m-learning, as most recognize the importance of knowledge and education. Data analysis shows that 96 respondents (38.9%) do not use m-learning services at all. The largest group of respondents who use m-services for learning do so once to five times a day (53.4%), while 17 respondents (6.9%) use them six to ten times daily, and only two respondents reported using m-services for learning more than ten times a day. The number of respondents who stated they know nothing about m-learning is 38 (15.4%), while 70 respondents (28.3%) have some knowledge of the concept, 110 respondents (44.5%) understands the process well, and 29 respondents (11.7%) are very familiar with the concept and significance of m-learning.

4. Data analysis and results

The data analysis was carried out in two main phases. First, the measurement model was assessed to verify whether all constructs satisfied the necessary standards of reliability and validity. After confirming the measurement model as suitable, the second phase involved analysing the structural model to examine the hypotheses regarding the impact of expected effort, lecturers, and personal innovativeness on the quality of mobile learning services.

4.1. Measurement model

The measurement model was evaluated by analyzing factor loadings, internal consistency, and convergent and discriminant validity. As shown in Table 1, all loading values exceed the recommended threshold of 0.70, indicating that the indicators adequately represent their latent constructs. Cronbach's Alpha and composite reliability values for all constructs are above the recommended minimum of 0.70, confirming the internal consistency of the measurement model. Additionally, the average variance extracted (AVE) values for all constructs are greater than 0.50, confirming satisfactory convergent validity.

Table 1. Construct reliability and validity (Authors)

Construct	Items	Loadings	Cronbach's Alpha (C α) *	Composite Reliability (rho ^a) **	Composite Reliability (rho ^c) **	Average Variance Extracted (AVE) ****
Expected Effort (EE)	EE_1 EE_2 EE_3	0.812 0.847 0.852	0.787	0.792	0.875	0.701
Lecturer Influence (LI)	LI_1 LI_2	0.926 0.896	0.797	0.811	0.907	0.830
Personal Innovativeness (PI)	PI_1 PI_2	0.960 0.936	0.980	0.924	0.947	0.899
Service Quality (SQ)	SQ_1 SQ_2 SQ_3 SQ_4	0.780 0.870 0.717 0.785	0.798	0.890	0.868	0.623

Notes: * $C\alpha \geq 0.70$; ** $\rho^a \geq 0.70$; *** $\rho^c \geq 0.70$; **** $AVE \geq 0.50$.

Discriminant validity was assessed using the HTMT criterion, as shown in Table 2. All HTMT values are below the recommended threshold of 0.90, indicating that the constructs are clearly differentiated from each other. Based on these results, it can be concluded that the measurement model demonstrates a satisfactory level of reliability and validity, and is suitable for further analysis of the structural model.

Table 2. HTMT matrix (Authors)

	1	2	3	4
Service Quality (1)	-			
Personal Innovativeness (2)	0.451			
Lecturer Influence (3)	0.501	0.400		
Expected Effort (4)	0.829	0.450	0.474	-

4.2. Structural model

The structural model was analyzed by examining the path coefficients (β) and their statistical significance. As shown in Table 3, all observed relationships between constructs are statistically significant. The results show that expected effort has a positive and statistically significant effect on service quality ($\beta = 0.559$; $p = 0.000$), confirming hypothesis H₁. The influence of the lecturer also has a positive and significant impact on service quality ($\beta = 0.149$; $p = 0.011$), confirming hypothesis H₂. Personal innovativeness has a positive and statistically significant impact on service quality as well ($\beta = 0.128$; $p = 0.021$), confirming hypothesis H₃.

Table 3. Results of hypothesis testing (Authors)

Hypothesis	Construct	Path Coefficient (β)	Sample mean (M)	Standard deviation (STDEV)	t-statistics	p-value (p)*	Remark
H ₁	EE $\rightarrow$ SQ	0.559	0.560	0.061	9.197	0.000*	Accepted
H ₂	LI $\rightarrow$ SQ	0.149	0.151	0.059	2.549	0.011*	Accepted
H ₃	PI $\rightarrow$ SQ	0.128	0.126	0.056	2.301	0.021*	Accepted

Note: * significant at level of 0.05.

The coefficient of determination for the dependent variable (service quality) is $R^2 = 0.480$, indicating that the model with the included constructs of expected effort, lecturer influence, and personal innovativeness explains 48.0% of the variance in service quality. This value can be considered moderate, confirming the adequate explanatory power of the model. The results of the structural model obtained by applying the PLS-SEM method are shown graphically in Figure 2.

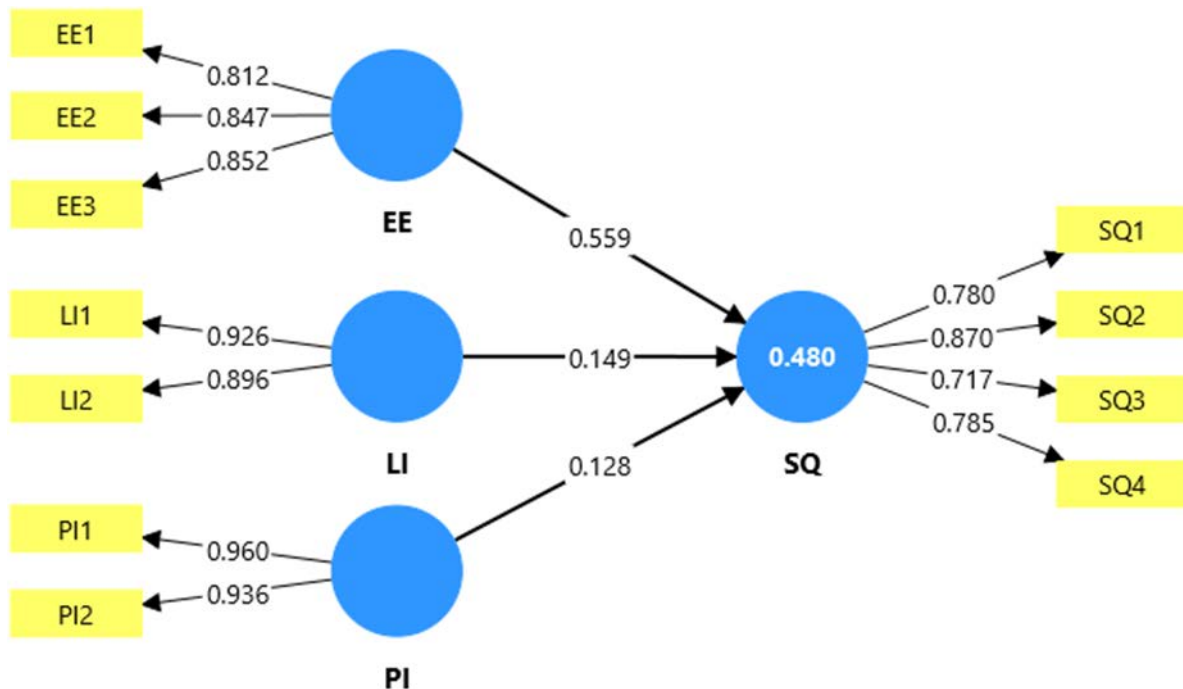


Figure 2 Results of structural model analysis (Authors)

5. Discussion

The research findings show that all observed factors, expected effort, lecturer influence, and personal innovativeness have a statistically significant and positive effect on the quality of mobile learning services. This confirms all three hypotheses and aligns with previous research on the acceptance and evaluation of m-learning systems [5, 7, 8]. Expected effort has the most pronounced impact on service quality ($\beta = 0.559$), indicating that the perception of ease of use is a key factor in the evaluation of m-learning systems. This finding is consistent with research emphasizing ease of use as one of the main determinants of positive user perceptions and satisfaction [7, 15]. In a mobile environment, where users often access content on the move, the system's intuitiveness and simplicity become especially important, which explains its dominant influence in this research.

The influence of the lecturer was also found to be statistically significant ($\beta = 0.149$), though weaker than the effect of expected effort. This result supports previous studies that highlight the importance of social influence, particularly in educational contexts, in shaping students' attitudes towards digital technologies [8]. However, the relatively lower coefficient may suggest that students in modern digital environments are increasingly making independent decisions about technology use, thereby reducing teachers' direct influence. Personal innovativeness also has a positive and significant effect on service quality ($\beta = 0.128$), consistent with previous research indicating that more innovative individuals have more positive attitudes towards new technologies and adopt them more readily [9,16]. Nevertheless, its influence is weaker than expected, which may suggest that, although individual characteristics are important, the system's functional features play a greater role in evaluating service quality.

The coefficient of determination indicates that the model explains 48% of the variance in service quality, which is considered a moderate level of explanation. This result is consistent with similar research in the field of m-learning, which indicates that a combination of technological, social, and individual factors can significantly contribute to explaining user perception, but also that additional factors should be included in future research [5,17]. Based on the above, it can be concluded that the system's functionality and simplicity are key determinants of service quality in mobile learning, while social and individual factors play a supplementary yet significant role. These results have important implications for improving the design and implementation of m-learning systems in higher education.

6. Conclusion

Mobile learning (m-learning) is becoming an increasingly important form of education in the digital age, offering student's flexibility in accessing educational content and fostering autonomous learning. Its application is especially relevant in higher education, where technological tools assist in enhancing the learning process and boosting student engagement. This research aimed to examine the impact of expected effort, lecturer influence, and personal innovativeness on students' perceptions of the quality of mobile learning services at the University of Belgrade. The results indicate that all the examined factors have a positive and statistically significant effect on service quality. Expected effort has the strongest influence, confirming that ease of use and system intuitiveness are essential for a favorable perception of m-learning services. Teacher influence and personal innovativeness also play complementary yet significant roles, illustrating that a combination of system characteristics, social influence, and individual user traits shapes the user experience.

The scientific and theoretical contribution of this paper lies in applying and verifying the research model among students in Serbia, as well as confirming previous findings on the determinants of acceptance and evaluation of the m-learning system. The study provides an empirical foundation for further investigation into the factors that shape the quality of digital education and enhances understanding of how students perceive and utilize mobile educational technologies.

Limitations of this study include a sample exclusively composed of students from a single university, which may limit the generalizability of the findings. Future research could broaden the sample to include students from multiple universities and different educational backgrounds, as well as incorporate additional factors such as content quality, system performance, and student motivation. It would also be advantageous to conduct longitudinal studies to monitor the long-term effectiveness and acceptance of the m-learning system, alongside employing complementary methodologies, including experimental and qualitative approaches.

7. Acknowledgement

The research presented in this paper was carried out with the financial support of the Ministry of Science Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia within the framework of financing scientific research work at the University of Belgrade, Technical Faculty in Bor in accordance with the contract with registration number 451-03-34/2026-03/200131. The authors would also like to thank Sandra Vasković, English teacher for proofreading the paper.

8. References

- [1] **Crompton, H.**, *A historical overview of mobile learning: Toward learner-centered education*, Handbook of Mobile Learning, Routledge, New York, USA, 2013.

- [2] **Traxler, J.**, Learning with mobiles in developing countries: Technology and pedagogy, *International Journal of Mobile and Blended Learning*, 10 (2018), 2, pp. 1–15.
- [3] **Sung, Y. T., Chang, K. E., Liu, T. C.**, The effects of integrating mobile devices with teaching and learning: A meta-analysis, *Computers & Education*, 202 (2023), pp. 104–120.
- [4] **Parasuraman, A., Zeithaml, V. A., Berry, L. L., Servqual**, A multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality, *Journal of Retailing*, 64 (1988), 1, pp. 12–40.
- [5] **Al-Emran, M., Mezhuyev, V., Kamaludin, A.**, Technology acceptance in mobile learning: A systematic review, *Computers & Education*, 125 (2020), pp. 389–412.
- [6] **Nikou, S., Economides, A. A.**, Mobile-based assessment: Investigating the factors that influence behavioral intention, *Education and Information Technologies*, 26 (2021), 5, pp. 1–20.
- [7] **Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., Davis, F. D.**, User acceptance of information technology: Toward a unified view, *MIS Quarterly*, 27 (2003), 3, pp. 425–478.
- [8] **Almaiah, M. A., Al-Khasawneh, A., Althunibat, A.**, Exploring factors influencing the use of mobile learning systems, *Education and Information Technologies*, 27 (2022), pp. 1–23.
- [9] **Rogers, E. M.**, *Diffusion of innovations*, Free Press, New York, USA, 2003.
- [10] **Abu-Al-Aish, A., Love, S.**, Factors influencing students' acceptance of m-learning: An investigation in higher education, *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 14 (2013), 5, pp. 82–107.
- [11] **Park, S. Y.**, An analysis of the technology acceptance model in understanding university students' behavioral intention to use e-learning, *Educational Technology & Society*, 12 (2009), 3, pp. 150–162.
- [12] **Hoi, V. N., Mu, G. M.**, The role of mobile learning in higher education: A systematic review, *Education and Information Technologies*, 28 (2023), pp. 1–20.
- [13] **Al-Adwan, A. S., Al-Adwan, A., Smedley, J.**, Exploring students' acceptance of e-learning using UTAUT model, *Education and Information Technologies*, 28 (2023), pp. 1–20.
- [14] **Almaiah, M. A., Al-Iozi, E., Al-Khasawneh, A.**, Investigating the main determinants of mobile learning adoption in higher education, *Education and Information Technologies*, 27 (2022), pp. 1–25.
- [15] **Dwivedi, Y. K., Rana, N. P., Jeyaraj, A., Clement, M., Williams, M. D.**, Re-examining the unified theory of acceptance and use of technology (UTAUT): A meta-analysis, *International Journal of Information Management*, 57 (2021), pp. 102–269.
- [16] **Alqahtani, A. Y., Rajkhan, A. A.**, E-learning critical success factors during the COVID-19 pandemic: A comprehensive analysis, *Education and Information Technologies*, 25 (2020), pp. 1–21.
- [17] **Khan, M. A., Al-Shihi, H., Al-khanjari, Z., Sarraf, M.**, Mobile learning (m-learning) adoption in higher education: A systematic literature review, *Education and Information Technologies*, 25 (2020), pp. 1–22.

Originalni naučni rad

Ključne reči:

kvalitet timskog razvoja; kohezija;
hibridni rad; komunikacija,
organizaciono ponašanje

Key words:

team development quality; cohesion;
hybrid work; communication;
organizational behavior

Snežana NESTIĆ

Aleksandar ALEKSIĆ*

* aaleksic@kg.ac.rs

Danijela TADIĆ

Strahinja STIJOVIĆ

KVALITET RAZVOJA TIMOVA I KOHEZIJE U HIBRIDNIM RADNIM OKRUŽENJIMA

QUALITY OF TEAM DEVELOPMENT AND COHESION IN HYBRID WORK ENVIRONMENTS

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, Srbija
ORCID: 0000-0003-1461-9595

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, Srbija
ORCID: 0000-0002-7990-9123

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, Srbija
ORCID: 0000-0003-2236-967X

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, Srbija

U savremenom poslovnom okruženju, organizacije se suočavaju sa sve većim pritiskom da usvoje hibridne modele rada koji kombinuju tradicionalno prisustvo u kancelariji sa radom na daljinu. Ovo istraživanje fokusira se na analizu kvaliteta timskog razvoja i kohezije u hibridnim okruženjima, sa posebnim osvrtom na izazove u komunikaciji, jasnoću uloga i nivo međusobnog poverenja među članovima tima. Ključni cilj istraživanja je identifikacija promena koje se dešavaju u dinamici tima usled prostorne distance, kao i analiza faktora koji direktno utiču na socijalnu i koheziju usmerenu na zadatak. Kroz empirijsku analizu stavova zaposlenih koji rade u hibridnom režimu, istraživanje teži da utvrdi kako tehnološki alati i leaderski pristupi mogu prevazići osećaj izolovanosti i neravnopravnosti. Na osnovu dobijenih rezultata, rad pruža smernice i preporuke za preduzeća kako bi efikasno unapredila timsku povezanost i osigurala efikasno poslovanje u digitalnom okruženju.

In the contemporary business environment, organizations face increasing pressure to adopt hybrid work models that combine traditional office presence with remote work. This research focuses on analyzing the quality of team development and cohesion in hybrid environments, with reference to communication challenges, role clarity, and the level of mutual trust among team members. The key goal of the research is the identification of changes that occur in team dynamics due to spatial distance, as well as the analysis of factors that directly affect social and task-oriented cohesion. Through an empirical analysis of the attitudes of employees working in a hybrid mode, the research aims to determine how technological tools and leadership approaches can overcome the feeling of isolation and inequality. Based on the results obtained, the work provides guidelines and recommendations for companies to effectively improve team bonding and ensure efficient business in the digital environment.

1. Introduction

Teamwork and cohesion represent one of the priority factors of business success in modern corporate systems. The hybrid model of work, which includes a combination of office environment and remote work, caused the redefinition of previous concepts of organizational behavior and brought specific challenges in terms of team dynamics, trust, and communication in the digital environment. The challenges that management faces often center on the uneven flow of information, the feeling of

isolation of members working outside the office, and the difficulty of maintaining social connectedness.

The motivation for research stemmed from the perceived gap between the speed with which the hybrid work model is becoming the dominant organizational form and the slow adaptation of management practices to this change. In the domestic business context, teams are increasingly functioning in conditions of physical separation, but the question of the quality of team development and cohesion is rarely systematically examined.

The objective of the paper is to identify, through theoretical analysis and empirical research, the key factors that influence the quality of development and cohesion of hybrid teams, and to propose concrete measures to improve team efficiency based on that. The research was carried out using a questionnaire on the Google Forms platform, on a sample of 212 respondents from the mechanical and manufacturing industry sector in the Republic of Serbia.

2. Hybrid work model and team dynamics

In a hybrid environment, coordination, information exchange, building trust, and maintaining cohesion depend primarily on the organization of processes and rules of communication, and not only on the physical proximity of members [1]. Office work relies on spontaneous, informal contacts, while remote work requires clearly defined goals, roles, and performance criteria. The sustainability of cooperation requires uniform evaluation criteria based on work outcomes, because the visibility of contributions can no longer rely on physical presence.

2.1. Specificities of team development in contemporary business

During development, the team goes through recognizable stages that differ in the dominant forms of interaction, the level of clarity of roles, and the degree of acceptance of common rules. In this framework, four phases are distinguished [2]: forming, storming, norming, and performing. Each phase carries specific challenges and conditions with different needs in terms of coordination and management.

In modern business, team formation takes place in a dynamic and often hybrid environment, with a strong reliance on digital communication, which changes the way of establishing relationships and develops cohesion. Already in the initial phase, in addition to defining goals and tasks, it is crucial to clearly arrange communication channels and the availability of information, because otherwise there will be inconsistencies and different interpretations [3].

The storming stage represents a critical period for cohesion, as differences in expectations, working approaches, and priorities come to the surface. In hybrid teams, these tensions can be amplified by unequal access to information and inconsistent communication quality, increasing the risk of misunderstandings and conflict. When roles and norms remain ill-defined, mistrust, subgroup formation, and declining collaboration tend to follow. However, if differences are channeled through clear procedures and open communication, this stage can strengthen shared norms and contribute to long-term team stability [1,4].

The norming stage carries greater significance in hybrid settings than in traditional ones, as norms must increasingly be defined in advance, through explicit agreements on communication, meetings, reporting, and shared documentation, rather than emerging organically through day-to-day interaction. This is particularly important in hybrid work, where physical separation can undermine equal participation and information flow, making clear and verifiable norms central to stability, cohesion, and the quality of team development [1,5].

2.2. Team cohesion as a factor of organizational effectiveness

Cohesion represents the degree of internal connection between team members, which manifests itself as a force that maintains belonging, encourages cooperation, and directs behavior towards preserving joint work and achieving common goals [6,7]. In the literature, two dimensions are most often distinguished: social cohesion, which concerns interpersonal relations, a sense of belonging and emotional connection, and task-oriented cohesion, which implies a focus on common goals, discipline in work, and commitment to a common performance [6,7]. Both are important because one without the other rarely produces good results.

Task-oriented cohesion concerns the extent to which team members have the same understanding of what needs to be done. They not only know what the goal is, but also understand it in the same way, agree on priorities, and consistently respect agreed standards and deadlines. When this type of cohesion functions well, differences in work styles and competencies cease to be a source of disagreement and are transformed into an advantage. Each team member contributes in his own way, but in the same direction. This results in less unnecessary work, fewer subsequent corrections, and fewer situations where it turns out that someone did something in a completely different way than the rest of the team [7].

When a team works hybridly, social cohesion becomes more sensitive than usual. There are almost no spontaneous conversations, and interactions between employees are limited to scheduled video calls and formal channels. In such conditions, connectivity does not build by itself, but requires a conscious effort: predictable communication, equal participation of all in meetings, and visibility of the contributions of those who work remotely, so that no one remains invisible and the team is not imperceptibly divided into "those in the office" and "those at home" [3]. The weakening of the quality of task-oriented cohesion is reflected in the growth of ambiguity about responsibilities and unequal access to information. These two factors, as the research results will show, represent the most pronounced challenges in hybrid teams.

3. Analysis of employee perceptions of team cohesion quality in hybrid work settings

The study was conducted on a sample of 212 respondents from the territory of the Republic of Serbia, primarily from the mechanical and manufacturing industry sector, with full gender balance (50% male, 50% female). The age distribution is strongly skewed toward younger respondents: the 19–34 age group accounts for 71.7% of the sample, the 35–55 group for 25.5%, and the 56–65 group for 2.8%. Given that younger generations are most intensively exposed to changing work practices and digital communication, the findings can be considered representative of the population most directly affected by the hybrid work model.

By employment status, 49% of respondents are full-time employees, while 42% are students in employment, reflecting heterogeneity in terms of organizational involvement. The most prevalent work arrangement is hybrid (46.7%), followed by office-based (34%) and predominantly remote (19.3%) (Figure 1). The presence of all three groups enabled a comparison of perceptions across different work modes, directly addressing the subject of the research.

When interpreting the results, it is important to note that the proportion of respondents who have been in their current team for less than six months is considerable (33%). This suggests that a significant part of the sample is in the early stages of team development, where ambiguities in roles and communication norms tend to be most pronounced and where the quality of team development has not yet stabilized.

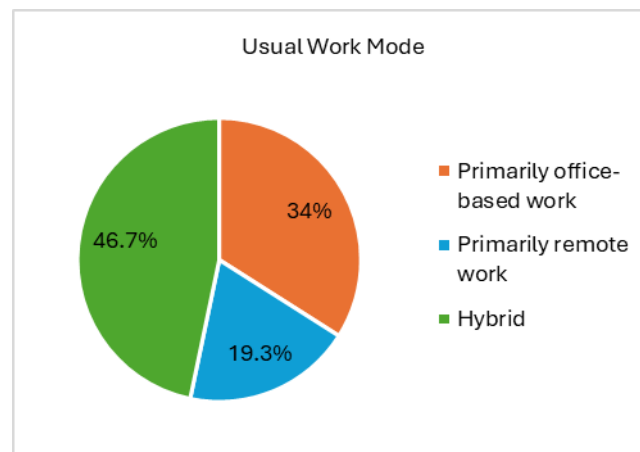


Figure 1. Distribution of respondents by work mode

One of the more significant findings concerns information flow. Nearly equal shares of respondents report equal access to information (45.8%) and occasional delays (45.3%), while 9% feel entirely excluded due to informal decision-making taking place in the office (Figure 2). This distribution points to the presence of informational asymmetry — differences in access to context and informal knowledge — which can gradually undermine trust, the sense of belonging, and the overall quality of cohesion within the team. A direct consequence of uneven information flow is ambiguity around roles and responsibilities: more than half of respondents (50.9%) report occasional confusion about who is accountable for what, while 10.4% experience frequent uncertainty around priorities. In hybrid work, this type of ambiguity carries greater consequences than in office-based settings, since gaps are harder to address without direct contact.

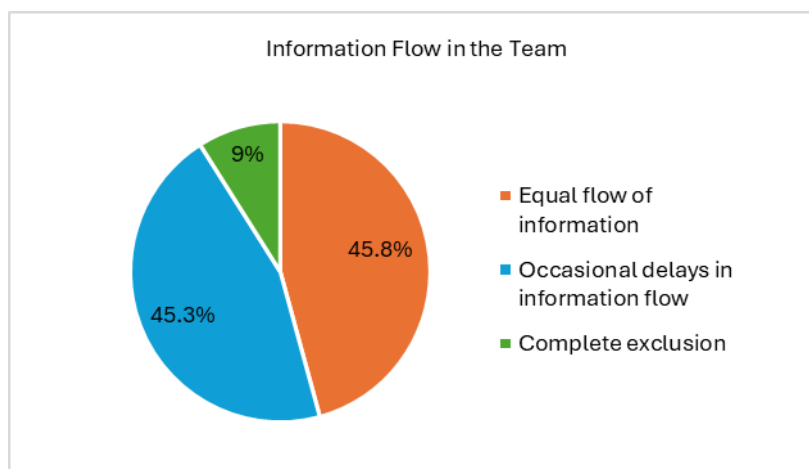


Figure 2. Assessment of information flow within the team

As many as 57.1% of respondents report difficulties with inclusion in mixed-format meetings or the dominance of physically present participants, suggesting that simply providing a video connection is insufficient to ensure genuine equality of participation (Figure 3). This finding has a direct bearing on social cohesion: the largest share of respondents (41.5%) feel connected primarily to their immediate project colleagues, while 18.9% report a sense of isolation and communication reduced to operational topics. This pattern suggests that social cohesion is increasingly narrowing and giving rise to subgroup formation within teams.

Trust within teams exists, but for 52.4% of respondents, it is accompanied by heightened status reporting, and 10.4% report the presence of micromanagement. This distribution suggests that many organizations remain in a transitional model — caught between monitoring presence and managing

by results — which directly affects the psychological safety and motivation of employees working outside the office. Contributing to this is the reduced visibility of workload in hybrid settings: for 43.4% of respondents, peer support is activated only after an explicit request, rather than in response to an observed need.

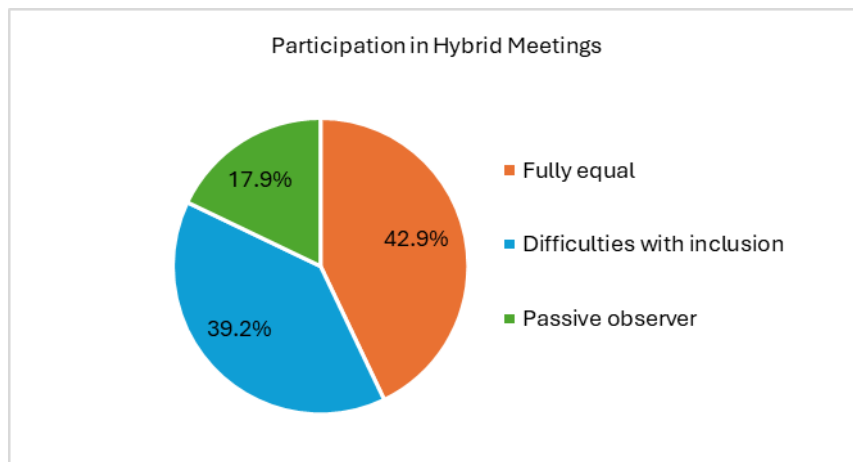


Figure 3. Experience of participation in mixed meetings

Half of the respondents report that conflicts within their team are resolved constructively through direct conversation. However, the share opting for avoidance and disengagement remains high (34.9%), as does the incidence of indirect conflict through dysfunctional communication patterns (15.1%). In a hybrid context, where rapid clarification is impeded by asynchronous communication, such patterns carry an elevated risk of escalation and accumulated tension. Compounding this is the issue of availability: nearly 56% of respondents report being expected to respond outside of working hours, either occasionally or routinely, which over time increases the risk of burnout and declining quality of collaboration (Figure 4).

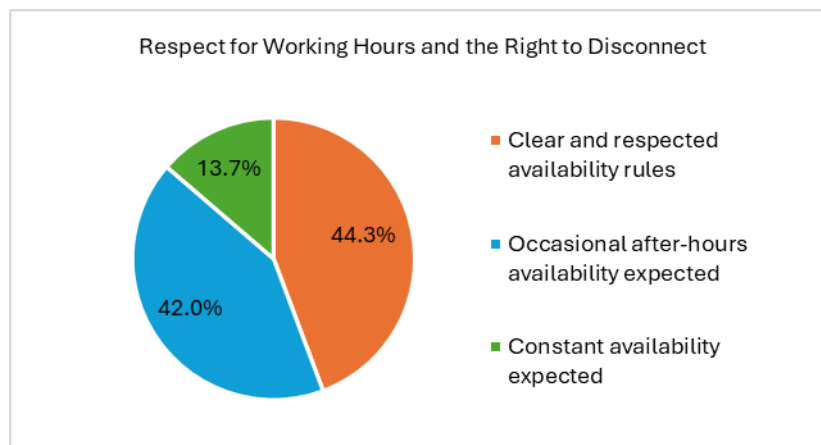


Figure 4. Respect for working hours and the right to disconnect

The majority of respondents rate the impact of technology on collaboration as positive (42.9%) or satisfactory (45.3%), indicating that technological infrastructure is not identified as the primary constraint on team cohesion quality. Nonetheless, the share viewing technology as an obstacle (11.8%) is not negligible and may affect meeting quality and coordination effectiveness.

When asked about priority measures for improving team cohesion, respondents highlighted: clearer definition of roles, goals, and work rules (47.2%), more frequent in-person meetings (42.5%), organized team-building programs (37.7%), greater leader involvement (34.4%), and online meetings dedicated to connection rather than operations (22.6%). Respondents thus identify structural measures

— clearer role definition and work protocols in hybrid settings — as the primary solution, rather than technology (Figure 5).

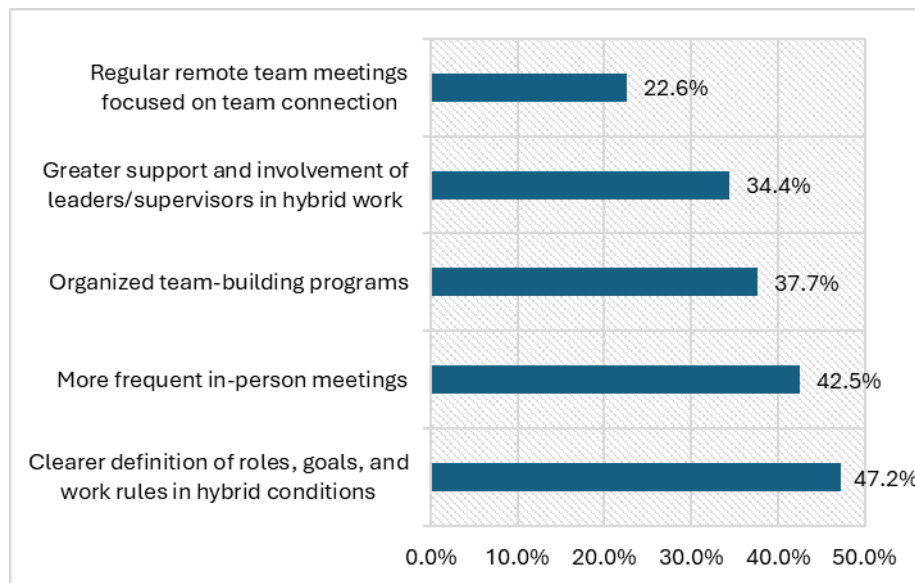


Figure 5. Priority measures for strengthening team cohesion

3.1. Recommendations for improving the quality of team cohesion in hybrid work

The research findings clearly indicate that hybrid teams cannot rely on the kind of spontaneous coordination that works when everyone shares the same physical space. Physical separation need not be a problem in itself; it becomes one when it is not accompanied by clear rules, transparent communication, and a deliberate effort to ensure that all members feel equally included.

Among the most consistent findings is the uneven distribution of information across team members. The remedy lies in equalizing information access for all employees: all key decisions, tasks, and changes in priorities must be documented in a single location accessible to everyone, not merely communicated verbally in the office. In addition, roles and responsibilities should be formalized through concise descriptions of duties and boundaries of authority, with periodic checks on shared understanding, particularly following changes in team composition. When information is universally accessible and roles are clearly defined, the scope for misunderstandings narrows considerably, and misunderstandings in hybrid work tend to escalate more quickly than in office-based settings.

When part of a team is physically present, and another part joins via video, inequity can arise without anyone intending it. The research found that as many as 57% of respondents experience some degree of exclusion in mixed-format meetings. Management should introduce clear meeting protocols, structured turn-taking, mandatory inclusion of remote participants in discussion, and a prohibition on parallel in-room conversations that are inaccessible to the rest of the team. Equal participation in meetings directly affects social cohesion: when every voice is heard, the risk of subgroup formation and feelings of isolation diminishes. Beyond formal meeting rules, it is equally important to periodically plan interactions and activities that are not purely operational in nature, as these are the spaces in which interpersonal trust and a sense of belonging to something larger than one's own task are built.

More than 60% of respondents identify heightened status reporting or micromanagement as features of working outside the office. Management should shift its focus from monitoring presence

to tracking outcomes, a change that directly affects the psychological safety and motivation of employees working remotely. Rather than addressing problems only after they become visible, regular brief check-ins on priorities and workload are recommended, so that support is activated proactively rather than only when an overburdened team member explicitly asks for help.

The research shows that nearly half of all disagreements are either ignored or resolved indirectly. In a hybrid context, where rapid clarification is more difficult, this tendency can escalate. It is therefore important to foster an organizational culture in which disagreements are addressed through direct conversation focused on facts and agreements. Alongside this, clear rules on availability, urgent communication channels, and response time expectations are not bureaucratic formalities; they are a practical necessity. They create the conditions for sustainable long-term work and prevent the gradual decline in collaboration quality that comes with burnout.

Transparency, clarity, and inclusive participation do not arise on their own in hybrid work; they require deliberate organizational effort. When their effects are monitored and rules are adjusted based on feedback from within the team, these measures can contribute to building a more stable and cohesive hybrid team over the long term.

4. Conclusion

The results of the conducted research indicated that the hybrid work model brings specific organizational challenges that go beyond the issue of technology infrastructure. The key problem is not that the team does not share the same physical space, but that managerial practices have often not adapted to that change, and the consequences are most clearly visible precisely in the quality of team development and cohesion.

Research has shown that information asymmetry, role ambiguity, and inequality in mixed meetings represent three interrelated factors that together weaken the cohesion of hybrid teams. Trust exists, but in many organizations, it is accompanied by control mechanisms that are a legacy of the office work model. Social cohesion is restricted to immediate associates, while over a fifth of respondents describe a feeling of isolation. At the same time, technology did not appear to be a limiting issue, which shows that solutions for improving the quality of cohesion should be explored in organizational processes and managerial practices.

Certain limitations of this research should be kept in mind. Since it relies on the self-assessment of the respondents, there is a risk of subjectivity and portraying socially desirable attitudes. The sample was formed voluntarily, which limits the application of the findings to the larger population. In addition, the research represents a cross-section of the situation at one point in time and does not address the long-term consequences of hybrid work on cohesion and organizational culture.

These limitations open directions for future research. A longitudinal study following the same teams over a longer period would provide insight into how cohesion changes during the various stages of hybrid work and which techniques provide long-term outcomes. Expanding the sample to other sectors, such as IT, service activities, or public administration, would create space for comparison and greater generalization of the results. It would be interesting to examine how age, work experience, and type of role in the team influence the perception of cohesion, as well as to what extent organizational and national culture shape the acceptance of the hybrid model.

5. References

- [1] **Handke, L., S. Aldana, P. L. Costa, T. A. O'Neill**, *Hybrid teamwork: What we know and where we can go from here*, Small Group Research, 55 (2024), 5, pp. 805–835.

-
- [2] **Tuckman, B. W.**, *Developmental sequence in small groups*, *Psychological Bulletin*, 63 (1965), 6, pp. 384–399.
 - [3] **Lauring, J., C. Jonasson**, What is hybrid work? Towards greater conceptual clarity of a common term and understanding its consequences, *Human Resource Management Review*, 35 (2025), 1, pp. 101044.
 - [4] **Janićijević, N.**, *Organizaciono ponašanje*, Data Status, Beograd, Srbija, 2008.
 - [5] **Bula, P., A. Thompson, A. A. Žak**, Nurturing teamwork and team dynamics in a hybrid work model, *Central European Management Journal*, 32 (2024), 3, pp. 475–489.
 - [6] **Griffin, R. W., J. M. Phillips, S. M. Gully, A. Creed, L. Gribble, M. Watson**, *Organisational behaviour: Engaging people and organisations*, Cengage AU, 2023.
 - [7] **Grossman, R., K. Nolan, Z. Rosch, D. Mazer, E. Salas**, The team cohesion-performance relationship: A meta-analysis exploring measurement approaches and the changing team landscape, *Organizational Psychology Review*, 12 (2022), 2, pp. 181–238.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.221>

Ključne reči:

kvalitet ERP sistema; ANOVA;
diskretna industrija;
procesna industrija

PROCENA KVALITETA ERP REŠENJA KROZ PERFORMANSE SISTEMA: DOKAZI ZASNOVANI NA ANOVA ANALIZI IZ DISKRETNE I PROCESNE INDUSTRIJE

Key words:

ERP system quality; ANOVA;
discrete industry; process industry

ASSESSING ERP SOLUTION QUALITY THROUGH SYSTEM PERFORMANCE: ANOVA-BASED EVIDENCE FROM DISCRETE AND PROCESS INDUSTRIES

Aleksandra RADIĆ*

* aradic@tfbor.bg.ac.rs

Sanela ARSIĆ

Lidija KRSTIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0000-0003-4253-8004

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0000-0002-1957-566X

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0009-0009-6618-4723

Kvalitet ERP sistema igra ključnu ulogu u poboljšanju organizacione efikasnosti integrisanjem poslovnih procesa omogućavanjem razmene informacija u realnom vremenu. Međutim, percepcija kvaliteta ERP sistema može da varira u različitim industrijskim kontekstima. Ova studija ispituje da li postoje statistički značajne razlike u percipiranim performansama ERP sistema između korisnika u diskretnoj i procesnoj industriji. Empirijski podaci su prikupljeni putem onlajn ankete među 100 korisnika ERP sistema zaposlenih u preduzećima koja posluju u Srbiji. Kvalitet ERP sistema meren je efikasnošću pretrage podataka, vremenom učitavanja sistema, preuzimanjem podataka, kreiranjem dokumenata i izvršavanjem zadataka. Metoda analize varijanse (ANOVA) primenjena je za testiranje razlika u percepciji korisnika između dva tipa industrija. Rezultati ukazuju na statistički značajne razlike u percepcijama vezanim za efikasnost pretrage podataka i brzinu učitavanja sistema, dok nisu pronađene značajne razlike za preuzimanje podataka, kreiranje dokumenata i izvršavanje zadataka. Studija doprinosi literaturi pružajući empirijske dokaze o razlikama u percepciji performansi ERP sistema zasnovanim na industriji. Sa praktične perspektive, rezultati ističu važnost prilagođavanja dizajna i konfiguracije ERP sistema specifičnim operativnim potrebama različitih industrijskih okruženja. Buduća istraživanja bi mogla proširiti analizu uključivanjem dodatnih dimenzija kvaliteta ERP-a i šireg uzorka.

Enterprise Resource Planning (ERP) system quality plays a critical role in improving organizational efficiency by integrating business processes and enabling real-time information exchange. However, perceptions of ERP system quality may vary across different industrial contexts. This study examines whether statistically significant differences exist in perceived ERP system performance between users in discrete and process industries. Empirical data were collected through an online survey of 100 ERP users employed in enterprises operating in Serbia. ERP system quality was measured by data search efficiency, system loading time, data downloading, document creation, and task execution. The analysis of variance (ANOVA) method was applied to test differences in user perceptions between the two industry types. The results indicate statistically significant differences in perceptions related to data search efficiency and system loading speed, while no significant differences were found for data downloading, document creation, and task execution. The study contributes to

the literature by providing empirical evidence on industry-based differences in ERP system performance perceptions. From a practical perspective, the results highlight the importance of adapting ERP system design and configuration to the specific operational needs of different industrial environments. Future research could extend the analysis by including additional ERP quality dimensions and a broader sample.

1. Introduction

The accuracy and timeliness of data and information are crucial for the quality of business processes, which contribute to overall corporate success. In this context, Enterprise Resource Planning (ERP) systems, as leading information system solutions covering most company operations, are essential for managing organisational activities (Balić et al., 2022). These systems support quality management through business process integration and digitalisation, easier quality tracking and error reduction, identification of process problems, analysis of deviations, and monitoring the effects of corrective or preventive measures.

ERP systems rely on standardised business rules, providing a central repository for entering all information and data regarding enterprise processes. Enterprises benefit from process standardisation, resource integration, and decision-making and problem-solving based on real-time data. These benefits are equally important for the enterprise and its stakeholders, as they lead to improved operations, enhanced product and service quality, increased efficiency, and reduced delivery times (Wei, 2008; Akrong et al., 2022).

ERP system application varies between different industry contexts, such as process and discrete industries, due to fundamental differences in production processes, product structures, and production planning methods (Lothary et al., 2024). As a result, ERP solutions are often developed with industry-specific modules to support the particular requirements of manufacturing systems.

However, the existing literature rarely empirically examines these differences at the level of ERP system users' perceptions. Therefore, a systematic analysis of differences in the perception of ERP system performance between users from the process and discrete industries is needed to better understand industry-specific characteristics in the evaluation of ERP solution quality. This study addresses the following research question: Are there statistically significant differences in perceived ERP system quality between discrete and process industries?

To answer this research question, the study uses System Performance (SP) as a metric of ERP system quality. SP refers to the operational efficiency of an ERP system, particularly its ability to respond rapidly to business activities and support the smooth execution of organisational processes. The ability of ERP systems to process transactions promptly and provide real-time information has also been associated with improvements in organisational performance indicators after implementation (Shbail et al., 2024).

After conducting empirical research in discrete and process industries operating in Serbia, this study applies a statistical approach based on the ANOVA test to assess potential differences in users' perceptions of ERP system quality. This approach can contribute to a more precise understanding of the factors influencing the successful use of ERP systems and provide a basis for adapting ERP implementations to the specific requirements of different industrial environments.

The paper is organised as follows. The Study Background reviews the literature and highlights the differences in ERP system usage between discrete and process industries. The Methodology section describes the data collection process and methods applied. Results and Discussion systematically

present the study results and clarify key findings. The Conclusion provides a brief summary, highlighting the study's contributions and limitations and proposing potential future research directions.

2. Study background

Implementing integrated solutions, such as an ERP system, can provide a company numerous benefits and improve the overall efficiency of departmental or enterprise operations. As a result, many studies examine the quality of ERP systems (Chang et al., 2011; Shen et al., 2016; Akrong et al., 2022; Balić et al., 2022; Abu Afifa et al., 2025), based on the belief that a well-implemented, high-quality ERP solution positively impacts the organisation.

Cebekhulu and Ozor (2022) examined the elements of quality management practices and ERP systems to assess the relationship between organisational culture and organisational performance. Their study suggests that ERP systems, measured through organisational impact, individual impact, information quality, and system quality, have a statistically significant and positive effect on organisational performance. In contrast, Balić et al. (2022) explored the relationship between ERP system quality and financial and non-financial organisational performance in a developing economy, covering manufacturing, wholesale and trade, information technology, and other industries. Their results indicate that system quality and its features do not have a statistically significant effect on the performance examined. The research suggests that ERP system quality, measured by necessary running, quick response, ease of use, and stability, is not a predictive driver of enterprise performance.

These conflicting findings may arise because different industrial contexts affect how ERP systems are perceived and used. Therefore, ERP system application may vary between process and discrete industries due to fundamental differences in production processes, product structures, and production planning methods.

In discrete industries, products consist of clearly defined components that can be disassembled and reassembled, so ERP systems in these organisations focus on managing product structures, planning material requirements, and coordinating assembly processes (Lothary et al., 2024). In contrast, the process industry relies on production through recipes or formulas, where raw materials are transformed by chemical or physical processes. This requires ERP functionalities such as recipe management, batch control, and traceability of raw materials and products (Itagi et al., 2023). Due to these specificities based on the nature of production processes, ERP solutions are often developed with industry-specific modules to support the distinct requirements of manufacturing systems.

Given that ERP systems in the process and discrete industries support different business processes and use different functional modules, it can be assumed that users in these two industrial contexts perceive ERP system performance differently, particularly regarding data processing speed, information availability, and task performance efficiency. This may lead to differences in ERP system quality perceptions.

In the literature, ERP quality is assessed through the dimensions of system quality, information quality, and service quality. ERP system quality refers to the capability of the computerised system to efficiently process information and the extent to which it meets required technical standards. ERP information quality relates to the relevance, accuracy, and usefulness of data provided by the system in meeting users' needs and expectations. ERP service quality represents the gap between users' expected level of technical support and the actual performance of the support services delivered by the information system team (Ouiddad et al., 2021).

To address the proposed research question, this paper adapts the SP construct items from Sternad Zabukovšek et al. (2019), including data search efficiency, system loading time, data downloading, document creation, and overall task execution. As previous research (Shen et al., 2016; Balić et al., 2022) also considered rapid response and effectiveness of ERP as dimensions of quality, this study's approach is appropriate for measuring ERP system quality. These indicators therefore provide a relevant basis for assessing perceived ERP system quality.

3. Methodology

To assess user perceptions of ERP system performance as a determinant of ERP system quality, an empirical survey was conducted in 2024. Data were collected from 100 users in enterprises operating in Serbia, targeting professionals who actively use ERP systems in their work. An online questionnaire was distributed via the LinkedIn network to ERP users. Participants were informed that their responses would be used exclusively for academic research purposes and that the data would be treated confidentially.

The questionnaire consisted of two parts. The first part included demographic questions, while the second comprised items related to ERP system acceptance and use (Sternad Zabukovšek et al., 2019). Five items specifically measured perceptions of ERP system performance. Respondents indicated their level of agreement using a five-point Likert scale, ranging from 1 (strongly disagree) to 5 (strongly agree).

In this study, analysis of variance (ANOVA) was used to test whether users' perceptions of ERP system performance differ between enterprises operating in discrete and process industries. ANOVA is a statistical technique used to determine whether statistically significant differences exist between the mean values of two or more groups (Stoker et al., 2020). All statistical analyses were conducted using IBM SPSS Statistics, version 2025.

4. Results and discussion

Of the 100 ERP users surveyed, over 80% work in large companies with more than 250 employees. Approximately 70% of respondents have used ERP systems for more than three years, and 85% use ERP daily. Respondents reported using ERP systems across various company sectors, including marketing, projects, financial management, logistics, warehousing, quality assurance, and human resources. They also reported using ERP modules such as materials management, human resources, financial accounting, production planning, and quality management.

Descriptive statistics from the crosstabulation of users' demographic characteristics and industry type are presented in Table 1.

Table 1 shows that there were more males than females in both types of industry considered. Regarding respondents' age, most users in both process and discrete industries were aged 30–39. Most respondents held either a BSc or MSc degree. This study distinguishes the economic activity of the companies where respondents are employed, identifying the automobile industry as an example of a discrete industry, and pharmacy, mining and metallurgy, and food and beverage production as examples of process industries.

To test whether users' perceptions of ERP system performance differ between those in discrete and process industries, an ANOVA was conducted. Before conducting the ANOVA, the assumptions of normality, independence of observations, and homogeneity of variances were examined and met. The Cronbach alpha coefficient for the questionnaire items was 0.869, which is above the recommended value of 0.70 (Brown, 2002). The results of the ANOVA are presented in Table 2.

Table 1. Crosstabulation descriptive statistics

Classification	Subclassification	Type of industry		Total
		Process	Discrete	
Gender	Male	28	25	53
	Female	36	11	47
Age	20-29	17	8	25
	30-39	27	20	47
	40-49	16	8	24
	50-59	4	0	4
Level of education	High school	3	2	5
	School of Applied Science	3	1	4
	BSc	30	17	47
	MSc	27	16	43
	PhD	1	/	1
Economic activity	Automobile industry	/	36	36
	Pharmacy	20	/	20
	Mining and metallurgy	27	/	27
	Food and beverage production	17	/	17

Table 2. ANOVA test results regarding type of industry

Item	Discrete industry (Mean)	Process industry (Mean)	Between/Within Groups	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
SP1 - In ERP, data can be searched quickly	4.42	3.98	Between Groups	4.306	1	4.306	4.600	0.034*
			Within Groups	91.734	98	0.936		
SP2 - The ERP system loads rapidly	4.39	3.98	Between Groups	3.770	1	3.770	4.126	0.045*
			Within Groups	89.540	98	0.914		
SP3 - I can download data from ERP quickly	4.42	4.19	Between Groups	1.210	1	1.210	2.027	0.158 ^{n.s.}
			Within Groups	58.500	98	0.597		
SP4 - I can create a new document in ERP quickly	4.36	4.08	Between Groups	1.845	1	1.845	2.414	0.124 ^{n.s.}
			Within Groups	74.915	98	0.764		
SP5 - I complete tasks effectively in ERP	4.17	4.14	Between Groups	0.016	1	0.016	0.019	0.892 ^{n.s.}
			Within Groups	82.734	98	0.844		

Notes: *statistically significant at 0.05 level; ^{n.s.} not significant

ANOVA test results confirmed two statistically significant differences in users' perceptions of ERP system performance, while the remaining three statements were not statistically significant.

Significant differences were observed for SP1 ($F = 4.600$, $p = 0.034$) and SP2 ($F = 4.126$, $p = 0.045$). These results indicate that users from discrete and process industries perceive certain aspects of ERP system speed differently, particularly those related to data search efficiency (SP1) and system loading time (SP2). This suggests that differences in perceptions of ERP system performance between

discrete and process industries may be influenced by distinct operational characteristics and industry data processing requirements.

Discrete industries typically involve a large number of individual components, complex bills of materials, and frequent transactional operations related to production orders, inventory tracking, and assembly processes (Lothary et al., 2024). Consequently, ERP users in such environments often rely heavily on rapid data retrieval and system responsiveness to support daily tasks. In contrast, process industries usually operate with more continuous production flows and relatively standardised process structures, which may reduce the frequency of certain types of data searches and system queries (Itagi et al., 2023).

These findings are consistent with previous studies suggesting that perceptions of ERP system performance are often influenced by the complexity of operational processes and the intensity of system interaction within specific industrial environments (Madapusi & D'Souza, 2012).

No statistically significant differences were found for SP3 ($F = 2.027$, $p = 0.158$), SP4 ($F = 2.414$, $p = 0.124$), and SP5 ($F = 0.019$, $p = 0.892$). These findings suggest that users across both industries report similar experiences regarding data downloading (SP3), document creation (SP4), and overall task execution (SP5) within ERP systems. These functions are typically embedded within standardised ERP workflows and may therefore be perceived similarly across different industrial contexts.

5. Conclusion

This study aimed to examine whether differences exist in users' perceptions of ERP system performance as an indicator of ERP system quality between discrete and process industries. Using empirical data collected from 100 ERP users employed in Serbian enterprises, the study applied ANOVA to identify potential differences in perceived system performance across the two industrial contexts.

The results revealed statistically significant differences for two performance indicators, i.e. data search efficiency and system loading speed, suggesting that certain aspects of ERP responsiveness are perceived differently by users in discrete and process industries. In contrast, no significant differences were observed for data downloading, document creation, and overall task execution, indicating that these ERP functionalities are perceived similarly across the analysed industries.

These findings contribute to the literature on ERP system quality by highlighting the importance of considering industry-specific operational characteristics when evaluating ERP performance. From a practical perspective, the results suggest that ERP vendors and system implementers should pay particular attention to performance-related features such as system responsiveness and data retrieval efficiency when designing and configuring ERP solutions for different industrial environments.

Despite its contributions, this study has several limitations. The analysis was based on a relatively small sample and focused exclusively on enterprises operating in Serbia, which may affect the generalisability of the findings. In addition, the study examined only one dimension of ERP quality, namely system performance. Future research could extend the analysis by incorporating other dimensions of ERP quality, particularly information quality and service quality, to provide a more comprehensive evaluation of ERP system effectiveness across different industrial contexts.

6. Acknowledgement

The research presented in this paper was carried out with the financial support of the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia within the framework of financing scientific research work at the University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, in accordance with the contract with registration number 451-03-34/2026-03/ 200131.

7. References

- [1] **Abu Afifa, M., Saleh, I., Vo Van, H.**, Accounting information quality in the digital era – a perspective from ERP system adoption, *Global Knowledge, Memory and Communication*, 74 (2025), 5–6, pp. 2022–2046. <https://doi.org/10.1108/GKMC-03-2023-0101>
- [2] **Akrong, G. B., Yunfei, S., Owusu, E.**, Development and validation of an improved DeLone-McLean IS success model – application to the evaluation of a tax administration ERP, *International Journal of Accounting Information Systems*, 47 (2022), pp. 100579. <https://doi.org/10.1016/j.accinf.2022.100579>
- [3] **Balić, A., Turulja, L., Kuloglija, E., Pejić-Bach, M.**, ERP quality and the organizational performance: technical characteristics vs. information and service, *Information*, 13 (2022), 10, pp. 474. <https://doi.org/10.3390/info13100474>
- [4] **Brown, J. D.**, The Cronbach alpha reliability estimate, *JALT Testing & Evaluation SIG Newsletter*, 6 (2002), 1.
- [5] **Cebekhulu, B., Ozor, P.**, The influence of quality management and ERP systems on organisational culture and performance, *Proceedings on Engineering Sciences*, 4 (2022), 1, pp. 41–50. <https://doi.org/10.24874/PES04.01.007>
- [6] **Chang, S. I., Yen, D. C., Ng, C. S. P., Chang, I. C., Yu, S. Y.**, An ERP system performance assessment model development based on the balanced scorecard approach, *Information Systems Frontiers*, 13 (2011), 3, pp. 429–450. <https://doi.org/10.1007/s10796-009-9225-5>
- [7] **Itagi, F. S., Satish, J. G., Gaitonde, V. N., Kulkarni, V. N., Kotturshettar, B. B.**, Proceedings 3rd International Conference on Manufacturing, Material Science and Engineering (ICMMSE 2021), AIP Publishing LLC, July, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0118996>
- [8] **Lothary, D., Tomov, P., Dimitrov, L.**, Proceedings AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, February, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0195806>
- [9] **Madapusi, A., D'Souza, D.**, The influence of ERP system implementation on the operational performance of an organization, *International Journal of Information Management*, 32 (2012), 1, pp. 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2011.06.004>
- [10] **Ouiddad, A., Okar, C., Chroqui, R., Beqqali Hassani, I.**, Assessing the impact of enterprise resource planning on decision-making quality: An empirical study, *Kybernetes*, 50 (2021), 5, pp. 1144–1162. <https://doi.org/10.1108/K-04-2019-0273>
- [11] **Shbail, M. O. A., Jaradat, Z., Baker, M. B., Almuiet, M.**, Individual and technological factors affecting the adoption of enterprise resource planning systems in the Jordanian banking sector, *International Journal of Business Information Systems*, 45 (2024), 1, pp. 118–141. <https://doi.org/10.1504/IJBIS.2024.135972>
- [12] **Shen, Y. C., Chen, P. S., Wang, C. H.**, A study of enterprise resource planning (ERP) system performance measurement using the quantitative balanced scorecard approach, *Computers in Industry*, 75 (2016), pp. 127–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2015.05.006>

-
- [13] **Sternad Zabukovšek, S., Kalinic, Z., Bobek, S., Tominc, P.**, SEM–ANN based research of factors' impact on extended use of ERP systems, *Central European Journal of Operations Research*, 27 (2019), 3, pp. 703–735. <https://doi.org/10.1007/s10100-018-0592-1>
- [14] **Stoker, P., Tian, G., Kim, J. Y.**, Analysis of variance (ANOVA), *Basic Quantitative Research Methods for Urban Planners*, Routledge, 2020.
- [15] **Wei, C. C.**, Evaluating the performance of an ERP system based on the knowledge of ERP implementation objectives, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (2008), 1, pp. 168–181. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1189-3>

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.229>

Ključne reči:

Balanced Scorecard;
performanse; organizacije;
strateški model

STRATEŠKI MODELI I PERFORMANSE SA FOKUSOM NA BALANCED SCORECARD

Key words:

Balanced Scorecard;
performance; organizations;
strategic model

STRATEGIC MODELS AND PERFORMANCE WITH A FOCUS ON THE BALANCED SCORECARD

Nedeljka ŽIVKOVIĆ*

* nedeljka.zivkovic@bpa.edu.rs

Maja GLOGOVAC

Biljana TOŠIĆ

Isidora MILOŠEVIĆ

Sanela ARSIĆ

Nedeljko ŽIVKOVIĆ

Beogradska akademija poslovnih i umetničkih strukovnih studija, Beograd

ORCID: 0000-0001-6663-7467

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

ORCID: 0000-0003-3268-8543

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

ORCID: 0000-0003-4343-3001

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0000-0001-5539-8253

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

ORCID: 0000-0002-1957-566X

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

ORCID: 0000-0002-3698-1045

Jedan od načina za poboljšanje organizacionih performansi ali i povećanje konkurentske prednosti jeste primena strateških modela. Jedan od strateških modela u tu svrhu jeste Balanced scorecard. Ovaj model uljučuje četiri perspektive kao što su perspektiva korisnika i stejkholdera, perspektiva internih poslovnih procesa, perspektiva učenja i rasta kao i finansijska perspektiva. Prema tome, cilj rada je sistematizovanje literature opšteprihvaćenog modela Balanced scorecard. Ovaj model je pronašao široku primenu u raznim oblastima svih sektora. Iako je u prethodnom period ovaj model bio svojstven proizvodnim organizacijama, tokom vremena pronašao je uspešnu primenu i u uslužnim delatnostima kao i neprofitnim organizacijama. Pored toga, ovaj strateški model doprinosi povezivanju organizacionih strategija sa operativnim ciljevima što može imati uticaj na povećanje sposobnosti organizacija za poboljšanje organizacionih performansi. Ovaj rad može biti od koristi menadžerskim strukturama organizacija kao početni putokaz i upoznavanje sa usvajanjem, primenom ali i benefitima koji primena ovog modela može obezbediti za mogućnost oblikovanja željenog nivoa organizacionih performansi.

One of the ways to improve organizational performance, as well as to increase competitive advantage, is the application of strategic models. One of the strategic models used for this purpose is the Balanced Scorecard. This model includes four perspectives: the customer and stakeholder perspective, the internal business process perspective, the learning and growth perspective, and the financial perspective. Accordingly, the aim of this paper is to systematize the literature on the widely accepted Balanced Scorecard model. This model has found wide application in various fields across all sectors. Although in the past it was primarily characteristic of manufacturing organizations, over time it has also been successfully applied in service activities as well as in non-profit organizations. In addition, this strategic model contributes to linking organizational strategies with operational objectives, which can influence the enhancement of organizations' capabilities to improve organizational performance. This paper may be useful to managerial structures of organizations as an initial

guideline and introduction to the adoption, implementation, and benefits that the application of this model can provide in shaping the desired level of organizational performance.

1. Introduction

In conditions of a changing market environment, organizations use different strategic models to achieve their strategic plans and goals. Such strategic models can enable efficient and effective management and improvement of organizational performance [1]. Strategic models may also include innovative technologies. Improvement of technological capacities can influence the improvement of organizational performance [2,3]. In conditions of constant market instability, the application of strategic models can contribute to increasing resilience in a competitive market environment. The global market environment requires constant adaptation of organizations, where the application of strategic models can enable the development of competitive strategies. Improvement of organizational performance directly influences the sustainable business development. One of the approaches for improving organizational performance can be the adoption and application of strategic models [4]. Such an approach can enable a better understanding of the competitive market, but also the creation of new value for organizations.

There are different strategic models for improving organizational performance. Essentially, there is no universal solution for the possibility of improving performance. Organizations must adapt the application of strategic models to their specific needs and contexts. According to [5], shaping the desired level of performance could be carried out by applying strategic models. In doing so, it is very important that, regardless of the choice of strategic models, such a system is supported by top management, while it is also crucial that there is involvement of all employees. In addition, it is important that, in this process, the requirements and needs of all relevant stakeholders are efficiently considered. The application of strategic models can enable linking strategy with goals as well as translating strategy into operational goals. The application of strategic models can be a key solution for increasing operational efficiency, as well as increasing the number of customers [6]. In such conditions, the application of strategic models can help leaders to make the most efficient decisions. The adoption of strategic models can be focused on improving organizational performance, in terms of increasing operational efficiency through improvements in process performance. In addition, such improvements can also move in the direction of reducing operating costs or a generalized improvement of performance at the institutional level. The application of such strategic models represents good practices based on which it is possible to achieve positive outcomes. For organizations, it is important to adopt and apply strategic models because they are very useful and can also provide improved allocation of resources. One of such models is a generally accepted strategic model for improving performance, such as the Balanced Scorecard (BSC). Based on all of the above, the aim of this paper is systematize the literature of the BSC strategic model.

2. Literature review

BSC enables managerial structures to make rational managerial decisions [7]. There are no limitations for the application of the BSC model. This model is used in both manufacturing and service, as well as non-profit organizations [8]. [9] dealt with the application of this model in manufacturing organizations, [1,4,8], investigated the possibilities of application in service organizations, while [10] investigated the application in non-profit organizations (such as the healthcare sector). [11] point out that the application of this model can have an impact on the assessment of overall performance in organizations. [12] state that the BSC model can have a favorable outcome for decision-

makers because the application of this model can contribute to managerial structures making rational decisions. The creators of this model, the authors [13,14], point out that the application of this model enables organizations to have a comprehensive models for measuring performance. In doing so, this framework consists of a financial and non-financial mix that includes four perspectives [13,14,15]:

- Customer and stakeholder perspective – how the organization should present itself to its customers and relevant stakeholders to achieve the goals of its vision,
- Perspective of internal business processes – improving institutional efficiency to achieve the goals of the vision, not only through improving internal processes but also through designing new innovative processes as support to existing processes that would be in function of fulfilling the needs and expectations of customers and other relevant stakeholders,
- Learning and Growth perspective – how the organization would maintain the ability to change and improve,
- Financial perspective – how the organization should appear to its relevant stakeholders to achieve financial effects.

Contemporary approaches to the use of the BSC model indicate that the customer perspective should be viewed from a broader angle and that, in addition to customers, it should also include other relevant stakeholders [16]. [12] emphasize that the aim of applying this model is the pursuit of creating resilience in organizations, establishing business sustainability, and increasing competitive advantage. Although the BSC model was created more than three decades ago, it is still intensively applied today [17]. The authors particularly emphasize that the use of this model enables obtaining feedback from customers and other relevant stakeholders, and this feedback should be used for potential improvements of financial or non-financial performance [14]. [15] states that this model provides a solid foundation for performance measurement in organizations. The authors of the model, [13,14] focus on the possibility of overcoming traditional ways and approaches to problem solving by applying this strategic model. The four perspectives within this model show interconnection, as presented in Figure 1.

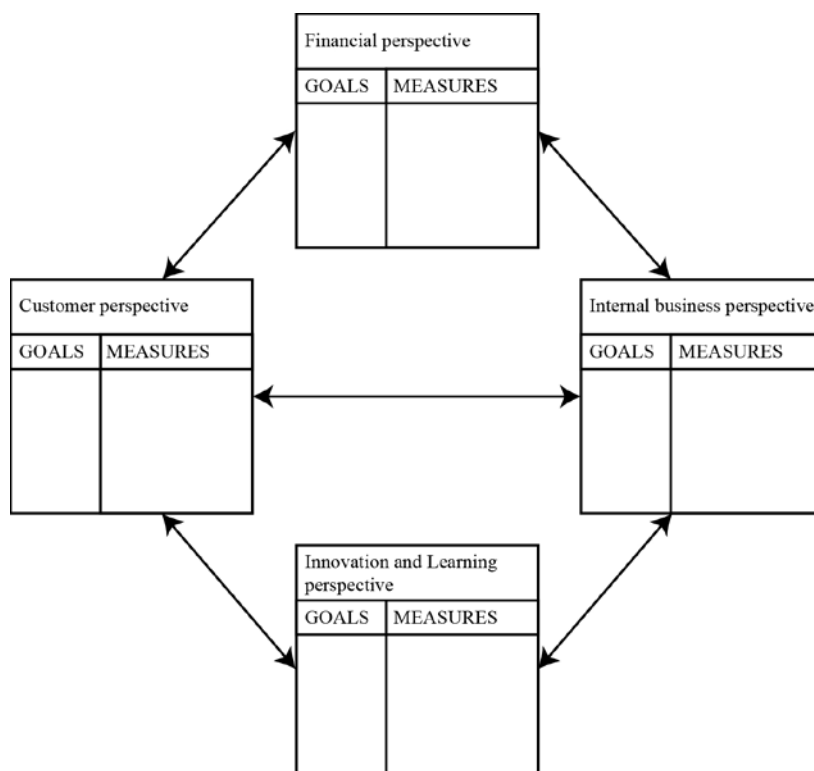


Figure 1. Balanced Scorecard. Source: [13]

The four perspectives of this model, such as the customer and stakeholder perspective, the internal business processes perspective, the learning and growth perspective, and the financial perspective, represent certain indicators of the financial or non-financial part, and these indicators could be initiators of potential improvement. [18] emphasize that customers and other relevant stakeholders often need, in addition to financial information, other information, which the application of this model can provide. This model enables linking strategy with goals and plans in organizations, as well as translating strategies into operational activities of organizations [13,14,15]. According to [19], the customer and stakeholder perspective holds a leading hierarchical position not only in manufacturing/service organizations but also in non-profit organizations.

2.1. Customer and Stakeholder Perspective

The customer and stakeholder perspective is one of the leading perspectives of the BSC model because it reflects the level of satisfaction of customers and stakeholders, which is very important for every organization, whether manufacturing or service-oriented. The creators of the model, [13] emphasize the essential importance of customer orientation. In addition, feedback that can be obtained from customers should be integrated into the performance measurement system [20]. [21] state that the customer perspective and customer orientation are directly incorporated into financial effects in organizations. The focus on the customer perspective within the BSC model is a strategic tool that enables managerial structures to better understand and identify the needs and expectations of customers [20]. [22] emphasize that from the customer perspective, it is very important to establish performance measurement indicators to identify the level of satisfaction of customers and other relevant stakeholders.

2.2. Internal Business Perspective

The customer and stakeholder perspective is also very important from the standpoint of operational activities, such as the internal business processes perspective. The importance of the customer and stakeholder perspective is that the focus on customers is directly reflected in the performance and results of internal business processes [13]. This non-financial indicator enables monitoring the development of the capabilities of operational activities in organizations [23]. In doing so, it is of great importance to monitor infrastructure development, as well as the adequate allocation of resources needed for proper management of internal business processes [24]. To increase the satisfaction of customers and other stakeholders, important aspects of internal business processes would be continuous improvements, efforts to increase the efficiency and effectiveness of internal business processes, as well as the development of information and communication technologies, infrastructure development, etc. [25]. According to [13], focusing on the internal business processes perspective is also important for linking strategy with organizational goals and the fulfillment of those goals.

2.3. Learning and Growth Perspective

In addition to the customer and internal business processes perspectives, the learning and growth perspective is also a non-financial indicator, which is primarily reflected in the organization's ability to develop. Key factors that characterize these perspectives include leadership and leadership commitment, as well as the willingness of all employees to accept changes [26]. According to [13], this perspective provides answers to questions related to the growth and development of the organization at a comprehensive level. This perspective is significantly influenced not only by customer satisfaction but also by the level of employee satisfaction [27]. In fact, readiness for

change and innovation, especially in modern business conditions and accelerated digital transformation, represents the foundation for the organization's ability to change and develop. According to the creators of the BSC model, [13] organizational learning and growth are connected to organizational culture and organizational value. [4] state that organizational learning and growth are imperative for the success of every organization because they will not only be directly reflected in both operational activities and customer and stakeholder satisfaction, but will also significantly influence financial effects in organizations, since these four perspectives of the BSC model are mutually interconnected, with each perspective depending on the others.

2.4. Financial Perspective

The creators of the Balanced Scorecard model Kaplan and Norton point out that the success of an organization cannot be measured only on the basis of financial indicators and that integrated with other perspectives they provide a comprehensive picture based on measured performance. In this way, as they further point out [13] by a mix of financial and non-financial measures an improvement in financial effect in organizations can be achieved. Insight into financial statements represent information of importance for all interested parties. For the achievement of financial goals in organizations it is necessary to implement a set of measures and policies that help managerial structures the making of efficient and effective decisions [18]. Available literature indicate that measuring performance only from a financial point of view has often been disputed which is also confirmed by the authors of the Balanced Scorecard Kaplan and Norton who emphasize that financial result arises from operational activities. As already stated in nonprofit organizations the customer perspective occupies a leading place while the situation is somewhat different in profit organizations namely in this area the financial perspective occupies a key hierarchical place. However what is essential and what the creators of the Balanced Scorecard point out is that even the best balanced indicators of BSC cannot guarantee the success of an organization but the application of this model can enable the translation of strategies into operational activities where it is assumed that not all long term strategies can ensure profitability.

By combining financial and non-financial indicators through four interrelated perspectives, a multidimensional effect could be achieved in the form of achieving the strategic objectives of the organization [15]. There is a cause-and-effect relationship between these four perspectives, which means that the perspectives complement each other and cannot be observed separately but rather synergistically [28]. These previously described four perspectives are systemically connected and function as four cause-and-effect relationships as drivers and outcome measures as a strategic map for comprehensive performance management in organizations [29]. Generally speaking, in order to achieve the effects of implementing the BSC model through four interrelated perspectives, this model should be properly implemented in order to contribute to effective performance management in organizations [30].

3. Discussion and conclusion

The aim of this paper was to systematize the literature on the strategic BSC model. Based on the available literature, it can be concluded that the implementation of this model provides a solid foundation for improving performance in organizations. Also, the application of this model could enable organizations to translate long-term strategies into operational activities. However, as with other models, implementation alone cannot guarantee success in organizations. The application of this model can be useful to managerial structures in making rational decisions, as well as making decisions based on facts [13]. The primary idea of applying this model is to focus on all areas,

including all four interrelated perspectives [18]. This model is based on measuring the performance of the financial perspective and the other three non-financial perspectives [18]. This paper also has several limitations. First, no empirical research was conducted in a specific area where more significant information could be obtained. Therefore, it may be valuable to select variables for a specific area and context and, in that sense, conduct a comprehensive research. Also, it may be valuable to conduct a comprehensive research to obtain information on which organizations have implemented this strategic model and what the effects of applying this strategic model are on the possibility of improving performance in organizations. The conclusions are largely based on a literature analysis, which is why the possibilities for generalizing practical effects are limited. In this regard, the recommendation is that future directions should be based on empirical research.

4. References

- [1] **Al Jardali, H., Khaddage-Soboh, N., Abbas, M., Al Mawed, N.** Performance management systems in Lebanese private higher education institutions: design and implementation challenges. *Higher Education, Skills and Work-Based Learning*, 11 (2), (2021), 297–316.
- [2] **Zahwa, A., Sutjipto, M. R., Salim, D. F.** A strategic model for women entrepreneurs: Digital literacy, resources, and innovation in enhancing MSME performance. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 9(4), (2025), 2571-2586.
- [3] **Westerveld, P., Fielt, E., Desouza, K. C., Gable, G. G.** The business model portfolio as a strategic tool for value creation and business performance. *The Journal of Strategic Information Systems*, 32(1), (2023), 101758
- [4] **Lin, M. H., Hu, J., Tseng, M. L., Chiu, A. S., Lin, C.** Sustainable development in technological and vocational higher education: Balanced scorecard measures with uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 120, (2016), 1–12.
- [5] **Asgarpour, S., Hartmann, A., Gkiotsalitis, K., Neef, R.** Scenario-based strategic modeling of road transport demand and performance. *Transportation Research Record*, 2677 (5), (2023), 1415–1440.
- [6] **Dillianti, R., Prabowo, H., Rahim, R. K., Kurniawan, Y.** Bridging market orientation and leadership through digital enablement: A strategic model for life insurance success. *Insurance Markets and Companies*, 16(1), (2025), 42.
- [7] **Silalahi, E. E.** The balanced scorecard model for strategic business management. *International Journal of Current Science Research and Review*, 6, (2023), 3014-19.
- [8] **Taylor, J., Baines, C.** Performance management in UK universities: implementing the Balanced Scorecard. *Journal of Higher Education Policy and Management*, 34 (2), (2012), 111–124.
- [9] **Quesado, P., Marques, S., Silva, R., Ribeiro, A.** The balanced scorecard as a strategic management tool in the textile sector. *Administrative sciences*, 12(1), (2022), 38.
- [10] **Amer, F., Hammoud, S., Khatatbeh, H., Lohner, S., Boncz, I., Endrei, D.** The deployment of balanced scorecard in health care organizations: is it beneficial? A systematic review. *BMC health services research*, 22(1), (2022), 65.
- [11] **Nazari-Shirkouhi, S., Mousakhani, S., Tavakoli, M., Dalvand, M. R., Šaparauskas, J., Antuchevičienė, J.** Importance-performance analysis based balanced scorecard for performance evaluation in higher education institutions: an integrated fuzzy approach. *Journal of Business Economics and Management*, 21 (3), (2020), 647–678.

- [12] **Makki, A. A., Alqahtani, A. Y., Abdulaal, R. M., Madbouly, A. I.** A novel strategic approach to evaluating higher education quality standards in University Colleges using multi-criteria decision-making. *Education Sciences*, 13 (6), (2023), 577.
- [13] **Kaplan, R. Norton, D.**, (1992). The Balanced Scorecard: Measures that Drive Performance. *Harvard Business Review*. 70 (1), 71–99.
- [14] **Kaplan, R. S., Norton, D. P.** Using the balanced scorecard as a strategic management system. (1996).
- [15] **Kiriri, P. N.** Management of performance in higher education institutions: The application of the balanced scorecard (BSC). *European Journal of Education*, 5 (1), (2022), 141–154.
- [16] **Serdar Asan, Ş., Tanyaş, M.** Integrating Hoshin Kanri and the balanced scorecard for strategic management: The case of higher education. *Total Quality Management*, 18 (9), (2007), 999–1014.
- [17] **Al-Bahi, A. M., Abd-Elwahed, M. S., Soliman, A. Y.** Implementation of sustainability indicators in engineering education using a combined balanced scorecard and quality function deployment approaches. *Sustainability*, 13 (13), (2021), 7083.
- [18] **Hammood, A. M., Dammak, S.** The mediating role of the balanced scorecard in the relationship between internal control and the financial reports quality. *International Journal of Professional Business Review*, 8(1), (2023), e01060-e01060.
- [19] **Stejskal, K., Sayed, N., Lento, C.** Mapping stakeholder expectations of a publicly funded post-secondary institution: a balanced scorecard perspective. *Accounting and the Public Interest*, 20 (1), (2020), 104–137.
- [20] **Grande, K., Haynes, N.** Outdoor hospitality performance: Through the lens of the balanced scorecard and its customer perspective. *International Journal of Hospitality Management*, 121, (2024), 103800.
- [21] **Liang, C. J., Wang, W. H.** How managers in the financial services industry ensure financial performance. *The service industries journal*, 28 (2), (2008), 193–210.
- [22] **Westlund, A. H., Källström, M., Parmler, J.** SEM-based customer satisfaction measurement: On multicollinearity and robust PLS estimation. *Total Quality Management*, 19 (7–8), (2008), 855–869.
- [23] **Mio, C., Costantini, A., Panfilo, S.** Performance measurement tools for sustainable business: A systematic literature review on the sustainability balanced scorecard use. *Corporate social responsibility and environmental management*, 29(2), (2022), 367-384.
- [24] **Tsai, F. M., Bui, T. D., Tseng, M. L., Wu, K. J., Chiu, A. S.** A performance assessment approach for integrated solid waste management using a sustainable balanced scorecard approach. *Journal of cleaner production*, 251, (2020), 119740.
- [25] **Soysa, I. B., Jayamaha, N. P., Grigg, N. P.** Validating the balanced scorecard framework for nonprofit organisations: an empirical study involving Australasian healthcare. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30 (9–10), (2019), 1005–1025.
- [26] **Machmuddah, Z., Setiawanta, Y.** Balanced Scorecard: Learning and Growth Perspective. *Jurnal Inovasi Ekonomi*, 4(02), (2019).
- [27] **Davis, S., Albright, T.** An investigation of the effect of balanced scorecard implementation on financial performance. *Management accounting research*, 15 (2), (2004), 135–153.
- [28] **Rahayu, S., Yudi, Y., Rahayu, R., & Luthfi, M.** The relationship of balanced scorecard perspectives and government organization performance measurement. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 72(7), (2023), 1881-1902.

-
- [29] **Hristov, I., Cristofaro, M., Camilli, R., & Leoni, L.** A system dynamics approach to the balanced scorecard: a review and dynamic strategy map for operations management. *Journal of manufacturing technology management*, 35(4), (2024), 705-743.
- [30] **Tawse, A., & Tabesh, P.** Thirty years with the balanced scorecard: What we have learned. *Business Horizons*, 66(1), (2023), 123-132.

Stručni rad

Ključne reči:

kaizen, IT resursi;
menadžment kvaliteta;
poboljšanje procesa;
organizacija

Key words:

kaizen, IT resources;
quality management;
process improvement;
organization

Milica LJUBOJEVIĆ*

* milica.ljubojevic98@gmail.com

Mladen ĐURIĆ

MEĐUSOBNI ODNOSI KAIZEN PRISTUPA I IT RESURSA U POBOLJŠAVANJU KVALITETA PROCESA U ORGANIZACIJI

RELATIONSHIP BETWEEN THE KAIZEN APPROACH AND IT RESOURCES IN QUALITY IMPROVEMENT OF PROCESSES IN AN ORGANIZATION

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

ORCID: 0009-0001-1152-5975

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd

ORCID: 0000-0002-8219-2899

Rad se bavi sagledavanjem međusobnih odnosa Kaizen pristupa i IT resursa u poboljšavanju kvaliteta procesa u organizaciji. Kaizen se u radu posmatra kao pristup menadžmentu kvaliteta koji se zasniva na stalnom poboljšanju, usmerenosti na procese, standardizaciji i uključivanju zaposlenih u svakodnevno rešavanje problema i traženje boljih načina rada. U tom smislu, rad najpre pokazuje osnovne karakteristike Kaizen pristupa i njegovu povezanost sa konceptom Total Quality Management, kao i sa zahtevima standarda ISO 9001. Posebno se ukazuje na značaj PDCA ciklusa, gemba pristupa i 5S metodologije, jer oni predstavljaju važnu osnovu za poboljšavanje procesa u organizaciji. Drugi deo rada usmeren je na IT resurse kao podršku primeni Kaizen principa. Razmatraju se BPM alati, QMS softverska rešenja, alati za upravljanje zadacima i radnim tokovima, data i BI alati, kao i kolaboracioni alati. Njihova uloga se ogleda u tome što omogućavaju veću preglednost procesa, lakše praćenje rezultata, bolju dokumentovanost aktivnosti i jednostavniju komunikaciju među učesnicima procesa. Cilj rada jeste da pokaže da se kvalitet procesa ne poboljšava samo primenom određenih metoda menadžmenta kvaliteta, već i njihovim povezivanjem sa odgovarajućim IT resursima. Zaključuje se da IT resursi predstavljaju značajnu podršku Kaizen pristupu, jer olakšavaju praćenje procesa, analizu podataka, standardizaciju aktivnosti i sprovođenje stalnog poboljšanja u organizacionoj praksi.

The paper examines the relationships between the Kaizen approach and IT resources in improving process quality within an organization. In the paper, Kaizen is viewed as a quality management approach based on continuous improvement, process orientation, standardization, and the involvement of employees in everyday problem-solving and in finding better ways of working. In this context, the paper first presents the main characteristics of the Kaizen approach and its connection with the concept of Total Quality Management, as well as with the requirements of the ISO 9001 standard. Special attention is given to the importance of the PDCA cycle, the gemba approach, and the 5S methodology, as they represent an important basis for process improvement in an organization. The second part of the paper is focused on IT resources as support for the application of Kaizen principles. It discusses BPM tools, QMS software solutions, task and workflow management tools, data and BI tools, as well as collaboration tools. Their role is reflected in enabling greater process visibility, easier monitoring of results, better documentation of activities, and simpler communication among process participants. The aim of the paper is to show that process quality is improved not

only through the application of certain quality management methods, but also through their connection with appropriate IT resources. It is concluded that IT resources represent significant support for the Kaizen approach, as they facilitate process monitoring, data analysis, activity standardization, and the implementation of continuous improvement in organizational practice.

1. Uvod

U savremenom poslovanju kvalitet više nije nešto što se posmatra izdvojeno, već predstavlja sastavni deo svakodnevnog rada organizacije. Upravo iz tog razloga, sve veći značaj dobijaju pristupi koji se zasnivaju na kontinuiranom unapređenju. Jedan od najpoznatijih i najčešće primenjivanih pristupa te vrste jeste Kaizen. Kaizen podrazumeva stalna, postepena poboljšanja procesa, uz aktivno učešće zaposlenih i fokus na način na koji se posao zaista obavlja.

U drugom delu rada Kaizen je razmatran kao metod menadžmenta kvaliteta, pri čemu su objašnjeni njegovi osnovni principi, kao i povezanost sa konceptima kao što su Total Quality Management i standard ISO 9001. Pored toga, analizirana je i uloga PDCA ciklusa, gemba pristupa i 5S metodologije kao praktičnih elemenata koji omogućavaju primenu Kaizen filozofije u organizacijama. Ovaj deo rada daje osnovu za razumevanje kako Kaizen funkcioniše u praksi, čak i bez tehnološke podrške.

Međutim, savremene organizacije sve više koriste informacione tehnologije kako bi unapredile svoje poslovanje. Upravo iz tog razloga, treći deo rada usmeren je na ulogu IT resursa kao podrške Kaizen pristupu. U ovom delu biće razmatrani različiti tipovi softverskih alata, kao što su BPM alati, QMS softverska rešenja, alati za upravljanje zadacima i radnim tokovima, data & BI alati, kao i kolaboracioni alati. Svi ovi alati omogućavaju bolju kontrolu procesa, lakše praćenje poboljšanja i jasniju komunikaciju unutar organizacije, što je u skladu sa Kaizen principima.

U poslednjem delu rada fokus je na primeni Kaizen pristupa u praksi, sa posebnim osvrtom na razlike između primene bez IT podrške i primene uz upotrebu savremenih softverskih rešenja. Kroz praktične primere biće prikazano kako IT alati mogu da doprinesu većoj transparentnosti, bržem uočavanju problema i efikasnijem praćenju unapređenja. Na taj način, rad ima za cilj da prikaže stvarnu ulogu IT resursa u podršci Kaizen filozofiji i njihov značaj za savremeni menadžment kvaliteta.

2. Kaizen kao metod menadžmenta kvaliteta

Kaizen je veoma važan pristup u oblasti menadžmenta kvaliteta. Njegova ideja jeste da se unaprede svi organizacioni procesi, kroz kontinuirane i postepene korake poboljšanja. Za razliku od pristupa koji se oslanjaju na radikalne i promene koje se realizuju ne tako često, Kaizen podrazumeva stalno unapređivanje kroz male, inkrementalne korake. Takođe, ono što dodatno karakteriše ovaj pristup jeste da se u sve procese unapređenja uključuju svi zaposleni.

Cilj Kaizen-a je trajno unapređenje performansi procesa, proizvoda i usluga, kao i povećanje zadovoljstva korisnika. Istraživanja u oblasti Total Quality Management ukazuju da održivi kvalitet nije rezultat izolovanih inicijativa, već sistematskog pristupa koji integriše ljude, procese i tehnologiju (Dewhurst, Martinez-Lorente & Dale, 1999). Shodno tome, Kaizen možemo posmatrati kao mehanizam kojim u svakodnevnom poslovanju primenjujemo principe menadžmenta kvaliteta.

Kaizen pre svega naglašava orijentaciju ka procesima. Fokus mu nisu samo rezultati. Ukoliko posmatramo i želimo da utičemo na kvalitet ishoda, prvenstveno je potrebno unaprediti procese koji dovode do posmatranih ishoda. Ovakvo procesno usmerenje u skladu je sa savremenim standardima kvaliteta i modelima kao što su ISO 9001 i Total Quality Management. Konkretno, ovi modeli

govore koliko je važno definisanje, praćenje i kontinuirano poboljšanje procesa. Shodno tome, Kaizen deluje kao spona između teorijskih principa menadžmenta kvaliteta i njihove praktične primene u organizaciji.

Posebna vrednost Kaizen-a se ogleda u usmerenosti na ljudski faktor, što nije bio slučaj kada su u pitanju tradicionalni pristupi. To praktično znači da ovaj pristup podstiče aktivno učešće svih zaposlenih. Ovo doprinosi razvoju kulture kvaliteta, organizacionog učenja i kolektivne odgovornosti za unapređenje. Prema Gunasekaran, Arunachalam i Arunachalam (2009), integracija znanja zaposlenih, procesa i tehnološke podrške predstavlja ključni preduslov za smanjenje jaza između očekivanja korisnika i stvarnih isporuka.

U savremenim organizacijama, koje karakterišu dinamične promene i ogromna složenost procesa, Kaizen dobija poseban značaj. Tradicionalni oblici primene Kaizen-a se dopunjavaju informacionim tehnologijama i softverskim rešenjima. Ovakav način rada omogućava sistematičnije prikupljanje podataka, kao i bržu analizu problema i efikasnije praćenje poboljšanja. Na taj način, Kaizen možemo posmatrati kao fleksibilan i prilagodljiv metod. Jednostavno, ovaj pristup pruža spremnost da se odgovori na zahteve organizacija.

Sagledan u celini, Kaizen se ne fokusira samo na pojedine tehnike i alate. On spaja strategiju, procese i ljude u cilju unapređenja organizacionih performansi. Upravo zbog toga, Kaizen se posmatra kao neophodan element uspešne primene sistema menadžmenta kvaliteta.

2.1. Osnovni principi Kaizena

Kaizen se ne može posmatrati isključivo kao skup tehnika ili alata. Drugim rečima, on nije samo metodologija koja se primenjuje kada se pojavi problem. Naprotiv, Kaizen predstavlja sistem principa koji usmeravaju način razmišljanja i ponašanje organizacije ka trajnom i održivom unapređenju. U suštini, Kaizen polazi od jednostavne ideje. Kvalitet se ne gradi odjednom.

Osnovna polazna tačka Kaizen pristupa jeste uverenje da se kvalitet ne postiže jednokratnim intervencijama. Odnosno, nije dovoljno uvesti jednu promenu i očekivati trajne rezultate. Kvalitet se gradi postepeno. Korak po korak. To, zapravo, znači da se poboljšanje ostvaruje kroz kontinuirano unapređivanje načina na koji se rad odvija u svakodnevnoj praksi.

Ovi principi, u osnovi, predstavljaju temelj na kome se grade konkretne metode i modeli menadžmenta kvaliteta. Konkretno, na njima se zasnivaju pristupi kao što su Total Quality Management i standardi poput ISO 9001. Vredi istaći da Kaizen nije izdvojen koncept. On se može posmatrati kao praktična podrška ovim modelima. U tom smislu, Kaizen omogućava da se teorijski principi kvaliteta zaista primene u svakodnevnom poslovanju.

Jedan od ključnih principa Kaizen pristupa jeste orijentacija na procese. Drugim rečima, fokus nije samo na konačnim rezultatima. Za razliku od tradicionalnih pristupa, koji su usmereni prevashodno na ishode, Kaizen polazi od toga da su rezultati direktna posledica načina na koji se procesi izvode (Imai, 1986). Jednostavnije rečeno, ako procesi nisu dobri, ni rezultati ne mogu biti dobri. Upravo tu leži logika Kaizen filozofije.

U tom kontekstu, unapređenje kvaliteta podrazumeva detaljno razumevanje postojećih procesa. Pored toga, neophodno je njihovo kontinuirano praćenje i otklanjanje uzroka neefikasnosti, varijacija i grešaka. U praksi, to znači stalno postavljanje pitanja: „Šta može bolje, jednostavnije ili efikasnije?“. S tim u vezi, ovaj princip je u potpunosti usklađen sa procesnim pristupom savremenih sistema menadžmenta kvaliteta, koji upravljanje organizacijom zasnivaju na identifikaciji, merenju i unapređenju međusobno povezanih procesa (Gunasekaran, Arunachalam & Arunachalam, 2009).

Drugi važan princip Kaizen filozofije odnosi se na kontinuitet poboljšanja. Kaizen, dakle, ne podrazumeva velike i povremene promene. Ipak, pri tome ne treba zanemariti da se upravo kroz niz

malih poboljšanja vremenom postižu značajni rezultati. Što praktično znači da se efekti Kaizen-a ne vide uvek odmah. Ali se akumuliraju. Upravo iz tog razloga, ovaj pristup ima poseban značaj u savremenom poslovnom okruženju.

U savremenim organizacijama, koje funkcionišu u uslovima stalnih promena, sposobnost prilagođavanja postaje ključna. U tom smislu, Kaizen nudi realan i održiv okvir za unapređenje. Kao posledica toga, kontinuirano poboljšanje se pokazuje kao efikasniji pristup od kratkoročnih i radikalnih intervencija. Istraživanja u oblasti menadžmenta kvaliteta upravo na to ukazuju, posebno kada je reč o dugoročno održivim rezultatima (Dewhurst, Martinez-Lorente & Dale, 1999).

Posebno je važno istaći da Kaizen značajan akcenat stavlja na ljudski faktor. Za razliku od hijerarhijskih modela, u kojima se inicijative za promene donose isključivo na vrhu organizacije, Kaizen polazi od drugačije logike. Drugim rečima, znanje i iskustvo zaposlenih koji su direktno uključeni u procese smatraju se ključnim resursom. U praksi, upravo ti zaposleni najbolje poznaju probleme u svakodnevnom radu. Upravo tu nastaju najkorisniji predlozi za poboljšanje.

Ovakav pristup, u suštini, doprinosi razvoju kulture kvaliteta. Dodatno, on utiče na povećanje motivacije i osećaja odgovornosti kod zaposlenih. Prema TISIT modelu, integracija ljudskog faktora, procesa i tehnološke podrške predstavlja ključni preduslov za smanjenje jaza između očekivanja korisnika i stvarnih isporuka (Gunasekaran et al., 2009). Samim tim, Kaizen se ne može posmatrati odvojeno od šireg organizacionog i tehnološkog konteksta.

Sledeći značajan princip Kaizen pristupa odnosi se na standardizaciju. Iako se Kaizen često povezuje sa promenama, ipak treba naglasiti da on insistira i na stabilnosti. Poboljšanje je moguće samo ako postoji jasno definisano „normalno stanje“ procesa. To, jednostavno, služi kao osnova za uočavanje odstupanja. Nakon uvođenja poboljšanja, novi način rada se standardizuje. Na taj način se obezbeđuje kontinuitet i sprečava povratak na stare navike.

Još jedan važan princip Kaizen filozofije jeste donošenje odluka na osnovu činjenica i podataka. Drugim rečima, intuicija sama po sebi nije dovoljna. Fokus je na prikupljanju i analizi relevantnih podataka. U praksi, to omogućava jasnije sagledavanje problema i realniju procenu efekata uvedenih poboljšanja. Sa razvojem informacionih tehnologija, ovaj princip dobija dodatni značaj.

Kao rezultat toga, organizacije danas imaju mogućnost da prate performanse procesa gotovo u realnom vremenu. Posledično, povezivanje Kaizen principa sa tehnološkom podrškom predstavlja važan preduslov za uspešnu primenu kontinuiranog unapređenja u složenim organizacionim sistemima (Dewhurst et al., 1999).

2.2. Kaizen u kontekstu ISO 9001/ TQM

Nakon razmatranja osnovnih elemenata Kaizen filozofije, prirodan nastavak analize se odnosi na njegovo pozicioniranje i vezu sa menadžmentom kvaliteta. Ova filozofija se često sreće povezana sa konceptima kao što je Total Quality Management kao i ISO 9001. Pre svega, važno je napomenuti da se Kaizen kao filozofija, tj. kao koncept, ne posmatra zasebno kao izolovana filozofija, već kao pristup koji je povezan i kompatibilan sa osnovnim elementima TQM-a i zahtevima standarda kvaliteta. Drugim rečima, ovim pristupom se predstavlja način na koji se principi TQM-a i ISO 9001 „oživljavaju“ u svakodnevnom radu (Imai, 1986). Prema Imai-ju, TQM predstavlja neki vid podrške Kaizen pristupu, tako što pomaže u svim sferama poslovanja. On je razvijen kako bi pomogao menadžmentu da postane profitabilniji i konkurentniji (Imai, 1986). U tom kontekstu, Total Quality Management se može posmatrati kao širi okvir unutar kog Kaizen ima svoju jasnu ulogu. TQM počiva na ideji da je kvalitet rezultat zajedničkog delovanja cele organizacije, a ne samo pojedinačnih odeljenja ili funkcija. To, praktično znači da kvalitet nije nešto što se analizira na kraju procesa, već nešto

što se gradi tokom celokupnog rada. Upravo zbog toga, Kaizen se nadovezuje na TQM, jer insistira na stalnom unapređenju procesa i načina rada, korak po korak (Imai, 1986).

Drugim rečima, Kaizen omogućava da se TQM ne svede samo na skup pravila ili smernica, već da zaživi u svakodnevnoj praksi. U praksi, to znači da se zaposleni ohrabruju da uočavaju probleme, da predlažu poboljšanja i da aktivno učestvuju u unapređenju procesa. Konkretno tu se vidi jasna povezanost između Kaizen filozofije i TQM pristupa. Oba pristupa naglašavaju ulogu ljudi, timskog rada i kontinuiranog poboljšanja kao ključnih elemenata.

Sa druge strane, ISO 9001 predstavlja formalni standard koji definiše zahteve za sistem menadžmenta kvaliteta. On propisuje šta organizacija treba da ima uspostavljeno kako bi sistem kvaliteta bio efikasan. Međutim, on ne ulazi detaljno u to na koji način će se ti zahtevi sprovoditi u praksi. Upravo iz tog razloga, Kaizen se često koristi kao pristup koji pomaže organizacijama da zahteve ISO 9001 primene na konkretan i praktičan način. Jednostavnije rečeno, ISO 9001 daje okvir, dok Kaizen nudi način da se taj okvir ispuni i održava.

Takođe, ISO 9001 i Kaizen stavljaju akcenat i na procesni pristup. U oba slučaja, rezultati se ne posmatraju izolovano. Rezultati se posmatraju kao posledica načina na koji su procesi organizovani i kako se njima upravlja. Shodno tome, Kaizen podstiče organizacije da stalno preispituju postojeće procese. Bitno je uočiti gde postoji prostor za poboljšanje i da se postepeno uvode promene. To, zapravo, znači da se kontinuirano unapređenje ne dešava sporadično. Unapređenje postaje deo uobičajenog načina rada. Ova ideja je dodatno razrađena u knjizi Gemba Kaizen, gde Imai naglašava da se unapređenje kvaliteta mora dešavati tamo gde se rad zaista odvija, odnosno u gemba-i (Imai, 2012). Prema ovom pristupu, TQM i Kaizen ne bi trebalo da ostanu samo na nivou procedura i dokumentacije. Oni treba da budu prisutni u svakodnevnim aktivnostima zaposlenih. Drugim rečima, kvalitet se ne gradi u kancelarijama kroz papire, već u procesima u kojima se stvara vrednost.

Pored toga, Gemba Kaizen ističe značaj standardizacije kao važnog koraka u kontinuiranom unapređenju. Iako Kaizen podrazumeva promene, one ne treba da budu haotične ili privremene. Naprotiv, nakon uvođenja poboljšanja, novi način rada treba da postane standard, što je u potpunosti u skladu sa zahtevima ISO 9001 (Imai, 2012). Upravo iz tog razloga, Kaizen i ISO 9001 se ne mogu posmatrati kao suprotstavljeni, već kao međusobno povezani pristupi.

Istraživanja koja se bave odnosom TQM-a i informacionih tehnologija ukazuju da se najbolji rezultati postižu onda kada je kontinuirano unapređenje deo sistemskog i integrisanog pristupa upravljanju kvalitetom (Dewhurst, Martinez-Lorente & Dale, 1999). To znači da izolovane aktivnosti, koje nisu povezane sa celokupnim sistemom, imaju ograničen domet. Stoga, Kaizen ima ulogu da povezuje različite aktivnosti i omogući da unapređenje kvaliteta bude kontinuirano i usaglašeno sa ciljevima organizacije. Ova povezanost Kaizen pristupa, TQM-a i tehnološke podrške dodatno je prikazana u TISIT modelu, koji integriše principe menadžmenta kvaliteta sa informacionim tehnologijama (Gunasekaran, Arunachalam & Arunachalam, 2009). U okviru ovog modela, kontinuirano unapređenje se posmatra kao proces smanjenja jaza između očekivanja korisnika, definisanih procesa i ostvarenih rezultata. U tom smislu, Kaizen predstavlja konceptualnu osnovu koja omogućava da TQM i ISO 9001 budu primenjeni na fleksibilan i praktičan način, uz podršku savremenih informacionih tehnologija.

2.3. Veza Kaizena i PDCA ciklusa

Kada se govori o Kaizen pristupu, PDCA ciklus se gotovo uvek pominje kao njegov sastavni deo. U praksi, ova dva pojma se toliko često koriste zajedno da se ponekad stiče utisak da je reč o istoj stvari. Međutim, iako su blisko povezani, njihova uloga nije ista. Kaizen predstavlja način razmišljanja i odnos prema unapređenju, dok PDCA ciklus daje jasnu strukturu i redosled koraka kroz

koje se to unapređenje sprovodi. Drugim rečima, Kaizen odgovara na pitanje „zašto stalno poboljšavamo“, a PDCA na pitanje „kako to konkretno radimo“ (Filipović & Đurić, 2009).

PDCA ciklus se sastoji od četiri faze: Plan, Do, Check i Act. Ove faze se ponavljaju i čine zatvoren krug, što je u potpunosti u skladu sa Kaizen idejom da unapređenje nikada nije jednokratni događaj. U suštini, svaki završeni ciklus predstavlja polaznu osnovu za sledeći. Upravo tu se vidi jasna veza sa Kaizen filozofijom, jer se poboljšanje ne posmatra kao krajnji cilj, već kao kontinuiran proces (Hasan & Hossain 2018).

U fazi Plan identifikuju se problemi, definišu ciljevi i planiraju mere za unapređenje. Ova faza je posebno značajna jer podrazumeva analizu postojećih procesa i traženje uzroka problema. U tom smislu, Kaizen pristup podstiče da se pažnja usmeri na način rada, a ne samo na rezultate. Jednostavnije rečeno, ne traži se ko je pogrešio, već šta u procesu može da se uradi bolje. Ova logika je posebno naglašena u radovima koji se bave primenom PDCA ciklusa u kontinuiranom unapređenju kvaliteta, gde se ističe značaj sistematičnog planiranja kao osnove za uspešne promene.

Faza Do odnosi se na sprovođenje planiranih mera u praksi. U ovom koraku, poboljšanja se najčešće uvode u ograničenom obimu, kako bi se smanjili rizici i omogućilo lakše prilagođavanje. Upravo ovaj pristup je u skladu sa Kaizen filozofijom malih i postepenih promena. U praksi, to znači da se ne menja sve odjednom, već se korak po korak testiraju nova rešenja. Ovakva primena PDCA ciklusa posebno je zastupljena u softverskim i IT okruženjima, gde se poboljšanja često uvode iterativno, kroz više manjih koraka (Sahu & Sahu, 2018).

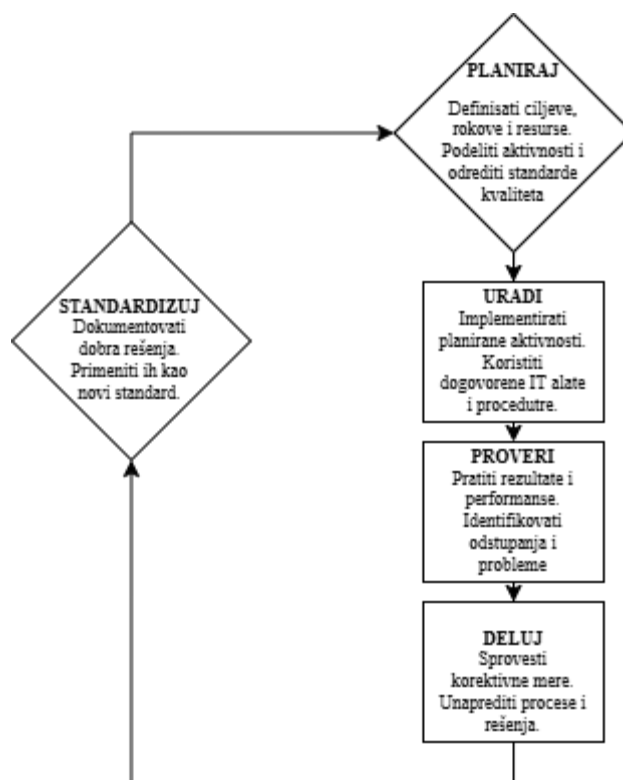
Faza Check ima zadatak da pokaže da li su uvedene mere zaista dovele do poboljšanja. U ovoj fazi se prikupljaju podaci, prate rezultati i upoređuju sa planiranim ciljevima. Ovo je trenutak kada se Kaizen princip donošenja odluka na osnovu činjenica najjasnije ispoljava. Istraživanja pokazuju da bez sistematične provere i merenja efekata, poboljšanja ostaju na nivou pretpostavki i ličnog utiska (Isniah et al., 2019). Upravo iz tog razloga, PDCA ciklus predstavlja važan alat koji omogućava da Kaizen aktivnosti budu merljive i proverljive.

Poslednja faza, Act, odnosi se na donošenje odluka na osnovu rezultata provere. Ukoliko se pokaže da su poboljšanja dala pozitivne rezultate, novi način rada se standardizuje i primenjuje u širem obimu. U suprotnom, preduzimaju se korektivne mere i ciklus počinje iznova. To, zapravo, znači da PDCA ciklus nikada nije „zatvoren“, već da svaka faza vodi ka novom krugu unapređenja. Ova logika je u potpunosti u skladu sa Kaizen pristupom, koji kontinuirano unapređenje posmatra kao trajan proces.

Veza između Kaizen pristupa i PDCA ciklusa posebno je izražena u kontekstu TQM-a i primene informacionih tehnologija. Radovi koji analiziraju uticaj IT-a na TQM ukazuju da PDCA ciklus, uz adekvatnu tehnološku podršku, omogućava lakše praćenje procesa, prikupljanje podataka i analizu rezultata (Dewhurst et al., 2001). U tom smislu, Kaizen obezbeđuje kulturološku i organizacionu osnovu za kontinuirano unapređenje, dok PDCA predstavlja praktični mehanizam kroz koji se ta poboljšanja realizuju.

U praksi, ovo znači da Kaizen i PDCA ne funkcionišu odvojeno, već kao međusobno povezani elementi sistema menadžmenta kvaliteta. Kaizen stvara okvir u kome je unapređenje poželjno i očekivano, dok PDCA obezbeđuje strukturu koja omogućava da se to unapređenje sprovodi na organizovan i kontrolisan način. Upravo tu se može uočiti njihova najveća vrednost, posebno u savremenim organizacijama koje teže sistematičnom i održivom unapređenju kvaliteta.

Sledeća slika vizuelno prikazuje PDCA ciklus.



PDCA ciklus

2.4. Gemba i menadžment

Pojam gemba ima posebno mesto u okviru Kaizen filozofije i predstavlja jedan od ključnih elemenata za razumevanje uloge menadžmenta u kontinuiranom unapređenju. U najjednostavnijem smislu, gemba označava mesto gde se stvara vrednost, odnosno gde se poslovni procesi zaista odvijaju. Upravo ovim se problemi, ali i mogućnosti za poboljšanje, najbolje uočavaju upravo na samom mestu rada, a ne kroz izveštaje ili formalnu dokumentaciju (Imai, 2012).

Pre svega, važno je istaći da Gemba Kaizen poseban akcenat stavlja na ulogu menadžmenta u procesu unapređenja. Prema Imai-ju, zadatak menadžmenta nije samo da planira, organizuje i kontroliše, već i da bude prisutan u gemba-i i da aktivno učestvuje u razumevanju procesa (Imai, 2012). Drugim rečima, menadžment ne bi trebalo da donosi odluke isključivo na osnovu indikatora i izveštaja, već na osnovu stvarnog uvida u način na koji se rad obavlja. Upravo tu se pravi razlika između formalnog i stvarnog upravljanja. U tom kontekstu, gemba pristup menja tradicionalnu ulogu menadžmenta.

Umesto da se fokusira isključivo na rezultate, menadžment se usmerava na procese. U suštini, ako su procesi dobro definisani i unapređivani, rezultati će biti posledica toga. Ova logika je u potpunosti u skladu sa Kaizen filozofijom i principima TQM-a, koji naglašavaju procesni pristup kao osnovu upravljanja kvalitetom (Imai, 2012).

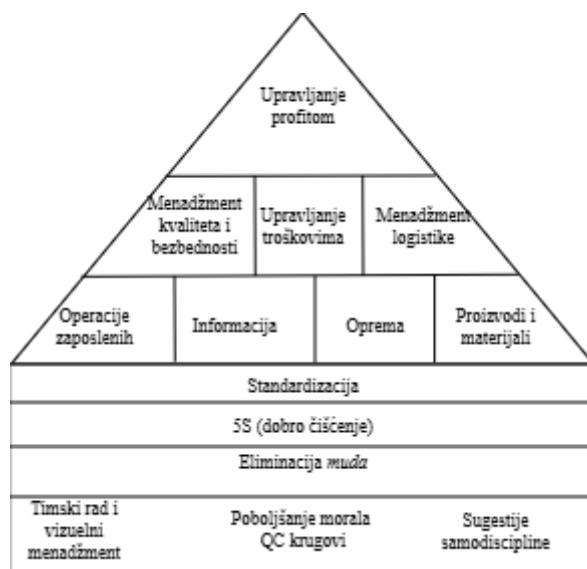
Pored toga, Gemba Kaizen ističe da je jedan od ključnih zadataka menadžmenta da podrži zaposlene u unapređenju procesa. To znači da menadžment treba da stvori okruženje u kome su predlozi za poboljšanje poželjni i ohrabreni. U praksi, to podrazumeva otvorenu komunikaciju, spremnost da se problemi sagledaju bez traženja krivice i fokus na zajedničko rešavanje problema. Ovaj pristup je u direktnoj vezi sa Kaizen idejom da svi zaposleni mogu i treba da učestvuju u kontinuiranom unapređenju (Imai, 1997). Sa druge strane, pri tome ne treba zanemariti da gemba pristup zahteva određenu disciplinu i jasnu strukturu. Imai naglašava da poboljšanja koja nastaju u gemba-i moraju biti podržana standardima, kako bi bila održiva (Imai, 2012). To znači da uloga menadžmenta nije samo

da inicira promene, već i da obezbedi njihovu standardizaciju i doslednu primenu. Upravo u tom smislu, gemba i menadžment nisu suprotstavljeni, već međusobno zavisni.

U okviru sistema menadžmenta kvaliteta, ovaj pristup ima poseban značaj. TQM polazi od pretpostavke da se kvalitet gradi kroz svakodnevne aktivnosti i procese, a ne samo kroz formalne kontrole. Gemba Kaizen dodatno pojačava ovu ideju, jer naglašava da menadžment mora biti prisutan tamo gde se ti procesi odvijaju. U tom smislu, gemba predstavlja prostor u kome se TQM principi sprovode u praksi, a ne samo na nivou strategije ili dokumentacije (Imai, 2012).

Pored toga, istraživanja u oblasti TQM-a ukazuju da je uloga menadžmenta ključna za uspeh sistema kvaliteta, posebno kada je reč o kontinuiranom unapređenju (Dewhurst, Martinez-Lorente & Dale, 1999). U tom kontekstu, gemba pristup omogućava menadžmentu da bolje razume uzroke problema i da donese informisanije odluke. Jednostavnije rečeno, menadžment koji poznaje procese iz prakse ima veću sposobnost da podrži realna i održiva poboljšanja. Veza između gemba pristupa i menadžmenta postaje još značajnija u uslovima primene informacionih tehnologija. Iako IT sistemi omogućavaju praćenje podataka i performansi, Dewhurst i saradnici (1999) ističu da tehnologija sama po sebi nije dovoljna. U tom smislu, gemba pristup dopunjuje tehnološku podršku, jer omogućava menadžmentu da podatke sagleda u kontekstu stvarnih procesa. To, praktično, znači da se odluke ne donose samo na osnovu brojeva, već i na osnovu razumevanja realnog načina rada. Iz navedenog proizilazi da gemba predstavlja ključnu tačku povezivanja Kaizen filozofije i uloge menadžmenta u sistemu kvaliteta. Gemba Kaizen pokazuje da kontinuirano unapređenje nije moguće bez aktivnog učešća menadžmenta u procesima, ali ni bez uključivanja zaposlenih koji u tim procesima učestvuju. Upravo ta interakcija između menadžmenta, zaposlenih i procesa čini osnovu održivog unapređenja kvaliteta.

Još jedan važan element u okviru gemba-e, jeste „Gemba kuća“. Nju je u svojoj knjizi iz 1986. godine Imai prikazao, želeći da predstavi sve elemente i aktivnosti koji su uključeni u kompanijama koje proizvode kvalitetne proizvode ili usluge a koje se na vreme isporučuju zadovoljnim korisnicima po razumini cenama. Takođe, važno je napomenuti da se ti korisnici vraćaju i ostaju verni kompanijama. Grafički prikaz predstavljen je na narednoj slici.



Kuća gemba menadžmenta (Imai, 1986)

2.5. Organizacija radnog prostora – 5S

Organizacija radnog prostora predstavlja jedan od najkonkretnijih i najvidljivijih elemenata Kaizen pristupa. Upravo iz tog razloga, 5S metodologija se često smatra polaznom tačkom za uvođenje Kaizen filozofije u praksu. U suštini, 5S ne predstavlja samo tehniku uređenja prostora, već način

razmišljanja koji utiče na ponašanje zaposlenih, disciplinu u radu i odnos prema procesima. Drugim rečima, kroz uređen i organizovan radni prostor stvaraju se uslovi za kontinuirano unapređenje.

Pre svega, važno je istaći da 5S potiče iz japanske prakse i da je direktno povezan sa gamba pristupom, odnosno sa mestom gde se rad zaista odvija. Prema Imai-ju, gamba je prostor u kome se mogu uočiti stvarni problemi, ali i gde se mogu napraviti prvi koraci ka njihovom rešavanju (Imai, 2012). Upravo tu 5S dobija svoju punu ulogu, jer omogućava da se radno okruženje učini preglednim, bezbednim i funkcionalnim. To znači da se problemi ne skrivaju, već postaju vidljivi. Metodologija 5S obuhvata pet koraka: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu i Shitsuke. Iako se ovi pojmovi često prevode kao sortiranje, uređenje, čišćenje, standardizacija i disciplina, suština 5S pristupa nije samo u fizičkom uređenju prostora. Naprotiv, Imai naglašava da 5S predstavlja osnovu za razvoj discipline i odgovornosti zaposlenih, što je ključno za dugoročnu primenu Kaizen filozofije (Imai, 2012).

Prvi korak, Seiri, odnosi se na uklanjanje svega što nije neophodno za obavljanje posla. U praksi, to znači razdvajanje potrebnog od nepotrebnog i eliminisanje suvišnih predmeta koji opterećuju radni prostor. Ovaj korak je posebno značajan jer omogućava da se fokus usmeri na ono što je zaista važno za proces. Drugim rečima, manje nereda znači više jasnoće. Upravo iz tog razloga, Seiri se često posmatra kao prvi korak ka unapređenju procesa.

Drugi korak, Seiton, podrazumeva sistematično uređenje onoga što je ostalo nakon sortiranja. Cilj je da svaki predmet ima svoje mesto i da bude lako dostupan kada je potreban. U tom smislu, Seiton doprinosi smanjenju gubitaka vremena i nepotrebnih pokreta, što je jedan od osnovnih ciljeva Kaizen pristupa. U praksi, ovo može značiti jasno označavanje radnih zona, alata ili dokumentacije, čime se radni procesi čine efikasnijim i preglednijim (Imai, 2012).

Korak Seiso odnosi se na održavanje čistoće radnog prostora. Međutim, u Gamba Kaizen se naglašava da čišćenje nije samo pitanje higijene, već i način za otkrivanje problema. Čist radni prostor omogućava da se lakše uoče nepravilnosti, kvarovi ili odstupanja u procesu. To, zapravo, znači da Seiso doprinosi preventivnom pristupu i smanjenju mogućnosti za nastanak grešaka.

Naredni korak, Seiketsu, odnosi se na standardizaciju prethodna tri koraka. Upravo ovde se 5S direktno povezuje sa sistemima menadžmenta kvaliteta, kao što su TQM i ISO 9001. Standardizacija omogućava da se uređeni načini rada održe tokom vremena i da ne zavise od pojedinaca. U tom smislu, Seiketsu predstavlja važnu vezu između 5S metodologije i formalnih sistema kvaliteta, jer obezbeđuje doslednost i stabilnost procesa (Imai, 2012).

Poslednji korak, Shitsuke, odnosi se na razvoj discipline i navika koje omogućavaju da se 5S održi na dugi rok. Ovaj korak je, prema Imai-ju, i najzahtevniji, jer podrazumeva promenu ponašanja i načina razmišljanja zaposlenih (Imai, 2012). U suštini, bez Shitsuke-a, 5S ostaje kratkoročna inicijativa. Sa Shitsuke-om, on postaje deo organizacione kulture. Upravo tu se vidi jasna veza između 5S i Kaizen filozofije.

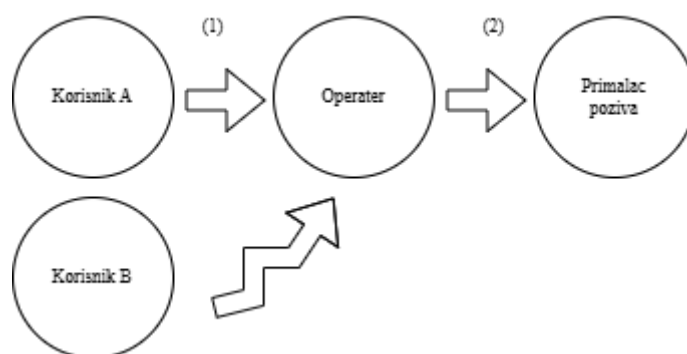
Pored toga, organizacija radnog prostora kroz 5S ima značajnu ulogu u kontekstu TQM-a. Istraživanja u oblasti menadžmenta kvaliteta ukazuju da uređeni i standardizovani procesi predstavljaju osnovu za efikasno merenje i unapređenje kvaliteta (Dewhurst, Martinez-Lorente & Dale, 1999). U tom smislu, 5S se može posmatrati kao praktičan alat koji omogućava primenu TQM principa na nivou svakodnevnog rada.

Iz navedenog proizilazi da 5S nije samo tehnika uređenja radnog prostora, već važan element Kaizen pristupa koji povezuje gamba, menadžment i sisteme kvaliteta. Upravo kroz 5S organizacije stvaraju osnovu za kontinuirano unapređenje, jer uređen prostor omogućava uočavanje problema, primenu standarda i razvoj discipline u radu. To, zapravo, znači da bez 5S nije moguće govoriti o stabilnoj i održivoj primeni Kaizen filozofije u praksi.

2.6. Prikaz Kaizen studije

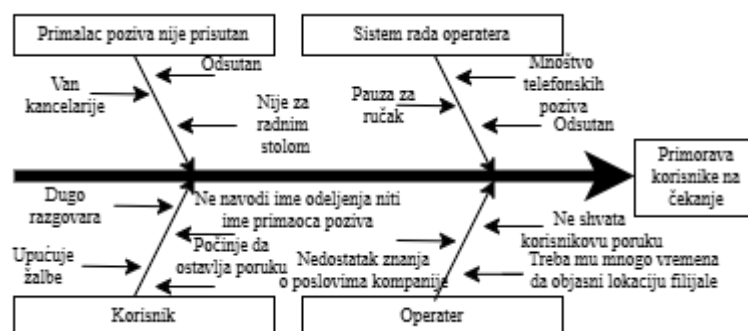
Da bi se Kaizen pristup što bolje razumeo u praksi, korisno je prikazati konkretan primer njegove primene. Jedna od često navođenih i veoma ilustrativnih studija slučaja opisana je u knjizi Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success i odnosi se na skraćivanje vremena čekanja korisnika prilikom telefonskog kontakta sa bankom (Imai, 1986). Ova studija je posebno značajna jer na jednostavan način pokazuje kako Kaizen funkcioniše u realnom poslovnom okruženju i kako se primenjuje kroz male, ali sistematične korake.

Problem koji je inicirao Kaizen aktivnosti u ovoj studiji odnosio se na rad telefonske recepcije u glavnoj kancelariji velike banke. Kancelarija je primala u proseku oko 500 korisničkih poziva dnevno, a interna analiza je pokazala da su korisnici postajali nervozni ukoliko je telefon zvonio više od pet puta pre nego što bi se neko javio. U takvim situacijama, deo korisnika je čak odustajao od daljeg pozivanja. Istraživanja su takođe ukazala da brz odgovor, nakon jednog ili dva zvona, značajno utiče na smirivanje korisnika i na njihovu spremnost za saradnju tokom razgovora. Upravo iz tog razloga, telefonska recepcija je prepoznata kao kritična tačka u procesu komunikacije sa korisnicima i kao pogodna tema za Kaizen projekat. Nakon izbora teme, zaposleni su pristupili analizi postojećeg stanja, oslanjajući se na princip gemba, odnosno posmatranje stvarnog mesta gde se problem javlja. Analizirane su tipične situacije u kojima korisnici moraju da čekaju, kao što su slučajevi kada operator već razgovara sa jednim korisnikom dok u isto vreme pristiže novi poziv, ili kada poziv ne može odmah da bude prosleđen odgovarajućem primaocu. Ovakve situacije su grafički prikazane kroz šemu toka poziva, koja jasno pokazuje zašto dolazi do čekanja.



„Zašto korisnici moraju da čekaju“ (Imai, 1986)

Kako bi se dublje razumeli uzroci problema, formiran je QC krug koji je sproveo analizu uzroka korišćenjem brainstorming tehnike i Ishikawa dijagrama. Identifikovani su različiti potencijalni uzroci čekanja, koji su se odnosili na korisnike, operatore, organizaciju rada i sam sistem telefonske recepcije. Ova analiza je omogućila da se problem sagleda sistemski, a ne samo sa jedne strane.

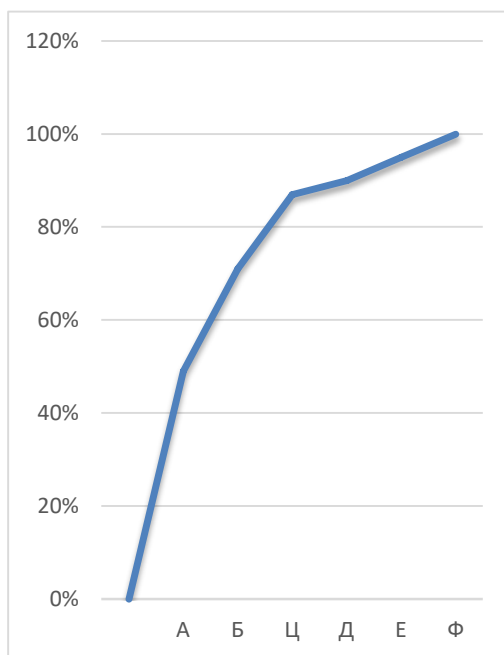


Ishikawa dijagram („Zašto su korisnici primorani da čekaju“) (Imai, 1986)

Naredni korak u Kaizen pristupu podrazumevao je prikupljanje konkretnih podataka. Zaposleni su tokom dvanaest dana popunjavali kontrolne obrasce u kojima su beleženi pozivi koji su čekali više od pet zvana, kao i razlozi zbog kojih do čekanja dolazi. Analiza prikupljenih podataka pokazala je da je jedan uzrok značajno dominirao u odnosu na ostale, a to je situacija u kojoj je samo jedan operator bio prisutan na radnom mestu, dok je drugi bio van kancelarije. Ovaj uzrok je zabeležen čak 172 puta, što ga je izdvojilo kao kritičan faktor koji najviše doprinosi problemu čekanja korisnika.

Razlozi zašto korisnici moraju da čekaju (Imai, 1986)

	Razlozi zašto korisnici moraju da čekaju	Dnevni prosek	Ukupan broj
A	Jedan operator (kolega van kancelarije)	14,3	172
B	Primalac poziva nije prisutan	6,1	73
C	U odeljenju nema operatera koji bi primio poziv	5,1	61
D	Korisnik nije naveo odeljenje ni ime primaoca poziva	1,6	19
E	Pitanje o lokaciji filijale	1,3	16
F	Ostali razlozi	0,8	10
Ukupno		29,2	351
Period: 12 dana, od 4. do 16.6.1980			



Razlozi zašto korisnici moraju da čekaju - Pareto dijagram (Imai, 1986)

Na osnovu dobijenih rezultata, definisan je jasan i merljiv cilj Kaizen aktivnosti, a to je da se vreme čekanja korisnika svede na nulu, odnosno da se na sve dolazne pozive odgovara što je brže moguće, bez izazivanja neprijatnosti kod korisnika. Ovaj cilj je formulisan jednostavno i razumljivo, što je u skladu sa Kaizen filozofijom i njenim fokusom na praktična poboljšanja.

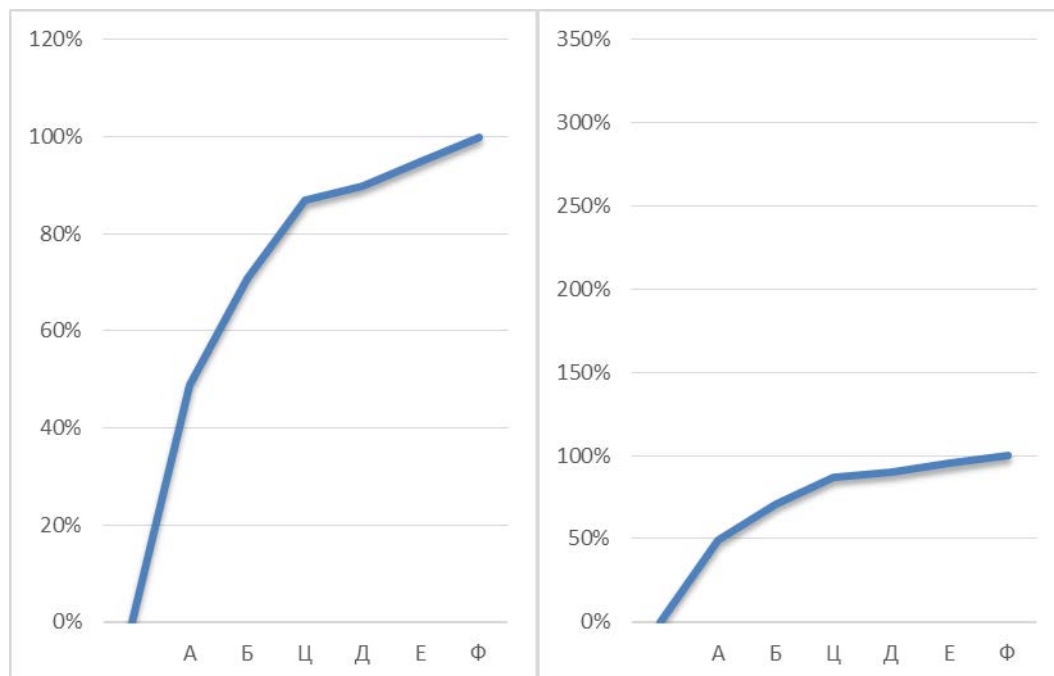
U skladu sa postavljenim ciljem, uvedene su mere koje nisu zahtevale velike investicije, već su se zasnivale na boljoj organizaciji rada. Pre svega, promenjen je sistem pauza za ručak tako da u svakom trenutku na radnom mestu budu prisutna najmanje dva operatera. Pored toga, uvedeno je

pravilo da svi zaposleni ostavljaju poruku ukoliko napuste radno mesto, kako bi operatori znali gde da proslede poziv. Takođe je sastavljen imenik zaposlenih sa preciznim opisom poslova koje obavljaju, što je olakšalo operatorima da brže i tačnije usmeravaju dolazne pozive. Ove mere predstavljaju tipičan primer Kaizen pristupa, gde se kroz male i konkretne promene postižu značajna poboljšanja.

Nakon primene predloženih mera, izvršeno je ponovno merenje rezultata. Podaci su pokazali značajno smanjenje broja poziva koji su čekali, pri čemu je dominantni uzrok čekanja gotovo eliminisan. Iako čekanje nije u potpunosti svedeno na nulu, postignuto je jasno i merljivo poboljšanje u odnosu na početno stanje.

QC efekti (poređenje pre i posle QC) (Imai, 1986)

	Razlozi zašto korisnici moraju da čekaju	Dnevni prosek Pre Posle	Ukupan broj Pre Posle
A	Jedan operater (kolega van kancelarije)	14,3 1,1	172 15
B	Primalac poziva nije prisutan	6,1 1,4	73 17
C	U odeljenju nema operatera koji bi primio poziv	5,1 1,7	61 20
D	Korisnik nije naveo odeljenje ni ime primaoca poziva	1,6 0,3	19 4
E	Pitanje o lokaciji filijale	1,3 0,2	16 3
F	Ostali razlozi	0,8 0	10 0
Ukupno		29,2 4,8	351 59
Period: 12 dana, od 17. do 30.10.1980			



QC efekti – Pareto dijagram (Imai, 1986)

Ova studija slučaja jasno pokazuje kako Kaizen izgleda u praksi i kako se primenjuje u okviru konkretnog projekta. Problem se identifikuje na mestu gde nastaje, analizira se uz pomoć jednostavnih alata, donose se mere koje su izvodljive i ekonomične, a zatim se njihovi efekti proveravaju kroz ponovno merenje. Upravo ovakvim pristupom Kaizen omogućava kontinuirano unapređenje procesa

i poboljšanje kvaliteta usluga, što ga čini primenljivim i razumljivim i van proizvodnih sistema, uključujući uslužne i IT orijentisane organizacije.

3. IT resursi kao podrška Kaizen pristupu

Do sada je Kaizen posmatran pre svega kao filozofija i način razmišljanja koji se zasniva na kontinuiranom unapređenju, uključivanju zaposlenih i postepenim promenama. Međutim, u savremenim organizacijama postavlja se pitanje na koji način se ovakav pristup može održati u praksi, naročito u uslovima složenih procesa i velikog obima podataka. Upravo tu se prirodno otvara prostor za ulogu informacionih tehnologija. Drugim rečima, Kaizen i IT se u praksi sve češće susreću. Važno je odmah naglasiti da Kaizen nije nastao kao tehnološki koncept. Naprotiv, u svojoj izvornoj formi on se oslanjao na jednostavne alate kao što su na primer neposredno posmatranje procesa i aktivno učešće ljudi u unapređenju rada. Međutim, to ne znači da je ovaj pristup nekompatibilan sa savremenim informacionim sistemima. U suštini, može se reći da IT resursi danas imaju ulogu podrške, to jest pomažu da se Kaizen principi doslednije primenjuju i lakše prate tokom vremena.

U literaturi se neretko ukazuje na povezanost Total Quality Management koncepta i informacionih tehnologija. Autori ističu da IT sistemi omogućavaju bolje prikupljanje i analizu podataka, što je posebno značajno kada je potrebno doneti važne odluke, a koje se prethodno oslanjaju na činjenice (Dewhurst, Martinez-Lorente & Dale, 1999). U praksi, to znači da se problemi ne prepoznaju samo na osnovu utiska ili iskustva, već na osnovu konkretnih pokazatelja i merenja.

Pored toga, pojedini autori ukazuju na to da informacione tehnologije mogu olakšati povezivanje strateških ciljeva kvaliteta sa svakodnevnim operativnim aktivnostima (Gunasekaran, Arunachalam & Arunachalam, 2009). Drugim rečima, IT rešenja mogu pomoći da inicijative kontinuiranog unapređenja ne ostanu samo na nivou pojedinačnih ideja, već da se sistematski prate, evidentiraju i unapređuju. Ovo je posebno važno u organizacijama u kojima se istovremeno realizuje veći broj procesa ili projekata. Takođe, ne treba zanemariti činjenicu da savremene organizacije sve češće funkcionišu u digitalnom okruženju, gde se veliki deo poslovanja oslanja na softverske sisteme. U tom kontekstu, primena Kaizen pristupa bez ikakve IT podrške postaje sve teža. Radovi koji se bave primenom TQM-a u razvoju softvera ukazuju na to da je upravo IT podrška neophodna kako bi se obezbedilo kontinuirano praćenje kvaliteta i dosledna primena definisanih procedura (Sahu & Sahu, 2018). To, zapravo, znači da IT resursi postaju sastavni deo sistema menadžmenta kvaliteta.

Ipak, važno je naglasiti da uvođenje IT alata samo po sebi ne znači automatski i uspešnu primenu Kaizen pristupa. S druge strane, tehnologija može predstavljati snažan oslonac ukoliko se koristi u skladu sa principima kontinuiranog unapređenja.

Iz navedenog proizilazi da uloga informacionih tehnologija u Kaizen pristupu nije univerzalna i jednoznačna, već zavisi od načina njihove primene. U osnovi, može se svesti na to da IT resursi pružaju infrastrukturu koja omogućava lakše sprovođenje aktivnosti kontinuiranog unapređenja. Upravo zbog toga, u nastavku rada biće razmatrane različite kategorije IT alata koje se u praksi najčešće koriste kao podrška Kaizen pristupu, kao što su BPM alati, QMS softveri, task & workflow alati, data & BI rešenja i kolaboracioni alati.

3.1. BPM alati kao podrška Kaizen pristupu

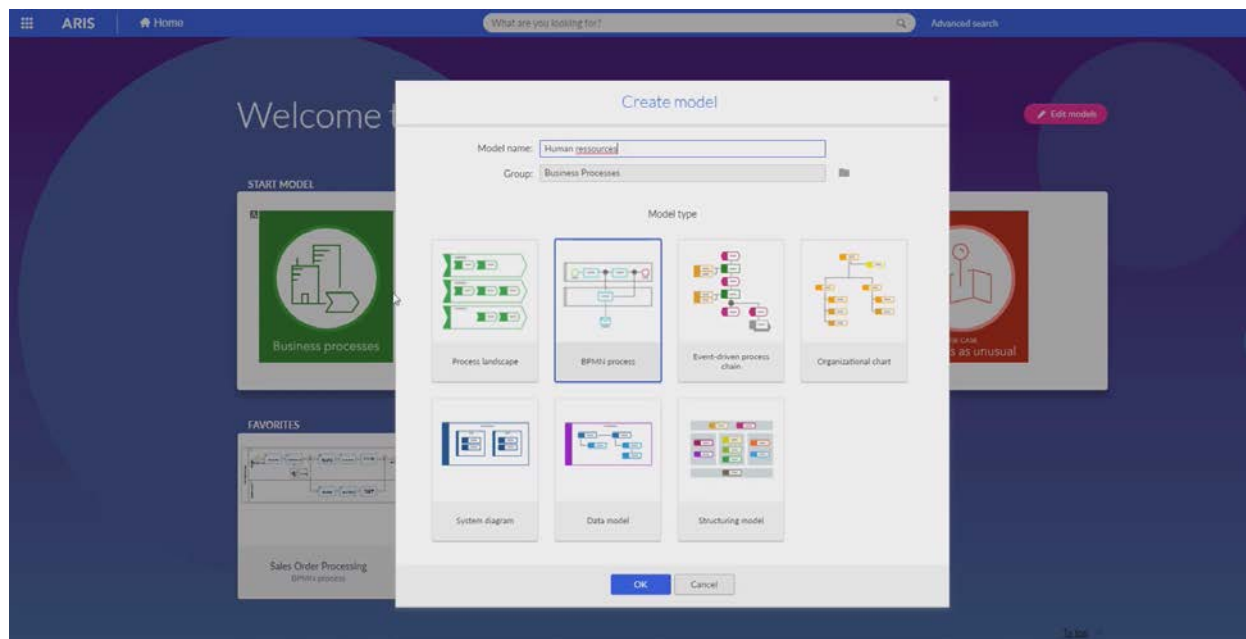
U kontekstu primene Kaizen pristupa, upravljanje procesima predstavlja jedan od ključnih elemenata kontinuiranog unapređenja. Kaizen polazi od pretpostavke da se rezultati poboljšavaju onda kada se poboljšavaju procesi koji do tih rezultata dovode. Upravo iz tog razloga, alati za business process management (BPM) imaju značajnu ulogu u savremenoj primeni Kaizen filozofije. Tako, ako želimo da nešto unapredimo, moramo prvo da razumemo kako taj proces zaista izgleda. Potrebno je

da razumemo sve podprocese kao i šta se dešava ukoliko naiđemo na nepovoljan ishod neke od mogućih situacija.

BPM alati se u osnovi koriste za modelovanje, analizu i unapređenje poslovnih procesa. Oni omogućavaju da se procesi vizuelno prikažu, što olakšava njihovo razumevanje i identifikaciju problema (Scheer & Nüttgens, 2002). U praksi, ovo je posebno važno jer zaposleni često imaju različitu percepciju toga kako proces funkcioniše. Kroz BPM alate, ti različiti pogledi se „stavljaju na papir“, odnosno u dijagram, što omogućava zajedničku analizu i diskusiju. Upravo tu se vidi snažna veza između BPM pristupa i Kaizen principa.

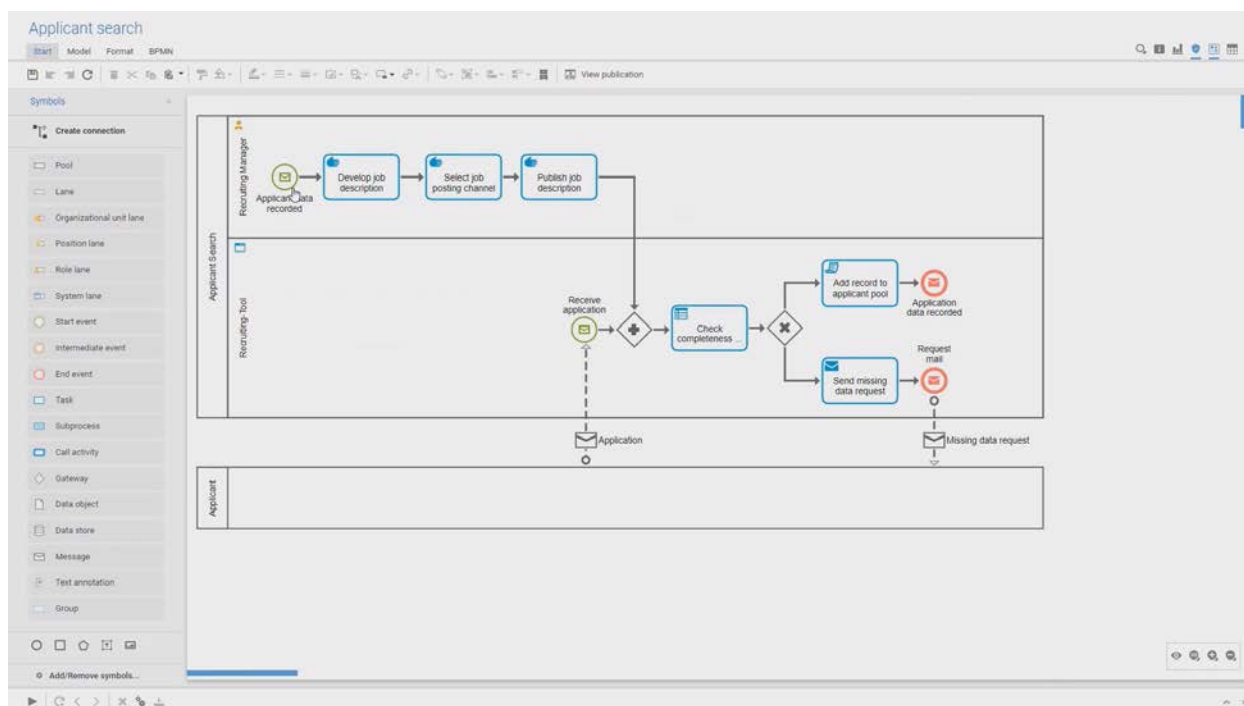
Jedan od često korišćenih BPM alata u praksi je ARIS, odnosno njegova besplatna verzija ARIS Express. Ovaj alat omogućava modeliranje poslovnih procesa kroz različite tipove dijagrama, pri čemu je posebno zastupljeno procesno mapiranje. U tom smislu, ARIS Express omogućava organizacijama da dokumentuju postojeće procese i da identifikuju mesta na kojima dolazi do zastoja, nepotrebnih aktivnosti ili gubitaka. Drugim rečima, alat pomaže da se procesi učine vidljivim, što je jedan od osnovnih preduslova za njihovo unapređenje (ARIS Community, 2026). Na narednim slikama, prikazan je interfejs aplikacije na primeru rada sektora za ljudske resurse.

Slika ispod pokazuje kako se kreira nov dokument u okviru kog će se analizirati proces, u ovom slučaju rada sektora za ljudske resurse.



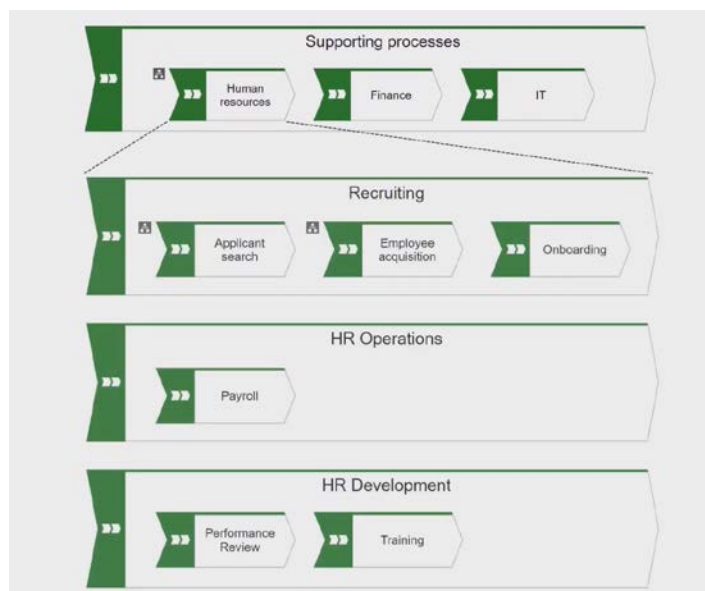
Kreiranje novog procesa (ARIS Community, 2026)

Na narednoj slici je prikazan primer BPMN dijagrama koji opisuje proces obrade prijave kandidata za posao. Proces je vizuelno podeljen po ulogama (lane), što omogućava jasan uvid u odgovornosti različitih učesnika u procesu. Dijagram prikazuje korake od kreiranja i objavljivanja oglasa za posao, preko prijema prijave, provere njene kompletnosti, pa sve do evidentiranja podataka ili slanja zahteva za dopunu nedostajućih informacija. Ovakva vizuelizacija procesa omogućava lakše razumevanje toka aktivnosti, uočavanje potencijalnih problema i predstavlja dobru osnovu za analizu i unapređenje procesa u skladu sa Kaizen principima.



BMP model (ARIS Community, 2026)

Sledeća slika pokazuje primer procesne arhitekture kreirane u alatu ARIS. Dijagram prikazuje hijerarhijsku strukturu procesa u oblasti upravljanja ljudskim resursima, sa jasnim razdvajanjem podržavajućih procesa, procesa regrutovanja i aktivnosti vezanih za razvoj zaposlenih. Ovakva vizuelizacija omogućava lakše razumevanje povezanosti procesa i predstavlja osnovu za analizu i unapređenje procesa.

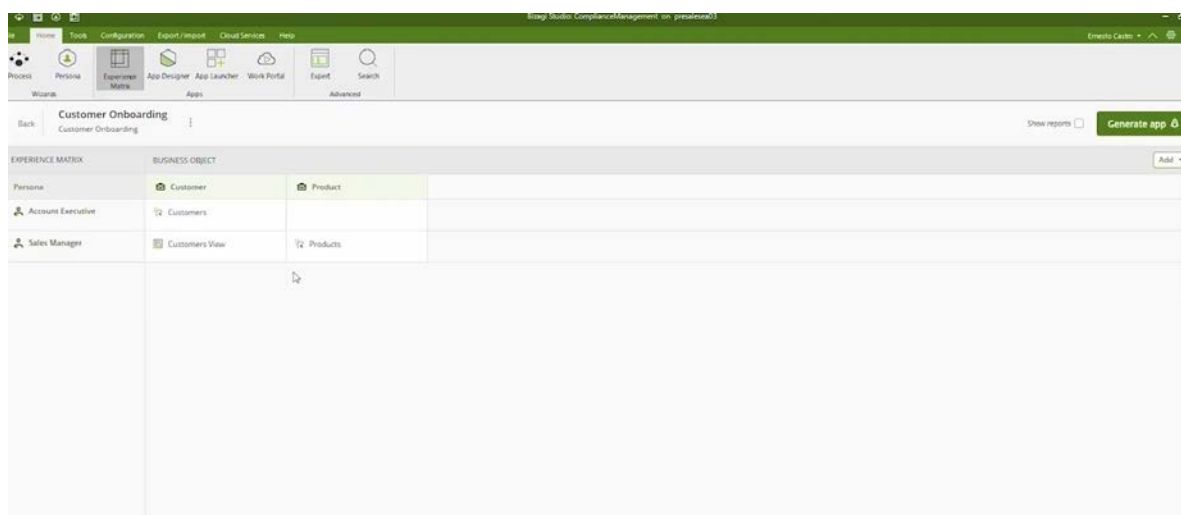


Procesna arhitektura (ARIS Community, 2026)

Sličnu ulogu ima i BPM alat Bizagi, koji se široko koristi za modelovanje i optimizaciju poslovnih procesa. Bizagi omogućava kreiranje procesnih dijagrama na osnovu BPMN standarda, što doprinosi jasnoći i standardizaciji prikaza procesa. U kontekstu Kaizen pristupa, ovo je posebno značajno jer omogućava da se procesi analiziraju korak po korak i da se uoče mogućnosti za mala, inkrementalna poboljšanja. U praksi, to znači da se Kaizen aktivnosti mogu direktno povezati sa konkretnim fazama procesa (Bizagi, 2026). Važno je naglasiti da BPM alati sami po sebi ne uvode poboljšanja.

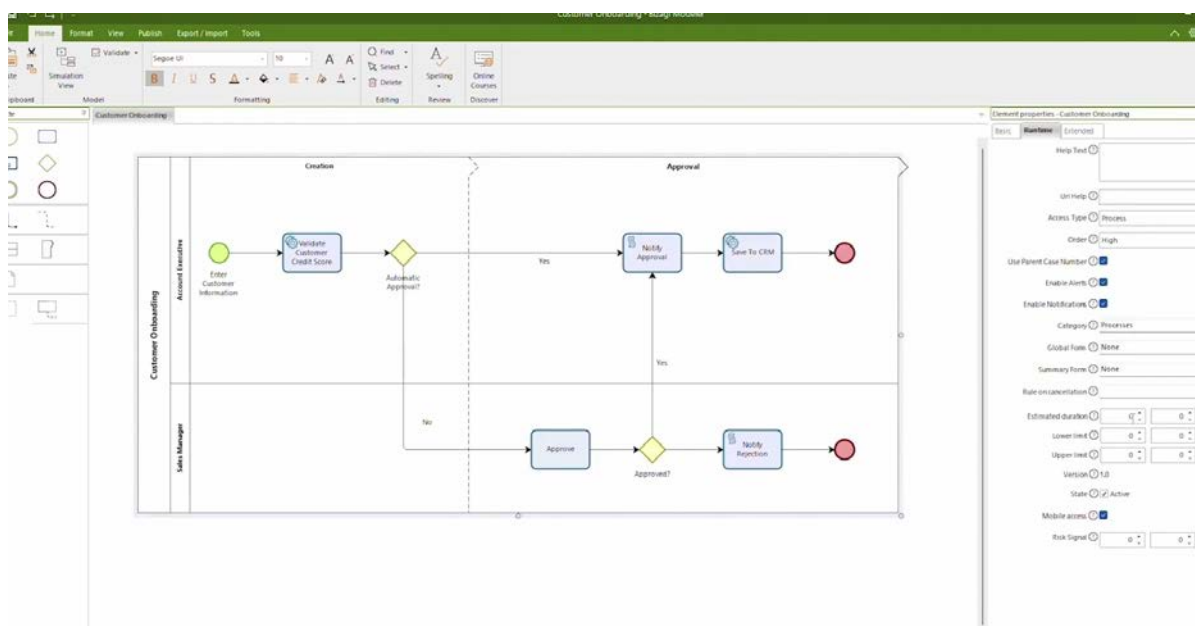
Oni ne „popravljaju“ procese automatski. Međutim, oni pružaju strukturu i osnovu za sistematično razmatranje načina rada. Upravo iz tog razloga, BPM alati se dobro uklapaju u Kaizen filozofiju, koja naglašava postepeno i kontinuirano unapređenje. Kada su procesi jasno definisani i vizuelno predstavljeni, zaposleni lakše uočavaju probleme i mogu da predlože konkretne izmene.

Slika ispod prikazuje primer modelovanja procesa u alatu Bizagi, koji se koristi za analizu i upravljanje poslovnim procesima. Prikaz ilustruje povezivanje procesa sa konkretnim ulogama (persona) i poslovnim objektima, što omogućava jasno definisanje odgovornosti i tokova rada. Ovakva struktura olakšava uočavanje potencijalnih problema u procesu i predstavlja osnovu za njegovo unapređenje u skladu sa Kaizen principima kontinuiranog poboljšanja.



Primer modelovanja poslovnog procesa u alatu Bizagi (Bizagi, 2026)

Na narednoj slici je prikazan BPMN dijagram procesa Customer Onboarding. Dijagram ilustruje tok aktivnosti od unosa podataka o klijentu, preko automatske ili ručne provere i odobrenja, do konačne odluke i čuvanja podataka u CRM sistemu. Proces je podeljen po ulogama (Account Executive i Sales Manager), što omogućava jasnu vizuelnu raspodelu odgovornosti i transparentnost tokom izvršavanja procesa. Ovakav način modelovanja takođe pomaže pri analizi, standardizaciji i kontinuiranom unapređenju procesa.



BPMN model procesa u alatu Bizagi (Bizagi, 2026)

BPM alati omogućavaju lakšu standardizaciju procesa nakon uvođenja poboljšanja. Jednom kada se neka promena pokaže kao uspešna, ona se može formalizovati kroz ažuriranje procesnih modela. Ovo je u skladu sa Kaizen principom da se nakon poboljšanja uspostavi novi standard, koji služi kao polazna osnova za naredni ciklus unapređenja. Drugim rečima, BPM alati podržavaju kontinuitet poboljšanja, a ne samo pojedinačne inicijative. Nije zanemarljivo to što BPM alati takođe olakšavaju komunikaciju između različitih organizacionih jedinica. Kroz zajedničke procesne modele, različiti timovi mogu bolje da razumeju svoju ulogu u ukupnom procesu, kao i uticaj koji njihov rad ima na druge delove organizacije. Ovo je posebno važno u Kaizen pristupu, koji naglašava saradnju i uključivanje zaposlenih u unapređenje procesa.

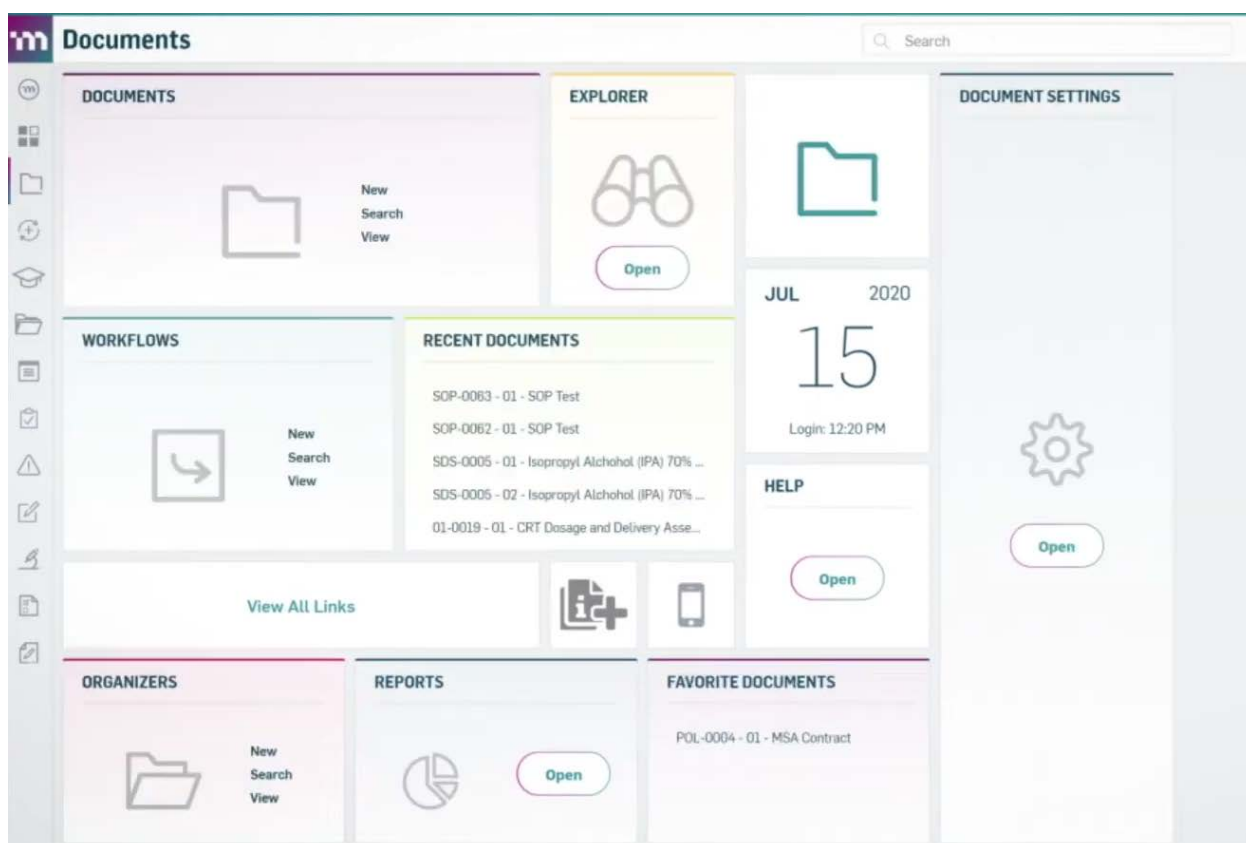
3.2. QMS softverska rešenja

U okviru primene Kaizen pristupa, posebno mesto zauzimaju softverska rešenja za upravljanje kvalitetom, odnosno quality management system (QMS) softveri. Za razliku od BPM alata, koji su pre svega usmereni na mapiranje i analizu procesa, QMS softveri imaju širu ulogu i obuhvataju celokupan sistem upravljanja kvalitetom u organizaciji. Oni predstavljaju infrastrukturu koja omogućava da se aktivnosti kontinuiranog unapređenja sprovedu na sistematičan i kontrolisan način (Bacoup et al., 2018).

Jedan od najpoznatijih primera ovakvih rešenja je MasterControl, koji se u praksi koristi za podršku upravljanju dokumentacijom, procesima, rizicima, nesaglasnostima i aktivnostima poboljšanja. Osnovna ideja ovog softvera jeste da se svi elementi sistema kvaliteta objedine u jedinstvenu platformu, što olakšava njihovo praćenje i međusobno povezivanje (MasterControl, 2026). U tom smislu, QMS softver ne predstavlja samo alat za „čuvanje dokumenata“, već sredstvo za upravljanje celokupnim ciklusom kvaliteta.

Kada se posmatra iz ugla Kaizen pristupa, jedna od najvažnijih funkcija QMS softvera odnosi se na upravljanje dokumentacijom i standardima. Kaizen naglašava da poboljšanje nije održivo ukoliko se nakon uvođenja promena ne uspostavi novi standard. Upravo tu QMS softveri imaju značajnu ulogu, jer omogućavaju da se procedure, uputstva i radni standardi lako ažuriraju i učine dostupnim zaposlenima. U praksi, to znači da se svaka promena nastala kao rezultat Kaizen aktivnosti može formalno dokumentovati i integrisati u sistem kvaliteta. Pored toga, QMS softveri podržavaju upravljanje nesaglasnostima, korektivnim i preventivnim merama, što je direktno povezano sa logikom kontinuiranog unapređenja (Bacoup et al., 2018). Kada se uoči problem ili odstupanje od definisanog standarda, on se evidentira u sistemu, analizira se njegov uzrok i definišu se mere za njegovo otklanjanje. Ovaj način rada u velikoj meri podseća na PDCA ciklus, gde se nakon planiranja i primene mera vrši provera rezultata i, ukoliko je potrebno, uvode dodatna poboljšanja. Drugim rečima, QMS softver omogućava da Kaizen aktivnosti ne ostanu na nivou neformalnih inicijativa, već da se prate kroz strukturiran proces.

Na slici ispod je prikazan početni korisnički interfejs QMS softverskog rešenja MasterControl. Interfejs je organizovan kroz jasno definisane celine, kao što su upravljanje dokumentima, radni tokovi (workflows), izveštaji i praćenje nedavnih aktivnosti. Ovakva struktura omogućava lak pristup relevantnim informacijama, bolju kontrolu verzija dokumenata i podršku kontinuiranom unapređenju procesa u skladu sa Kaizen pristupom. Pored prikazanih osnovnih modula, MasterControl nudi i napredne mogućnosti automatizacije procesa kvaliteta, kao što su upravljanje radnim tokovima odobravanja, praćenje izmena dokumenata i evidentiranje aktivnosti korisnika. Sistem omogućava jasnu kontrolu verzija i definisanje uloga i ovlašćenja, čime se obezbeđuje dosledna primena procedura i smanjuje rizik od neusaglašenosti (MasterControl, 2026).



Početni interfejs MasterControl (MasterControl, 2026)

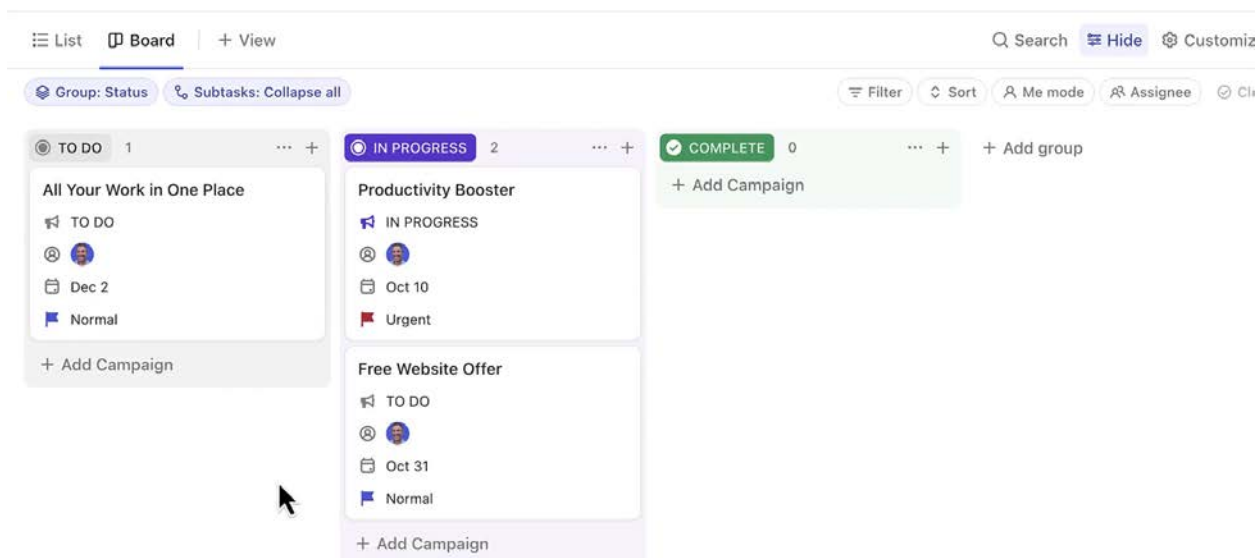
3.3. Task & Workflow alati – upravljanje zadacima i troškovima rada

U Kaizen pristupu, kontinuirano unapređenje ne podrazumeva samo promenu velikih strategija ili restrukturiranje organizacione strukture. U praksi, često se radi o tome kako se upravlja svakodnevnim zadacima, kako se koordinira timski rad i kako se prati napredak aktivnosti. Upravo tu na scenu stupaju task & workflow alati. Oni nisu samo „sistemi za postavljanje zadataka“, već predstavljaju način organizovanja i praćenja rada koji direktno podržava Kaizen razmišljanje: mali koraci, učenje kroz iskustvo i vidljiv napredak. Jednostavno rečeno, task & workflow alat omogućava da sve ideje, zadaci i aktivnosti budu na jednom mestu. Sada se informacije koje su se ranije pamtile beleže, prate, ažuriraju i analiziraju. A to znači da se informacije ne gube, da svako zna šta je njegova uloga i da se troškovi rada mogu pratiti i meriti.

Jedan od najpoznatijih alata ovog tipa je ClickUp. Ova platforma omogućava korisnicima da kreiraju, dodeljuju i prate zadatke u realnom vremenu. Naravno, ClickUp nije jedini alat, ali je dobar primer kako savremeni workflow sistem funkcioniše u praksi. U suštini, on povezuje ljude, procese i aktivnosti na jedan intuitivan način.

Kada se razmatra ClickUp u kontekstu Kaizen pristupa, treba reći da on ne donosi sam po sebi poboljšanja. Međutim, on omogućava da se poboljšanja vide, prate i izmere. U praksi to izgleda ovako: neka grupa zaposlenih otkrije da na određenom koraku procesa dolazi do kašnjenja. Umesto da se priča o problemu „na verbalnom sastanku“, taj zadatak ili problem se unosi u ClickUp kao stavka. Potom se definišu koraci za rešavanje, dodeljuju se osobama zaduženim za te korake, i prati se tačno vreme koje je potrošeno u svakom delu.

U tom smislu, ClickUp omogućava i jednostavnu workflow vizuelizaciju, odnosno prikaz toka zadataka. Naredna slika vizuelno prikazuje deo alata pomoću kog je vizuelno moguće pratiti napredak zadataka.



Interfejs aplikacije ClickUp (ClickUp, 2026)

Pored toga, ClickUp omogućava praćenje vremena i troškova povezanih sa zadacima. Ovo je posebno korisno kada se pokušava izmeriti koliko je neka aktivnost uticala na ukupnu efikasnost ili na troškove rada. Jednostavno rečeno, ako smo uradili jednu malu promenu u procesu, onda želimo i da vidimo šta se desilo, da li je vreme potrebno za određeni zadatak potencijalno smanjeno, ili je neki drugi deo procesa postao spor. Pored ovih funkcionalnosti, ClickUp omogućava i saradnju između timova i članova. Često se dešava da inicijativa za poboljšanje ne pripada samo jednoj osobi. Naprotiv, to je timski rad. U takvim situacijama, mogućnost da se komentariše, da se deli napredak i da se svi međusobno obaveštavaju kroz jedan alat čini komunikaciju efikasnijom. Dakle, umesto da se informacije razmenjuju preko mailova ili telefona, sve što je vezano za jednu inicijativu je unutar jednog sistema.

Međutim, vredi istaći da kao i svaki alat, ClickUp ima svoje granice. On ne zamenjuje kulturu unapređenja niti ne garantuje da će poboljšanja biti trajna. Ali, u kombinaciji sa Kaizen pristupom, on može da bude snažna podrška.

3.4. Data & BI alati kao pomoć u obradi podataka

Kada se govori o Kaizen pristupu, često se govori o tome kako bolje razumeti procese. Ali jedna stvar koja se ponekad previdno spominje, a koja je u praksi vrlo važna, jeste kako merimo i analiziramo te procese. Jer, ako nešto ne možemo da izmerimo, jednostavno ne znamo da li je unapređenje zaista donijelo neku korist. U tom smislu, data & business intelligence (analitički) alati dobijaju posebnu ulogu.

U suštini, data & BI alati omogućavaju da se podaci sakupe, obrade i vizuelno prikažu na način koji je razumljiv, lak za praćenje i koristan za donošenje odluka. Drugim rečima, oni pomažu da se podaci „prevedu“ u informacije, a informacije u znanje. Upravo tu se ova klasa alata povezuje sa Kaizen pristupom, jer Kaizen u osnovi insistira na donošenju odluka na osnovu činjenica i podataka, a ne samo na osnovu intuicije ili iskustva.

Jedan od najpoznatijih alata u ovoj kategoriji je Power BI. Ovo je softver koji omogućava organizacijama da vizualizuju podatke na različite načine: grafikoni, tabele, interaktivni paneli, i još

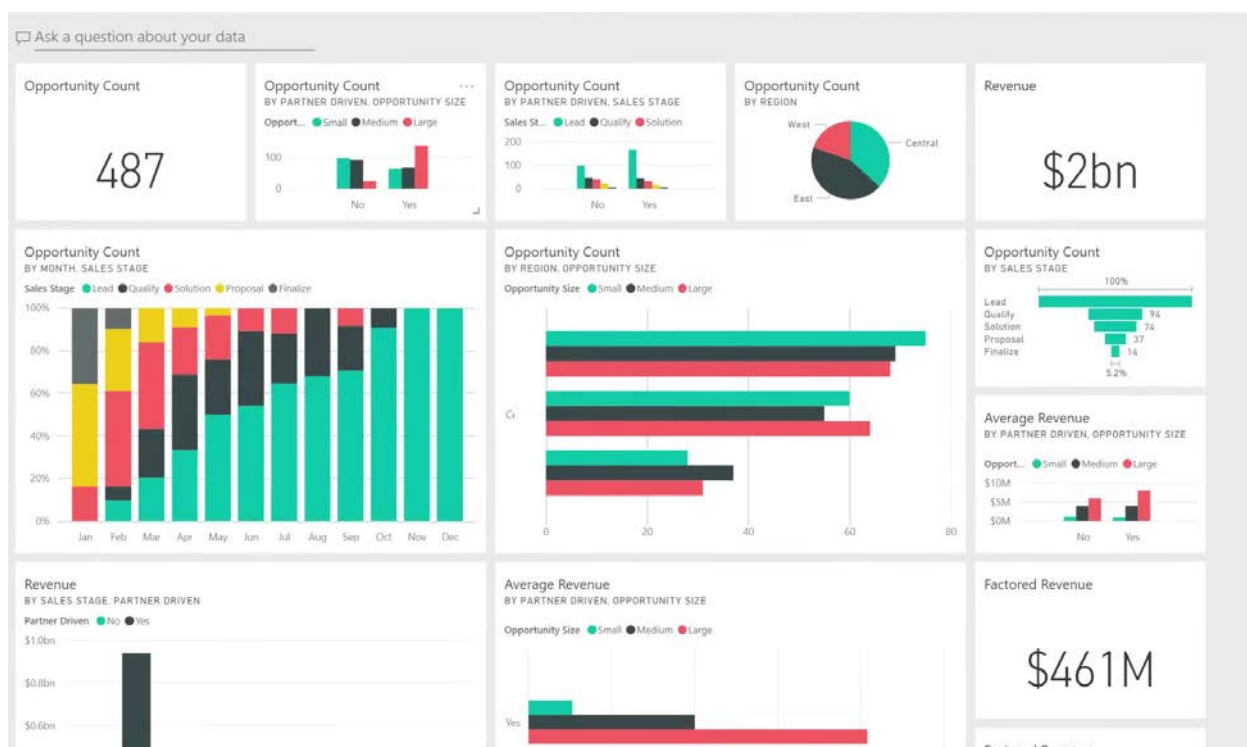
mного toga. Često se koristi za praćenje ključnih pokazatelja, trendova i relevantnih metrika. U suštini, Power BI pretvara veliki broj podataka u nešto što može da se „pročita“ na prvi pogled. U praksi, ovaj alat se povezuje sa brojnim izvorima podataka, baze, Excel fajlovi, sistemi za praćenje procesa, QMS sistemi, BPM alati i drugi. To znači da se različiti podaci mogu integrisati na jedno mesto i analizirati zajedno. Na taj način, dobijamo holistički pogled na stanje u organizaciji. Jednostavnije rečeno, ako postoji mnogo različitih informacija o procesima, Power BI može da ih „složi“ i prikaže tako da slika bude jasna.

Power BI nije samo alat za vizuelizaciju. On ima i mogućnosti za dublju analizu podataka, kao što su filtriranje, agregiranje, trend analize i pravljenje interaktivnih tabloida. Ovo može biti posebno korisno kada je reč o većim organizacijama ili složenijim procesima, gde jednostavni grafikoni nisu dovoljni da se ukaže na koren problema. Sa Power BI-om, analitičar ili tim može da uradi drill-down analizu i da vidi koje tačno delove procesa treba unaprediti.

Pored toga, obzirom da je Power BI vezan za internet i klad servise, podaci mogu biti ažurni u realnom vremenu. To, u praksi, znači da se grafikoni ne osveže jednom dnevno ili nedeljno, već mogu da pokazuju tekuće stanje. Iako ovo nije preduslov za Kaizen, vredi istaći da takav pristup omogućava bržu reakciju. Bržu reakciju znači da organizacija može da odgovori na nove trendove, nove probleme ili promene u ponašanju potrošača bez odlaganja.

Ipak, vredi napomenuti da korišćenje Power BI-a zahteva i određeni nivo kompetencija. To nije instrument koji „sam po sebi“ rešava sve probleme. Međutim, kada se koristi u kombinaciji sa dobrim procesnim pristupom, kao što je Kaizen ili PDCA ciklus, može znatno olakšati praćenje, merenje i unapređenje kvaliteta.

Sljedeća slika prikazuje primer dashboard-a u Power BI alatu, koji omogućava vizuelni prikaz podataka kroz grafikone, indikatore i ključne pokazatelje performansi.



Dashboard u Power BI alatu (Microsoft, 2026)

Prikazani dashboard u Power BI alatu omogućava jasan i pregledan uvid u ključne pokazatelje poslovanja, kao što su broj prodajnih prilika, faze prodajnog procesa i ostvareni prihodi. Vizuelni

prikaz podataka kroz grafikone i dijagrame olakšava razumevanje rezultata i brzo uočavanje odstupanja. Ovakva prezentacija podataka podržava donošenje odluka zasnovanih na činjenicama i doprinosi unapređenju kvaliteta poslovnih procesa.

3.5. Kolaboracioni alati – timski rad i razmena znanja

Kontinuirano unapređenje, kao osnova Kaizen pristupa, u velikoj meri zavisi od ljudi i njihove međusobne saradnje. Iako su alati za upravljanje procesima, zadacima i podacima izuzetno važni, oni sami po sebi nisu dovoljni ukoliko ne postoji efikasna komunikacija između zaposlenih. Upravo iz tog razloga, kolaboracioni alati imaju posebnu ulogu u podršci Kaizen pristupu. Drugim rečima, ako ideje i informacije ne cirkulišu, teško je očekivati kontinuirano poboljšanje.

Kolaboracioni alati se koriste kako bi se olakšala razmena informacija, saradnja unutar timova i deljenje znanja na nivou cele organizacije. U praksi, oni predstavljaju prostor u kome zaposleni mogu da razmenjuju ideje, postavljaju pitanja, ukazuju na probleme i predlažu poboljšanja.

Jedan od najčešće korišćenih alata za timsku komunikaciju je Slack. Ova platforma omogućava komunikaciju kroz kanale koji mogu biti organizovani po timovima, projektima ili temama. U suštini, Slack omogućava da se komunikacija strukturiše, umesto da se odvija kroz nepovezane poruke i elektronsku poštu (Slack Technologies, 2026). Kada se Slack posmatra u kontekstu Kaizen pristupa, njegova najveća vrednost leži u podsticanju kontinuirane razmene informacija. Zaposleni mogu da koriste Slack kanale za prijavljivanje problema, diskusiju o mogućim poboljšanjima ili razmenu iskustava iz svakodnevnog rada. Ovakva komunikacija nije formalna, ali upravo zato može biti veoma efikasna. Ljudi su spremniji da podele ideju ili zapažanje u okruženju koje ne deluje strogo administrativno.

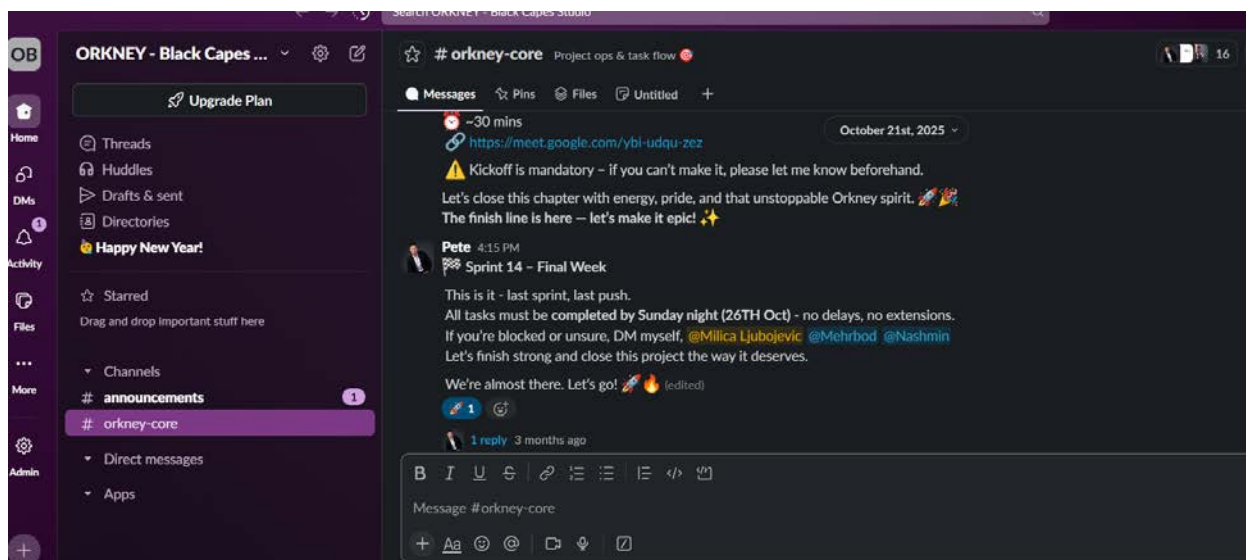
Brze povratne informacije su takođe elementi ovog softvera, što je posebno važno za Kaizen pristup. Umesto da se čeka sledeći sastanak ili formalni izveštaj, zaposleni mogu odmah da reaguju na problem ili da prokomentarišu predloženo poboljšanje.

Takođe, Slack može da posluži kao neformalna baza znanja. Kroz istoriju poruka, kanale i deljene fajlove, organizacija postepeno gradi arhivu iskustava, rešenja i diskusija. Ovakvi alati podržavaju jedan od ključnih aspekata unapređenja, a to je učenje na osnovu prethodnih iskustava.

Slack često funkcioniše u kombinaciji sa drugim IT alatima, kao što su task & workflow sistemi ili data & BI alati. Na primer, informacije o statusu zadataka ili rezultatima merenja mogu biti automatski deljene kroz Slack kanale.

Međutim, pri tome ne treba zanemariti da kolaboracioni alati, poput Slack-a, ne mogu zameniti kulturu kontinuiranog unapređenja. Oni predstavljaju sredstvo koje može da podrži Kaizen, ali ne i da ga samostalno implementira. Ukoliko zaposleni ne osećaju da su njihove ideje vredne ili da će biti saslušane, ni najbolji alat neće doneti željene rezultate.

Na narednoj slici, prikazan je kanal koji se koristi za timsku komunikaciju, koordinaciju zadataka i razmenu informacija u okviru projekta.



Primer kolaboracionog alata u projektnom radu

Prikazani kanal u Slack aplikaciji predstavlja sredstvo za timsku komunikaciju i saradnju u okviru projektnog tima. Slack omogućava razmenu poruka u realnom vremenu, deljenje datoteka, kao i pregled istorije komunikacije, što doprinosi boljoj koordinaciji i transparentnosti rada. Organizacija komunikacije po kanalima omogućava članovima tima da lakše prate zadatke i aktivnosti u okviru određenog projekta. Korišćenjem ovakvih digitalnih alata smanjuje se mogućnost nespornosti, ubrzava se donošenje odluka i unapređuje efikasnost timskog rada. Slack kao platforma podržava savremeni način upravljanja projektima i doprinosi unapređenju kvaliteta komunikacionih procesa u organizaciji.

4. Primena Kaizena uz IT podršku

Nakon što su u prethodnom poglavlju razmotreni različiti tipovi IT resursa koji mogu da podrže Kaizen pristup, prirodan nastavak analize odnosi se na pitanje kako ovaj pristup izgleda u praksi, odnosno kako se Kaizen zaista primenjuje sa i bez informacione podrške. Do sada je pokazano da Kaizen predstavlja filozofiju kontinuiranog unapređenja koja u svojoj osnovi ne zavisi od tehnologije, već od ljudi, procesa i načina razmišljanja. Međutim, u savremenim organizacijama, koje se oslanjaju na složene sisteme i veliki broj podataka, primena Kaizen pristupa sve češće podrazumeva i upotrebu različitih IT alata.

U suštini, Kaizen se može primenjivati i bez ikakve tehnološke podrške. Istorijski gledano, upravo je tako i nastao. Poboljšanja su se zasnivala na direktnom posmatranju procesa, razgovorima sa zaposlenima i jednostavnim alatima, kao što su papirni obrasci, tabele i ručne analize. Takav pristup i dalje ima svoju vrednost, posebno u manjim organizacijama ili u situacijama gde su procesi jednostavni. Ipak, pri tome ne treba zanemariti da se ovakva primena Kaizen-a u praksi često suočava sa određenim ograničenjima, kao što su otežano praćenje poboljšanja, nepotpuna dokumentacija i ograničena vidljivost rezultata.

Sa druge strane, uvođenjem IT podrške, Kaizen pristup dobija novu dimenziju. Informacioni sistemi omogućavaju da se aktivnosti kontinuiranog unapređenja sistematizuju, prate i analiziraju tokom vremena. Drugim rečima, tehnologija omogućava da Kaizen aktivnosti budu jasnije definisane, lakše dostupne i transparentnije za sve učesnike.

Važno je naglasiti da primena Kaizen-a uz IT podršku ne podrazumeva odbacivanje njegovih osnovnih principa. Naprotiv, tehnologija se koristi kao sredstvo koje pomaže da se ti principi doslednije sprovede. Kontinuirano unapređenje, uključivanje zaposlenih i donošenje odluka na osnovu činjenica ostaju u centru pristupa, s tim što se sada oslanjaju na digitalne alate koji olakšavaju njihovu primenu. U tom kontekstu, ovo poglavlje ima za cilj da prikaže razlike između primene Kaizen pristupa bez IT podrške i primene Kaizen-a uz upotrebu savremenih informacionih sistema. Kroz uporedni prikaz biće analizirano kako tehnologija utiče na uočavanje problema, dokumentaciju i praćenje poboljšanja, kao i koji se konkretni efekti i prednosti mogu ostvariti ukoliko se Kaizen primenjuje uz adekvatnu IT podršku.

4.1. Prikaz Kaizena bez IT podrške

Radi boljeg razumevanja primene Kaizen pristupa bez informacione podrške, u nastavku je dat ilustrativan primer iz prakse komunalnog preduzeća, na primeru vodovoda u manjoj lokalnoj sredini. Ovaj primer ne predstavlja formalno sprovedeno istraživanje, već služi kao opis tipične situacije u kojoj se Kaizen principi primenjuju spontano, bez upotrebe savremenih IT alata.

U posmatranom primeru, svakodnevni rad vodovoda zasniva se na direktnom izvršavanju operativnih zadataka, kao što su intervencije na mreži, otklanjanje kvarova i komunikacija sa korisnicima. Zaposleni na terenu, kao i u upravi, oslanjaju se pre svega na lično iskustvo i dugogodišnju praksu. Problemi se uočavaju neposredno, najčešće nakon prijava građana ili tokom redovnih obilazaka terena. Upravo tu se može prepoznati Kaizen princip posmatranja procesa na mestu gde nastaje problem, odnosno u gembai. Kada se uoči određeni problem, na primer česta pojava kvara na istoj deonici vodovodne mreže, zaposleni o tome razgovaraju na jutarnjim sastancima ili tokom neformalnih konsultacija. Na tim razgovorima se razmatraju mogući uzroci i predlažu jednostavna rešenja, kao što su promena načina intervencije, bolja organizacija smena ili drugačiji raspored ekipa na terenu. Ovaj način rada pokazuje da se kontinuirano unapređenje sprovodi kroz male, postepene promene, što je u suštini jedan od osnovnih principa Kaizen pristupa.

Međutim, u ovakvom sistemu ne postoji formalna IT podrška za praćenje problema i poboljšanja. Informacije o kvarovima, intervencijama i predloženim rešenjima najčešće se beleže ručno, u sveskama ili na papirnim obrascima. Neki podaci ostaju samo na nivou usmenog prenosa informacija. Zbog toga je teško sistematski pratiti koliko se često određeni problem javlja, da li su predložene mere donele poboljšanje i kakvi su dugoročni efekti donetih odluka.

Takođe, praćenje rezultata unapređenja zasniva se uglavnom na utisku zaposlenih. Na primer, nakon uvođenja novog načina rada, zaključak da je stanje „bolje nego ranije“ donosi se na osnovu manjeg broja pritužbi ili manjeg broja intervencija, ali bez jasno definisanih pokazatelja i podataka. Iako ovakav pristup može biti funkcionalan u kratkom roku, on otežava upoređivanje stanja pre i posle uvođenja poboljšanja. Dokumentacija u ovakvom sistemu je ograničena i često neujednačena. Procedure se ne ažuriraju redovno, a znanje se prenosi uglavnom usmeno, sa starijih na mlađe radnike. To znači da poboljšanja koja su postignuta u jednom periodu mogu vremenom biti zaboravljena ili primenjivana na različite načine. Upravo ovde se može uočiti jedno od glavnih ograničenja primene Kaizen pristupa bez IT podrške.

Ipak, važno je naglasiti da ovakav način rada jasno pokazuje da Kaizen nije nužno vezan za tehnologiju. Zaposleni u vodovodu, iako nesvesno, primenjuju osnovne Kaizen principe: uočavaju probleme na licu mesta, razgovaraju o uzrocima, uvode male promene i nastoje da poboljšaju način rada. Međutim, bez sistematične IT podrške, ova poboljšanja ostaju ograničena po obimu i teško merljiva.

4.2. Prikaz Kaizena sa IT podrškom

Za razliku od primera primene Kaizen pristupa bez informacione podrške, u savremenom radnom okruženju sve je češća situacija u kojoj se kontinuirano unapređenje sprovodi uz korišćenje različitih IT alata. Takav primer može se uočiti i u okviru radnog mesta na kome su za svakodnevnu komunikaciju i organizaciju rada korišćeni alati kao što su Slack i ClickUp. Iako Kaizen kao filozofija nije formalno uveden kao zvaničan program, njegovi osnovni principi su u praksi bili jasno prisutni i podržani upravo kroz ove alate.

U ovakvom okruženju, uočavanje problema nije se zasnivalo isključivo na ličnom utisku ili povremenim sastancima, već je bilo deo svakodnevne komunikacije. Zaposleni su kroz Slack kanale razmenjivali informacije o tekućim zadacima, izazovima i sitnim problemima koji su se pojavljivali u radu. Drugim rečima, problemi su postajali vidljivi u trenutku kada se pojave, a ne tek kada eskaliraju. Upravo ovaj način rada omogućava da se Kaizen princip „rano uočavanje problema“ primeni u praksi. Kada bi se uočio određen problem ili potreba za unapređenjem, naredni korak je bio njegovo pretvaranje u konkretnu aktivnost. U tom smislu, ClickUp je korišćen kao alat za formalizaciju ideja i inicijativa. Predlozi za poboljšanje nisu ostajali na nivou usmenog dogovora ili poruke, već su se evidentirali kao zadaci. Svakom zadatku su dodeljivane odgovorne osobe, rokovi i prioriteti. Ovim se omogućavalo da se inicijative za unapređenje sistematski prate, što je u skladu sa Kaizen pristupom postepenih i kontrolisanih promena.

Vredi istaći da je ovakva kombinacija alata doprinosila većoj transparentnosti rada. Svi članovi tima su u svakom trenutku mogli da vide status određenog zadatka, da li je u toku, završen ili odložen. To, praktično, znači da nije bilo potrebe za dodatnim proverama ili čestim sastancima kako bi se dobio uvid u napredak. Ovakva vidljivost procesa olakšava primenu Kaizen principa, jer omogućava da se unapređenja prate u realnom vremenu.

Pored toga, ClickUp je omogućavao i praćenje utrošenog vremena i opterećenja zaposlenih po zadacima. Iako ova funkcionalnost nije korišćena isključivo u svrhu Kaizen aktivnosti, ona je pružala osnovu za analizu efikasnosti rada. Na primer, uočavanjem zadataka koji konstantno zahtevaju više vremena nego što je planirano, stvarao se prostor za razmatranje uzroka i uvođenje poboljšanja. To, zapravo, predstavlja tipičan Kaizen način razmišljanja. Posmatrati gde nastaju gubici i tražiti načine da se oni postepeno smanje.

Uloga Slack-a u ovom procesu bila je posebno značajna sa aspekta razmene znanja i povratnih informacija. Kroz svakodnevnu komunikaciju, članovi tima su delili iskustva, davali predloge i ukazivali na potencijalne probleme. Ovakva otvorena komunikacija doprinosila je većem uključivanju zaposlenih u proces unapređenja, što je jedan od ključnih principa Kaizen filozofije.

Važno je naglasiti da ni u ovom slučaju IT alati nisu bili cilj sami po sebi. Slack i ClickUp su služili kao podrška postojećem načinu rada i kao sredstvo koje je olakšavalo primenu Kaizen principa.

Ovaj primer pokazuje da primena Kaizen-a uz IT podršku ne mora biti formalno definisana kao poseban program. Šta više, ona može biti deo svakodnevnog rada, ukoliko postoje alati koji podstiču komunikaciju, vidljivost procesa i sistematsko praćenje aktivnosti. Upravo takva praksa predstavlja dobar uvod za razmatranje efekata i prednosti primene Kaizen pristupa uz IT podršku, koji će biti analizirani u narednom potpoglavlju.

4.3. Efekti i prednosti primene Kaizena uz IT podršku

Primena Kaizen pristupa uz IT podršku u velikoj meri utiče na nivo transparentnosti unutar organizacije. Dok se u tradicionalnom pristupu, bez informacione podrške, veliki deo aktivnosti oslanja na usmenu komunikaciju i pojedinačne dogovore, uvođenjem IT alata procesi i poboljšanja postaju jasnije vidljivi. Postaje lakše pratiti šta se radi, ko je za šta zadužen i u kojoj fazi se određena

aktivnost nalazi. Upravo ova vidljivost predstavlja jednu od ključnih prednosti primene Kaizen pristupa uz tehnološku podršku. U okruženju u kojem se koriste alati za upravljanje zadacima i komunikaciju, kao što su ClickUp i Slack, aktivnosti u vezi sa unapređenjem rada ne ostaju na nivou neformalnih razgovora. Ideje, problemi i predlozi za poboljšanje se evidentiraju, prate i ostaju dostupni svim članovima tima. Na taj način, Kaizen aktivnosti postaju deo svakodnevnog rada.

Takođe, transparentnost se ogleda i u načinu na koji se razmenjuju informacije. Kroz kolaboracione alate, komunikacija u vezi sa problemima i poboljšanjima postaje otvorenija i dostupnija širem krugu zaposlenih. Iako ne učestvuju svi direktno u svakoj inicijativi, svi imaju uvid u to šta se dešava i kakvi su rezultati postignuti. Ovo doprinosi većem razumevanju procesa i stvara osećaj zajedničke odgovornosti za unapređenje rada. Primenom IT podrške postaje jasniji i efekat uvedenih promena. Umesto oslanjanja na subjektivan utisak da je određeno unapređenje bilo uspešno, postoji mogućnost da se rezultati prate kroz status zadataka, komentare i evidentirane aktivnosti. To, u suštini, omogućava da se lakše proceni šta je funkcionisalo, a šta zahteva dodatnu korekciju. Upravo ovaj kontinuirani uvid u rezultate čini Kaizen pristup doslednijim i održivijim.

Iz navedenog se može zaključiti da transparentnost predstavlja važan efekat primene Kaizen pristupa uz IT podršku. Kada su procesi, aktivnosti i rezultati vidljivi, organizacija dobija jasniju sliku sopstvenog načina rada.

Pored povećane transparentnosti, primena Kaizen pristupa uz IT podršku značajno doprinosi i bržem uočavanju problema u svakodnevnom radu. U tradicionalnom okruženju, bez tehnološke podrške, problemi se često prepoznaju tek kada postanu dovoljno izraženi da utiču na rezultate ili kada ih korisnici direktno prijave.

Sa uvođenjem IT alata, način uočavanja problema se menja. Informacije o toku rada, statusu zadataka i poteškoćama sa kojima se zaposleni susreću postaju dostupne u realnom vremenu. Kroz svakodnevnu komunikaciju u kolaboracionim alatima, kao što je Slack, zaposleni mogu odmah da ukažu na problem ili nejasnoću u procesu. To, jednostavno, znači da problemi ne moraju da „čekaju“ formalni sastanak ili izveštaj da bi bili primećeni. Pored toga, alati za upravljanje zadacima, kao što je ClickUp, omogućavaju da se odstupanja u radu lako uoče. Zadaci koji kasne, često se vraćaju na doradu ili zahtevaju više vremena nego što je planirano, postaju jasan signal da nešto u procesu ne funkcioniše kako treba. Upravo ovakvi signali predstavljaju polaznu osnovu za Kaizen aktivnosti, jer ukazuju na mesta gde postoji prostor za unapređenje. Drugim rečima, problemi postaju vidljivi kroz sam tok rada, a ne tek nakon što se akumuliraju.

Važno je istaći da ovakva vidljivost problema doprinosi i bržem reagovanju. Kada se problem uoči na vreme, moguće je preduzeti manje, postepene korektivne mere, umesto da se kasnije sprovede obimne i često stresne promene. Brže uočavanje problema doprinosi većem angažovanju zaposlenih. Kada zaposleni vide da se na uočene probleme reaguje blagovremeno i da njihove sugestije imaju efekat, spremniji su da aktivno učestvuju u procesu unapređenja. Na kraju, može se reći da IT podrška omogućava da se problemi ne samo brže uoče, već i jasnije definišu. Kada su informacije dostupne i vidljive, lakše je razumeti uzroke određenih poteškoća i povezati ih sa konkretnim aktivnostima u procesu.

Još jedan važan efekat primene Kaizen pristupa uz IT podršku odnosi se na bolju i uređeniju dokumentaciju. U okruženjima u kojima se ne koriste informacioni sistemi, dokumentacija je često nepotpuna, neujednačena i oslonjena na papirne beleške ili lično pamćenje zaposlenih. Vremenom se takve informacije gube, a organizacija se ponekad vraća na stare načine rada, čak i nesvesno.

Uz IT podršku, situacija je drugačija. Kada se Kaizen aktivnosti evidentiraju kroz alate za upravljanje zadacima i komunikaciju, svaka promena dobija svoj kontekst. Zabeleženo je šta je bio

problem, ko je predložio rešenje, kako je ono realizovano i u kom periodu. Ovakva uređenost dokumentacije je posebno značajna u kontekstu kontinuiranog unapređenja. Kaizen se ne zasniva na jednokratnim promenama, već na nizu malih koraka koji se vremenom nadovezuju. Ako ti koraci nisu dokumentovani, teško je razumeti celokupan put unapređenja. Sa druge strane, kada postoji jasan zapis o prethodnim aktivnostima, lakše je nastaviti tamo gde se stalo, bez ponavljanja istih grešaka ili vraćanja na već prevaziđene probleme.

Pored bolje dokumentacije, IT podrška značajno olakšava i praćenje poboljšanja tokom vremena. U tradicionalnom pristupu, procena da li je neko unapređenje bilo uspešno često se zasniva na opštem utisku ili poređenju „pre i posle“ bez jasnih pokazatelja. Uz upotrebu IT alata, praćenje poboljšanja postaje sistematičnije i jasnije. Kroz alate za upravljanje zadacima moguće je pratiti status Kaizen inicijativa, njihovo trajanje i ishode. Na taj način, poboljšanja nisu samo sprovedena, već i vidljiva tokom vremena. To omogućava da se uoči da li su određene promene donele očekivane rezultate ili je potrebno dodatno prilagođavanje. Takođe, lakše praćenje poboljšanja doprinosi i boljem planiranju budućih aktivnosti. Kada postoji uvid u to koja su unapređenja dala dobre rezultate, a koja nisu, organizacija može donositi informisanije odluke. To, zapravo, omogućava da se Kaizen pristup primenjuje doslednije i sa više sigurnosti. Umesto da se oslanja isključivo na intuiciju, odluke se sve više zasnivaju na iskustvu koje je dokumentovano i dostupno. Na taj način, primena Kaizen pristupa uz IT podršku dovodi do toga da unapređenja ne budu kratkoročna i teško uočljiva, već postaju deo kontinuiranog i prativog procesa. Bolja dokumentacija i lakše praćenje poboljšanja, zajedno sa većom transparentnošću i bržim uočavanjem problema, čine osnovu za sistematičniju i održiviju primenu Kaizen filozofije u savremenom organizacionom okruženju.

5. Zaključak

Na osnovu razmatranih teorijskih polazišta i prikazanih primera iz prakse, može se zaključiti da Kaizen predstavlja pristup menadžmentu kvaliteta koji je primenljiv u različitim organizacionim kontekstima. Njegova suština ogleda se u kontinuiranom unapređenju procesa kroz male, postepene promene, što omogućava da se poboljšanja sprovode bez značajnih poremećaja u svakodnevnom radu. Iz navedenog se vidi da Kaizen ne zahteva složene sisteme kako bi bio primenljiv, već pre svega jasno razumevanje procesa i uključenost zaposlenih. Analizom odnosa Kaizen filozofije i IT resursa uočava se da informacione tehnologije imaju značajnu ulogu u podršci ovom pristupu. Iako Kaizen može da se primenjuje i bez tehnološke podrške, iz primera predstavljenih u radu može se zaključiti da upotreba IT alata doprinosi većoj transparentnosti, bržem uočavanju problema i sistematičnijem praćenju poboljšanja. Na taj način, Kaizen aktivnosti postaju vidljivije i lakše upravljive, što je posebno značajno u složenijim organizacionim sistemima. Takođe, iz analize proizilazi da IT resursi ne predstavljaju cilj sami po sebi, već sredstvo koje omogućava dosledniju primenu Kaizen principa. Može se smatrati da alati koji se u organizacijama često koriste za operativne i komunikacione svrhe imaju potencijal da budu i važan deo sistema kontinuiranog unapređenja, ukoliko se njihova upotreba usmeri ka podršci procesima kvaliteta.

U prvom delu rada, Kaizen je prikazan kao metod menadžmenta kvaliteta koji se zasniva na kontinuiranom, postepenom unapređenju procesa i aktivnom uključivanju zaposlenih. Poseban akcenat stavljen je na njegovu povezanost sa Total Quality Management konceptom i standardom ISO 9001. Analiza je pokazala da Kaizen ne predstavlja izolovanu metodologiju, već praktični način primene principa menadžmenta kvaliteta u svakodnevnom radu. Takođe je utvrđeno da Kaizen doprinosi razvoju kulture kvaliteta, procesne orijentacije i odgovornosti svih učesnika u organizaciji.

U okviru istog poglavlja, posebno je razmotrena veza Kaizen pristupa sa PDCA ciklusom, gamba pristupom i 5S metodologijom. Analiza je pokazala da PDCA ciklus predstavlja praktični mehanizam kroz koji se Kaizen principi realizuju, dok gamba pristup omogućava da se unapređenja zasnivaju na stvarnim procesima, a ne samo na izveštajima i pretpostavkama. Metodologija 5S je prepoznata kao važna osnova za stvaranje uređenog, preglednog i disciplinovanog radnog okruženja, koje predstavlja preduslov za kontinuirano unapređenje. Na osnovu studije slučaja, potvrđeno je da Kaizen pristup može da donese značajna poboljšanja i bez velikih finansijskih ulaganja, kroz bolju organizaciju rada i sistematičan pristup rešavanju problema.

U trećem delu rada analizirana je uloga IT resursa kao podrške Kaizen pristupu. Posebno je istaknuto da informacione tehnologije ne zamenjuju Kaizen filozofiju, već je dopunjuju i olakšavaju njenu primenu. BPM alati su prepoznati kao značajna podrška u mapiranju, analizi i standardizaciji procesa, dok QMS softverska rešenja omogućavaju sistematično upravljanje dokumentacijom, nesaglasnostima i aktivnostima poboljšanja. Task i workflow alati doprinose boljoj organizaciji rada i praćenju zadataka, dok data i BI alati omogućavaju donošenje odluka na osnovu podataka. Kolaboracioni alati, kao što je Slack, prepoznati su kao važan element savremene timske komunikacije i razmene znanja.

Analiza je pokazala da IT alati značajno doprinose transparentnosti procesa, lakšem praćenju poboljšanja i boljoj komunikaciji unutar organizacije. Međutim, istovremeno je istaknuto da uspešna primena Kaizen pristupa ne zavisi isključivo od tehnologije, već pre svega od organizacione kulture, motivacije zaposlenih i podrške menadžmenta.

U četvrtom delu rada upoređena je primena Kaizen pristupa bez IT podrške i sa IT podrškom. Na osnovu prikazanih primera može se zaključiti da se Kaizen može uspešno primenjivati i u tradicionalnom obliku, ali da upotreba IT alata značajno unapređuje efikasnost, brzinu i preciznost procesa kontinuiranog unapređenja. Sa IT podrškom, poboljšanja postaju lakše merljiva, dokumentovana i dostupna većem broju učesnika u organizaciji, što doprinosi njihovoj održivosti.

Opšti zaključak rada jeste da Kaizen i IT resursi ne treba da se posmatraju odvojeno, već kao međusobno povezani i komplementarni elementi savremenog menadžmenta kvaliteta. Kaizen obezbeđuje filozofiju i način razmišljanja, dok IT resursi obezbeđuju alate i infrastrukturu za njegovu efikasnu primenu. Njihova integracija omogućava organizacijama da kontinuirano unapređuju svoje procese, povećavaju kvalitet usluga i proizvoda i bolje odgovaraju na zahteve savremenog poslovnog okruženja.

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da primena Kaizen filozofije uz adekvatnu IT podršku predstavlja važan faktor konkurentnosti i održivog razvoja organizacija. Ovaj rad može poslužiti kao osnova za dalja istraživanja u oblasti integracije menadžmenta kvaliteta i informacionih tehnologija, posebno u kontekstu digitalne transformacije i savremenih organizacionih sistema.

6. References

- [1] ***, ARIS Express, ARIS Community, 2026, available at: <https://ariscommunity.com/aris-express>
- [2] ***, ARIS Community YouTube channel, ARIS Community, YouTube, 2026, available at: <https://www.youtube.com/@ariscommunity/videos>
- [3] **Bacoup, P., C. Michel, G. Habchi, M. Pralus**, From a quality management system (QMS) to a lean quality management system (LQMS), *The TQM Journal*, 30 (2018), 1, pp. 20–42.
- [4] ***, Bizagi BPM software, Bizagi, 2026, available at: <https://www.bizagi.com/en>
- [5] ***, Bizagi YouTube channel, Bizagi, YouTube, 2026, available at: <https://www.youtube.com/@Bizagi>
- [6] ***, ClickUp: One app to replace them all, ClickUp, 2026, available at: <https://clickup.com/>

- [7] ***, ClickUpProductivity YouTube channel, ClickUpProductivity, YouTube, 2026, available at: <https://www.youtube.com/@ClickUpProductivity>
- [8] **Dewhurst, F., A. R. Martínez-Lorente, B. G. Dale**, Total quality management and information technologies: An exploration of the issues, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 16 (1999), 4, pp. 392–405, doi: 10.1108/02656719910240172.
- [9] **Dewhurst, F., A. R. Martínez-Lorente, B. G. Dale**, The effect of information technologies on total quality management: An initial analysis, *International Journal of Production Economics*, 69 (2001), 1, pp. 1–14.
- [10] **Filipović, J., M. Đurić**, *Osnove kvaliteta*, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, Srbija, 2009.
- [11] **Gunasekaran, N., V. P. Arunachalam, S. Arunachalam**, A framework for implementing TISIT model to integrate TQM with software and information technologies, *International Journal of Information Technology and Management*, 8 (2009), 2, pp. 129–145, doi: 10.1504/IJITM.2009.022066.
- [12] **Hasan, Z., M. S. Hossain**, Improvement of effectiveness by applying PDCA cycle or Kaizen: An experimental study on engineering students, *Journal of Scientific Research*, 10 (2018), 2, pp. 159–173.
- [13] **Imai, M.**, *Kaizen: The key to Japan's competitive success*, McGraw-Hill, New York, USA, 1986.
- [14] **Imai, M.**, *Gemba Kaizen: A commonsense, low-cost approach to management*, in: *Das Summa Summarum des Management: Die 25 wichtigsten Werke für Strategie, Führung und Veränderung*, Gabler, Wiesbaden, Germany, 1997, pp. 7–15.
- [15] **Imai, M.**, *Gemba Kaizen: A commonsense approach to a continuous improvement strategy*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, USA, 2012.
- [16] ***, ISO 9001:2015 — Quality management systems — Requirements, International Organization for Standardization, 2015.
- [17] **Isniah, S., H. H. Purba, F. Debora**, PDCA process application in the continuous improvement of software quality, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 505 (2019), 1, 012054, doi: 10.1088/1757-899X/505/1/012054.
- [18] ***, Quality management system software, MasterControl, 2026, available at: <https://www.mastercontrol.com/>
- [19] ***, MasterControlVideo YouTube channel, MasterControlVideo, YouTube, 2026, available at: <https://www.youtube.com/@MasterControlVideo>
- [20] ***, Power BI, Microsoft, 2026, available at: <https://app.powerbi.com/>
- [21] ***, Power BI business analytics service, Microsoft, 2026, available at: <https://powerbi.microsoft.com/>
- [22] ***, Microsoft Power BI YouTube channel, MicrosoftPowerBI, YouTube, 2026, available at: <https://www.youtube.com/@MicrosoftPowerBI>
- [23] **Sahu, R. K., M. Sahu**, Total quality management in software development process, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 7 (2018), 3, pp. 1–4.
- [24] **Scheer, A. W., M. Nüttgens**, *ARIS architecture and reference models for business process management*, in: *Business Process Management: Models, Techniques, and Empirical Studies*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Germany, 2002, pp. 376–389.
- [25] ***, Slack: Where work happens, Slack Technologies, 2026, available at: <https://slack.com/>

Stručni rad

Ključne reči:

sistem menadžmenta kvaliteta; obuke
zaposlenih; medicinska sredstva;
farmaceutska industrija; ISO 13485;
dobra dokumentaciona praksa (GDP);
ALCOA; Ishikawa analiza; CAPA

Key words:

quality management systems;
employee training; medical devices;
pharmaceutical industry; ISO 13485;
Good Documentation Practice (GDP);
ALCOA principles;
Ishikawa analysis; CAPA

Nevena KRSTAJIĆ*

* nkrstajic3@gmail.com

Mladen ĐURIĆ

EFEKTIVNOST OBUKA IZVRŠILACA U SISTEMU MENADŽMENTA KVALITETA U MEDICINSKOJ I FARMACEUTSKOJ INDUSTRIJI

**EFFECTIVENESS OF EMPLOYEE TRAINING
IN QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS
IN THE MEDICAL AND PHARMACEUTICAL INDUSTRY**

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd
ORCID: 0009-0002-6447-7572

Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd
ORCID: 0000-0002-8219-2899

Efektivnost obuka izvršilaca predstavlja jedan od ključnih elemenata uspešnog funkcionisanja sistema menadžmenta kvaliteta u medicinskoj i farmaceutskoj industriji, naročito u kontekstu zahteva standarda ISO 13485 i dobre dokumentacione prakse (GDP). Ovaj rad bavi se analizom značaja i efektivnosti obuka zaposlenih, sa posebnim fokusom na primenu GDP principa i ALCOA koncepta u cilju obezbeđivanja integriteta podataka.

U radu su razmatrani relevantni zahtevi standarda ISO 13485, kao i primer iz prakse koji ukazuje na posledice neadekvatne obučenosti zaposlenih u oblasti upravljanja dokumentacijom. Prime-nom Ishikawa metode identifikovani su uzroci neusaglašenosti, dok je analiza CAPA procesa ukazala na ograničenja postojećih mehanizama za unapređenje kvaliteta.

Rezultati pokazuju da formalno sprovedene obuke ne garantuju njihovu efektivnu primenu u praksi, već je neophodan sistemski pristup koji obuhvata kontinuirano praćenje, evaluaciju i unapređenje programa obuka. Zaključuje se da adekvatno planirane i sprovedene obuke značajno doprinose smanjenju rizika, unapređenju usaglašenosti i jačanju sistema menadžmenta kvaliteta.

The effectiveness of employee training represents one of the key elements for the successful functioning of quality management systems in the medical device and pharmaceutical industry, particularly in the context of ISO 13485 requirements and Good Documentation Practice (GDP). The paper analyzes the importance and effectiveness of employee training, with a special focus on the application of GDP principles and the ALCOA concept in ensuring data integrity.

The paper examines relevant ISO 13485 requirements, as well as a practical example highlighting the consequences of inadequate employee training in documentation management. Root causes of nonconformities were identified using the Ishikawa method, while the analysis of the CAPA process revealed limitations of existing quality improvement mechanisms.

The results indicate that formally conducted training does not guarantee its effective implementation in practice. Instead, a systematic approach is required, including continuous monitoring, evaluation and improvement of training programs. It is concluded that properly planned and implemented training significantly contributes to risk reduction, improved compliance and the strengthening of quality management systems.

1. Uvod

U uslovima sve strožih regulatornih zahteva u medicinskoj i farmaceutskoj industriji, sistem menadžmenta kvaliteta ima ključnu ulogu u obezbeđivanju bezbednosti proizvoda i usaglašenosti sa propisima.

Efikasno funkcionisanje sistema menadžmenta kvaliteta ne zavisi isključivo od definisanih procedura i regulatornih zahteva, već u velikoj meri i od znanja i svesti zaposlenih koji te zahteve svakodnevno primenjuju u praksi. Obuke kadra predstavljaju jedan od ključnih alata za obezbeđenje uspešnosti procesa, očuvanja kvaliteta proizvoda i zaštitu bezbednosti krajnjih korisnika. U praksi se često uočava razlika između formalno sprovedenih obuka i njihove stvarne primene, što može dovesti do pojave neusaglašenosti, naročito u oblasti dobre dokumentacione prakse i upravljanja sledljivošću. Nedostaci u poznavanju i primeni dobre dokumentacione prakse najčešće se otkrivaju kroz interne audite, aktivnosti interne kontrole kvaliteta ili tokom eksternih regulatornih inspekcija, što ukazuje na direktnu povezanost između nivoa obučenosti operatera i pojave neusaglašenosti tokom obavljanja radnih zadataka.

Obuke je potrebno posmatrati kao kontinuirani proces sa jasnim planom i praćenjem rezultata, pri čemu adekvatno planirane, sprovedene i evaluirane obuke doprinose smanjenju neusaglašenosti i jačanju celokupnog sistema menadžmenta kvaliteta. U tom kontekstu, važno je sagledati u kojoj meri obuke zaposlenih doprinose pravilnoj primeni zahteva standarda, kao i na koji način se njihova efektivnost može meriti i unaprediti u svakodnevnoj praksi.

2. Uloga sistema menadžmenta kvaliteta i obuka zaposlenih

Sistem menadžmenta kvaliteta predstavlja strukturiran pristup upravljanju procesima i resursima u cilju postizanja zahteva kvaliteta. Sastoji se od organizacione strukture, planiranja, procesa, resursa i dokumentacije koji se koriste radi unapređenja proizvoda i usluga, kao i povećanja zadovoljstva korisnika. Sistem menadžmenta kvaliteta uzima u obzir zahteve drugih interesnih i zainteresovanih strana, u koje se ubrajaju i korisnici. Ciljevi kvaliteta su povezani sa ukupnim ciljevima organizacije.

Sistem menadžmenta kvaliteta se u praksi realizuje kroz zaposlene koji primenjuju definisane procedure i radne instrukcije, pri čemu obuke zaposlenih omogućavaju pravilno razumevanje procedura i njihovu doslednu primenu. Obuke treba planirati i sprovoditi u skladu sa obrazovanjem, iskustvom i kompetencijama zaposlenih. Adekvatne obuke omogućavaju zaposlenima da razumeju kako njihove aktivnosti utiču na kvalitet i bezbednost proizvoda. Provera efektivnosti obuka različitim metodama predstavlja sastavni deo upravljanja kompetentnošću zaposlenih. Efektivnost obuke se ogleda u sposobnosti zaposlenih da stečena znanja primene u praksi, pri čemu ostvaruju pozitivan uticaj na kvalitet procesa i proizvoda. Nedovoljno efektivne obuke mogu dovesti do grešaka, neusaglašenosti, povećanog rizika, smanjenja odgovornosti, nedovoljne discipline u radu i oslanjanja zaposlenih na neformalne prakse.

Obuke zaposlenih predstavljaju planiran proces koji je usmeren na sticanje znanja, veština i kompetencija neophodnih za pravilno obavljanje radnih zadataka.

3. Zahtevi standarda i regulatorni okvir

Standardi *ISO 9001* i *ISO 13485* definišu zahteve u oblasti kompetentnosti i obuka. *ISO 13485* postavlja strože zahteve zbog uticaja na zdravlje pacijenata, dok farmaceutska industrija primenjuje smernice *International Council for Harmonisation*.

U okviru oba standarda, *ISO 9001:2015* i *ISO 13485:2016*, obuke i kompetentnost zaposlenih predstavljaju značajan element sistema menadžmenta kvaliteta.

Zahtevi koji se odnose na obuke i kompetentnost zaposlenih u standardu *ISO 9001:2015* definisani su u tački 7.2 gde se naglašava da organizacija treba da utvrdi koje su kompetencije neophodne za zaposlene koji obavljaju poslove koji imaju uticaj na performanse i efektivnost sistema menadžmenta kvaliteta. U okviru tačke 7.3, standard ističe svest zaposlenih u pogledu politike kvaliteta i svojih uloga, kao i da zaposleni treba da budu upoznati sa sopstvenim odgovornostima, kao i sa načinom na koji njihov svakodnevni rad doprinosi ostvarivanju postavljenih ciljeva kvaliteta. Za razliku od *ISO 13485:2016*, *ISO 9001:2015* ostavlja organizacijama veću fleksibilnost u pogledu dokumentovanja obuka i procene kompetentnosti, prilagođavajući se složenosti organizacije.

ISO 13485:2016 zahteva strože i preciznije zahteve u oblasti obuka, što je posledica prirode medicinskih sredstava koja direktno utiču na zdravlje i bezbednost pacijenata. U skladu sa tačkom 6.2. standarda *ISO 13485:2016*, zaposleni moraju da poseduju odgovarajuće obrazovanje, znanje, obuku, veštine i radno iskustvo, ukoliko je isto neophodno za obavljanje radnih zadataka. Organizacija je u obavezi da planira, sprovodi, evidentira i periodično procenjuje obuke zaposlenih, pri čemu uvođenje nove opreme ili bilo koje izmene u procesima dovodi do dodatnih obuka zaposlenih.

Posedovanje sertifikata u okviru organizacije ne garantuje efikasnu primenu standarda u praksi, jer stvarni nivo primene i usvajanja zahteva zavisi od razumevanja procedura, uloga i odgovornosti od strane zaposlenih.

4. Dobra dokumentaciona praksa (GDP) i ALCOA principi

Dobra dokumentaciona praksa (GDP) predstavlja osnovu za efektivno funkcionisanje sistema menadžmenta kvaliteta, obezbeđujući pouzdanost, sledljivost i integritet podataka koji nastaju tokom izvršavanja procesa. Svi procesi se smatraju sastavnim delom sistema menadžmenta kvaliteta i moraju biti kontrolisani, dokumentovani i sprovedeni od strane zaposlenih, kao i jasno definisani, dokumentovani i razumljivi svim zaposlenima. Poseban značaj u okviru *GDP*-a ima sledljivost proizvoda koja omogućava identifikaciju kretanja proizvoda kroz sve faze njegovog životnog ciklusa, kao i u slučajevima istrage ili mogućeg povlačenja proizvoda sa tržišta.

U skladu sa *GDP*-om, zahteva se da svi zapisi budu popunjeni u trenutku izvršavanja aktivnosti, da budu povezani sa osobom koja je tu aktivnost izvršila, kao i da svi podaci u zapisima moraju biti uneseni čitljivo, bez korišćenja nejasnih skraćenica ili simbola koji nisu definisani procedurama. Ne-poštovanje navedenih pravila je često rezultat nedovoljno jasnih instrukcija i neefikasne obuke izvršilaca.

Osnovni zahtevi dobre dokumentacione prakse usklađeni su sa principima *ALCOA* koncepta (*Attributable, Legible, Contemporaneous, Original, Accurate*) koji predstavljaju osnovu integriteta podataka u regulisanim industrijama.

Prema *ALCOA* principima, svaki zapis mora da ispoštuje sledeće korake:

- Jasno identifikovana svaka osoba koja je zabeležila podatke u zapisu
- Ručno zabeleženi podaci se beleže jasno i čitko
- Podaci se beleže tačno u vreme kada je određena aktivnost izvršena
- Podaci, kao što su jedinice mere, moraju biti uključeni i dokumentovani
- Dokumentacija o postupcima popunjavanja dokumentacije treba da bude jasna, da pruža potpun i tačan opis svakog događaja
- Podaci moraju da budu originalni i tačni kako bi predstavljali pouzdan dokaz o usaglašenosti procesa

- Podaci treba da se direktno evidentiraju u obrazac za prikupljanje podataka

Neadekvatno sprovedene obuke mogu dovesti do povećanja broja grešaka u procesima, što utiče na pojavu neusaglašenosti, povećava rizik i smanjuje efektivnost sistema menadžmenta kvaliteta.

5. Studija slučaja: analiza neusaglašenosti

Organizacija XY posluje u oblasti proizvodnje medicinskih sredstava. Primenjuje sistem menadžmenta kvaliteta koji je usklađen sa zahtevima standarda ISO 13485:2016. U okviru sistema menadžmenta kvaliteta posebno je važno upravljanje proizvodnom dokumentacijom. Proizvodna dokumentacija omogućava obezbeđivanje sledljivosti proizvoda, dokazivanje usaglašenosti procesa, kao i očuvanje integriteta podataka. Predmet analize u ovom radu je vođenje i kontrola proizvodnih zapisa tokom procesa injekcionog brizganja plastičnih delova, koji je važan deo proizvodnje, jer se kroz dokumentovane zapise mogu identifikovati moguća odstupanja od propisanih zahteva kvaliteta. Imajući u vidu da pravilno popunjavanje dokumentacije zavisi od znanja i obuke zaposlenih, analiziran proces pokazuje primer za procenu efikasnosti obuka u sistemu menadžmenta kvaliteta.

U cilju sagledavanja efektivnosti obuka u praksi, sprovedena je analiza proizvodne dokumentacije u organizaciji XY, sa fokusom na primenu zahteva dobre dokumentacione prakse (GDP-a) i ALCOA principa. Analiza je usmerena na identifikaciju neusaglašenosti u vođenju zapisa, kao i na procenu uticaja nedovoljno efektivnih obuka na pojavu odstupanja u procesima.

Tokom internog pregleda zapisa uočeni su brojni nedostaci koji ukazuju na neusaglašenost sa zahtevima dobre dokumentacione prakse. Iako dokument formalno postoji, način na koji su podaci evidentirani ne obezbeđuje dovoljnu pouzdanost. Osim odstupanja od GDP zahteva, uočeni nedostaci u dokumentu ukazuju na potencijalne rizike po sledljivost proizvoda i pouzdanost podataka.

Kompanija XY		KONTROLA OPERACIJE - INJEKCIJNO BRIZGANJE PLASTIKE Checklist - Injection molding Prilog br. 2 / Attachment 2				Kod dokumenta / Document code: Rev: Datum / Date:		PD-27 Rev 01 06.02.2025.	
Broj radnog naloga / Work order:									
Popunjava operator / Filled in by the operator									
Datum / Date:	Smena / Work shift	Osušen materijal / Dried material DA / NE	Podešen datumar / Date Set DA / NE	Automatsko ili ručno upravljanje mašinom / Automatic or manual control	Količina usaglašenih komada / Quantity of conformity pieces	Količina neusaglašenih komada / Quantity of NC components	Ime i prezime operatora / Operator name	Potpis / Signature	Napomena / Note
17.06.25	8:00 -16:00				848	66?		Milica	66 diskutabilni skart-?
18.06.25	8:00 -16:00				442	459	NNI	MM	552- skart 107- diskutabilni
20.06.2025.	8:00 -16:00				204	115	Milica Podmajorski		18- diskutabilni 38- skart
23.06.2025.	8:00 -16:00				1448	107	Milica Podmajorski	Podmajorski	80- diskutabilni 27- skart
24.06.2025.	8:00 -16:00				865	72	Milica Podmajorski	Podmajorski	42- diskutabilni 0- skart
25.06.2025.	8:00 -16:00				92	18	Milica Podmajorski	Podmajorski	2- diskutabilni 16- skart
Lokacija na serveru: \\... ISO Standard/02 - Processes - Process/PS-03 Production process - Proces proizvodnje/04 - List of Operation Controls/Injection molding machine					Proverio/Odobrio Checked/Approved:				

Slika 1. Primer proizvodnog zapisa
Izvor: Interna dokumentacija kompanije XY

U cilju sistematske analize uočenih odstupanja u vođenju proizvodne dokumentacije, izvršen je pregled odabranog zapisa kroz prizmu zahteva dobre dokumentacione prakse (GDP) i ALCOA principa integriteta podataka.

Tabela 1. Pregled identifikovanih neusaglašenosti u skladu sa GDP i ALCOA principima

ALCOA / GDP princip	Stanje u dokumentu	Odstupanje od GDP / QMS zahteva	Potencijalni rizik	
Attributable – pripisivo	Prisutni su nejasni potpisi, inicijali bez jasnog identiteta ili neujednačeno upisano ime operatera.	Ne postoji jasna veza između izvršene aktivnosti i odgovorne osobe.	Nemogućnost utvrđivanja odgovornosti u slučaju reklamacije, istrage ili auidita.	Ime i prezime operatera / Operator name Potpis / Signature Mirajk
Legible - čitljivo	Rukopis delimično nije čitak. Korišćene su skraćenice i nejasne oznake.	Dokumentacija nije lako razumljiva.	Pogrešna interpretacija podataka. Rizik od netačnih zaključaka.	Količina neusaglašenih komada / Quantity of NC components 66+?
Contemporaneous – zabeleženo u realnom vremenu	Nije moguće utvrditi da li su zapisi nastali u realnom vremenu.	Nema dokaza o pravovremenom evidentiranju.	Sumnja u integritet podataka i pouzdanost zapisa. Isti operater potpisuje vreme u trajanju od 12 radnih sati.	8:00 - 20:00 8:00 -16:00 8:30 10:00
	Uočena je značajna razlika u broju pregledanih komada u odnosu na trajanje radnog perioda.	Manipulacija podacima.	Sumnja u integritet podataka i pouzdanost zapisa i rada.	Smena / Work shift Količina usaglašenih komada / Quantity of conformity pieces 8:00 -16:00 8:30 10:00 204 92
Original – originalno	Nema jasnog razgraničenja između originalnih unosa i eventualnih korekcija.	Nejasno poreklo zapisa.	Rizik od gubitaka originalnih podataka.	459 11 5
Accurate - tačno	Uočene su nelogičnosti između količine usaglašenih i neusaglašenih komada.	Neusklađenost sa zahtevima za tačnost zapisa.	Netačni proizvodni podaci mogu uticati na odluke o kvalitetu.	442 459
Complete – potpuno	Pojedina obavezna polja nisu popunjena.	Nepotpuna dokumentacija.	Nedostatak potpunog zapisa procesa. Nije korišćena oznaka „N/A” (Not applicable – Nije primenljivo).	Osušen materijal / Dried material DA / NE Podešen datumar / Date Set DA / NE
Consistent - dosledno	Različit način evidentiranja istih informacija.	Nedostatak standardizacije.	Otežana analiza i poređenje podataka.	18.06.25 20.06.2025.

ALCOA / GDP princip	Stanje u dokumentu	Odstupanje od GDP / QMS zahteva	Potencijalni rizik									
GDP dokumentacija	Dokument nije verifikovan.	Nedostatak potvrde upisanog stanja.	Sumnja u integritet podataka.	Proverio/Odobrio Checked/Approved:								
	Nedostatak naziva proizvoda koji se proizvodi injekcionim brizganjem.	Nedostatak jasnog i potpunog evidenciranja.	Otežano praćenje sledljivosti.	Nedostaje rubrika u dokumentu.								
	Dokument ne sadrži broj serije.	Nedostatak potpunog zapisa procesa i standardizacije.	Otežano praćenje sledljivosti.	Nedostaje rubrika u dokumentu.								
	Dokument nema jasnu funkciju u primeni. Nije u skladu sa Standardizacijom.	Nedostatak operacije u odnosu na naziv dokumenta.	Nedostatak zapisa u zoraka uzetih tokom operacije injekcionog brizganja plastike i nekompatibilnosti sa opisom dokumenta.	Automatsko ili ručno upravljanje mašinom / Automatic or manual control								
	Dokument sadrži oprečne informacije koje nisu u skladu sa ISO 9001 i ISO 13485 (npr. reč diskutabilno).	Nedostatak standardizacije.	Otežano praćenje sledljivosti i manipulacija podacima.	352-SUMAT 107-DISKUTABILN								
	Dokument sadrži oprečne informacije za istu kategoriju.	Nedostatak tačnosti.	Sumnja u integritet podataka i pouzdanost zapisa.	<table><tr><td>Količina neusaglašenih komada / Quantity of NC components</td><td>Ime i prezime operatera / Operator name</td><td>Potpis / Signature</td><td>Napomena / Note</td></tr><tr><td>66?</td><td></td><td></td><td>66 diskutabilno :lakt?</td></tr></table>	Količina neusaglašenih komada / Quantity of NC components	Ime i prezime operatera / Operator name	Potpis / Signature	Napomena / Note	66?			66 diskutabilno :lakt?
	Količina neusaglašenih komada / Quantity of NC components	Ime i prezime operatera / Operator name	Potpis / Signature	Napomena / Note								
66?			66 diskutabilno :lakt?									
Dokument sadrži informaciju o Prilogu br. 2, bez potpune informacije šta predstavlja i da li analiziranom dokumentu pripada i Prilog br. 1.	Nedostatak potpunog zapisa procesa i standardizacije.	Otežana analiza i sledljivost Podataka. Problem u postupku oslobađanja serije (Batch Release). Ne-potpuna informacija ka operaterima.	KONTROLA OPERACIJE - INJEKCIJNO BRIZGANJE PLASTIKE Checklist - Injection molding Prilog br. 2 / Attachment 2.									

Uočene su neusaglašenosti kao što su: nečitljivi podaci, nedosledni podaci i nedostatak ključnih informacija. Takođe, ukazuje se da uočene neusaglašenosti ne predstavljaju pojedinačne greške, već sistemske slabosti u primeni GDP i ALCOA principa.

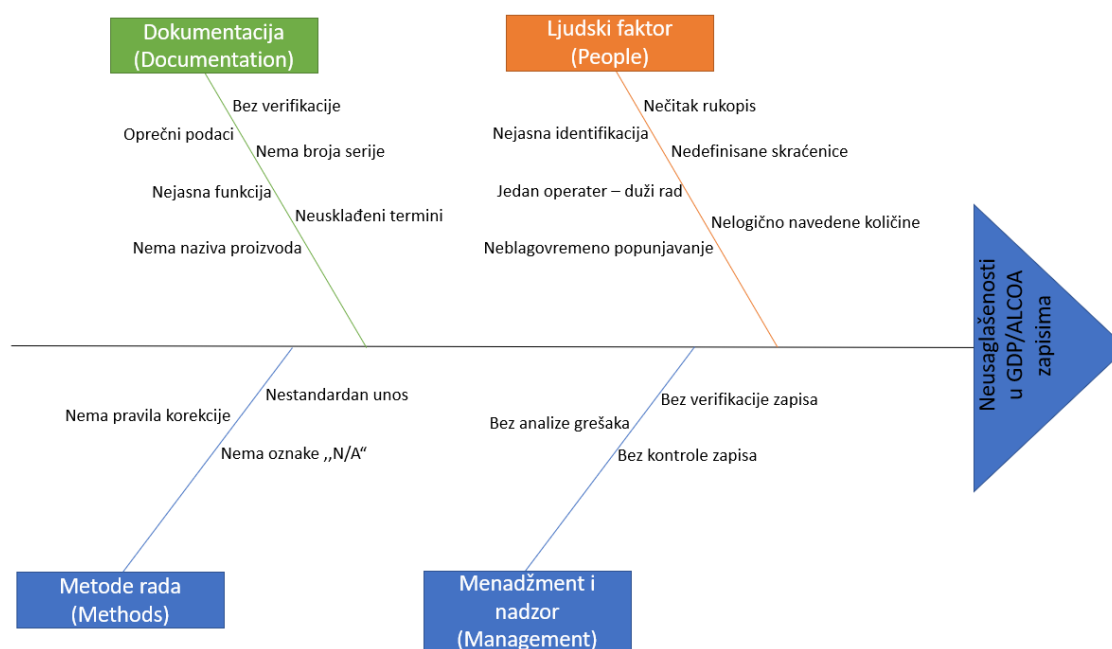
Analiza kompanije XY pokazuje da formalno sprovedene obuke nisu dovele do adekvatne primene u praksi.

5.1. Ishikawa analiza

U cilju identifikacije uzroka odstupanja od zahteva standarda, primenjena je Ishikawa analiza kao jedan od ključnih alata menadžmenta kvaliteta za analizu uzročno-posledičnih odnosa. Identifikovani su osnovni uzroci neadekvatne primene principa dobre dokumentacione prakse i *ALCOA* principa u analiziranom zapisu.

Ishikawa analiza se najčešće sprovodi primenom koncepta „6M”, koji obuhvata sledeće kategorije uzroka: *Man* (ljudi), *Machine* (mašine), *Method* (metode rada), *Material* (materijal), *Measurement* (merenja) i *Mother Nature/Environment* (okruženje). Ovom klasifikacijom omogućava se sagledavanje problema sa više aspekata. Koncept „6M” u ovom radu je prilagođen konceptu upravljanja dokumentacijom u okviru sistema menadžmenta kvaliteta, pri čemu su potencijalni uzroci grupisani u sledeće kategorije: dokumentacija, ljudski faktor, metode rada, menadžment i nadzor.

Primenom Ishikawa dijagrama zaključuje se da se najveći broj identifikovanih uzroka odnosi na kategorije ljudskog faktora i dokumentacije, što ukazuje da način popunjavanja zapisa od strane operatera i struktura samog dokumenta imaju ključnu ulogu u nastanku odstupanja.



Slika 2. Ishikawa dijagram

Uočene neusaglašenosti se ne mogu otkloniti samo korekcijom zapisa, već zahtevaju sistemski pristup koji obuhvata unapređenje programa obuka, reviziju i standardizaciju dokumentacije, kao i poseban fokus na jačanje mehanizama kontrole i nadzora.

Rezultati prikazani putem Ishikawa dijagrama predstavljaju osnovu za definisanje korektivnih i preventivnih mera u okviru CAPA procesa.

5.2. CAPA proces

CAPA proces (Corrective and Preventive Actions) ima za cilj eliminaciju uzroka neusaglašenosti i sprečavanje njihovog ponovnog nastanka. Preventivne mere se mogu preduzeti i bez pojave neusaglašenosti, kao način sprečavanja nastanka potencijalnih neusaglašenosti.

Analiza postojećeg CAPA sistema u kompaniji XY pokazuje da takav sistem ne omogućava adekvatnu identifikaciju osnovnog uzroka, kao ni proveru efektivnosti sprovedenih mera. Na ovaj način proces ne predstavlja alat za sprečavanje ponavljanja istih grešaka, pri čemu se propušta prilika da se kroz CAPA sistem unapredi kompetentnost zaposlenih i ojača integritet podataka u skladu sa

zahtevima ISO 13485. Navedena ograničenja ukazuju na potrebu za unapređenjem CAPA sistema u pravcu jasnije integracije sa procesima obuka i upravljanja kompetentnošću zaposlenih.

Ukoliko CAPA proces nije adekvatno povezan sa analizom uzroka i sistemom obuka, njegova uloga se svodi na formalno zatvaranje neusaglašenosti, bez stvarnog unapređenja sistema.

Efektivna primena CAPA procesa zahteva jasno razumevanje uzroka problema, adekvatno definisanje mere i kontinuirano praćenje njihove efektivnosti, što je direktno povezano sa nivoom obučenosti zaposlenih.

6. Zaključak

Efektivnost obuka predstavlja jedan od ključnih elemenata uspešnog funkcionisanja sistema menadžmenta kvaliteta u medicinskoj i farmaceutskoj industriji. Dobijeni rezultati ukazuju da samo kroz adekvatno planirane, sprovedene i evaluirane obuke moguće je dosledno primeniti zahteve standarda ISO 13485 u praksi. Zahtevi dobre dokumentacione prakse i ALCOA principa naglašavaju značaj integriteta podataka, sledljivosti i tačnosti zapisa, pri čemu ovi zahtevi u velikoj meri zavise od nivoa znanja, veština i svesti zaposlenih.

Analiza iz prakse pokazuje da formalno sprovedene obuke ne garantuju njihovu efektivnu primenu u svakodnevnom radu. Uočene neusaglašenosti ukazuju da se problemi ne mogu posmatrati kao pojedinačne greške zaposlenih, već predstavljaju rezultat međusobnog delovanja više faktora, uključujući način organizovanja obuka, kvalitet dokumentacije, jasnoću procedura i efikasnost nadzora.

Rezultati Ishikawa analize su pokazali značajan uticaj ljudskog faktora i problema u dokumentaciji na pojavu odstupanja. Analiza CAPA procesa ukazala je na potrebu za jačom povezanošću između pronađenih uzroka neusaglašenosti, korektivnih mera i razvoja veština zaposlenih.

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da uspešnost obuka predstavlja važan faktor za dobro funkcionisanje sistema menadžmenta kvaliteta. Rezultati studije slučaja pokazali su da pouzdanost procesa i usklađenost sa regulatornim zahtevima zavise od pravilne primene dokumentacionih zahteva, znanja zaposlenih i efikasnosti mehanizma nadzora. Unapređenje procesa obuka, standardizacija dokumentacije i CAPA aktivnosti doprinosi u smanjenju neusaglašenosti i jačanju ukupne uspešnosti sistema menadžmenta kvaliteta.

7. Reference

- [1] **Abed, M. K., Mousa, H. A., Taha, D. M., Abdulqader, A. T.** *Medical device quality management systems*, Bright Sky Publications, Delhi, India, 2024.
- [2] **Antola, G.**, Procedure improvement for designing and developing medical devices in compliance with MDR and ISO 13485: Case study on osteotomy plates series, M.Sc. thesis, Politecnico di Torino, Italy, 2024.
- [3] **Beydoun, A. R., Saleh, R.F.**, *Literature review on training and development in work setting*, BAU Journal – Society, Culture and Human Behavior, 4 (2023), 2, Article 13.
- [4] **Cao, Y., Umberger, G., Shelton, A., Butts, T.**, *Development of a supplier scorecard for a medical device company toward ISO 13485:2016*, Journal of Pharmaceutical Innovation, 2022.
- [5] *******, EudraLex – Volume 4: EU guidelines for good manufacturing practice, European Commission, Brussels, Belgium, 2022.
- [6] **Filipović, J., Đurić, M., Ruso, J.**, Sistem menadžmenta kvaliteta, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, Srbija, 2018.

- [7] ***, Menadžment i organizacija: Priručnik za pripremu prijemnog ispita, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, Srbija, 2024.
- [8] **Geremia, F.**, *Quality aspects for medical devices*, Microchemical Journal, 2018.
- [9] **Hrgarek, N., Bowers, K.-A.**, *Integrating Six Sigma into a quality management systems*, Journal of Information and Organizational Sciences, 33 (2009), 1, pp. 1-12.
- [10] ***, ICH guideline Q9 (R1): Quality risk management, European Medicines Agency, 2023.
- [11] ***, *ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements*, ISO, Geneva, Switzerland, 2015.
- [12] ***, *ISO 13485:2016 Medical devices - Quality management systems*, ISO, Geneva, Switzerland, 2016.
- [13] **Ishikawa, K.**, *Guide to quality control*, Asian Productivity Organization, Tokyo, Japan, 1986.
- [14] **Juran, J. M., Godfrey, A. B.**, *Juran's quality handbook*, McGraw-Hill, New York, USA, 1999.
- [15] **Kortelainen, T. M., Milovanov, M. A.**, *The role of ISO 9001 and ISO 13485 quality management systems*, M.Sc. thesis, University of Eastern Finland, 2025.
- [16] **Martin, J., Elg, M., Gremyr, I., Wallo, A.**, *Quality management competence framework*, Total Quality Management & Business Excellence, 2019.
- [17] ***, *GxP data integrity guidance and definitions*, MHRA, London, UK, 2018.
- [18] **Oakland, J. S.**, *Total quality management and operational excellence*, Routledge, London, UK, 2014.
- [19] **Reason, J.**, *Human error: Models and management*, BMJ, 320 (2000), pp. 768-770.
- [20] **Sakdiyah, S. H., Eltivia, N., Afandi, A.**, *Root cause analysis using fishbone diagram*, Journal of Applied Business, Taxation and Economics Research, 1 (2022), 6, pp. 566-576.
- [21] **Soković, M., Pavletić, D., Kern Pipan, K.**, *Quality improvement methodologies*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 43 (2010), 1, pp. 476-483.
- [22] ***, *Guidance for industry: Quality systems approach to CGMP regulations*, U.S. Food and Drug Administration, 2006.
- [23] ***, *Process Validation: General Principles and Practices*, U.S. Food and Drug Administration, 2011.
- [24] ***, *Guidance on good data and record management practices*, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2016.

Stručni rad

Ključne reči:

ISO/IEC 42001;
veštačka inteligencija;
upravljanje kvalitetom;
procesna industrija;
održivi razvoj

Key words:

ISO/IEC 42001;
artificial intelligence;
quality management;
process industry;
sustainability

Nikola VOJTEK*

* nikola@smartconsulting-agency.com

Vladan PANTOVIĆ

PRIMENA ISO/IEC 42001 U PROCESNOJ INDUSTRIJI: UPRAVLJANJE VEŠTAČKOM INTELIGENCIJOM U FUNKCIJI ODRŽIVOG RAZVOJA

**APPLYING ISO/IEC 42001 IN PROCESS INDUSTRY:
AI GOVERNANCE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

Smart Consulting Agency, Beograd

ORCID: 0000-0001-9380-7046

Digital Business Consulting, Beograd

ORCID: 0009-0001-6319-8822

Sve intenzivnija primena veštačke inteligencije u procesnoj industriji donosi značajne mogućnosti za optimizaciju proizvodnje i operacija, kao i efikasnije korišćenje resursa. Međutim, paralelno sa pozitivnim aspektima, javljaju se i izazovi u vezi sa pouzdanošću samih sistema, transparentnošću odluka, upravljanjem podacima i usklađenošću sa regulatornim i etičkim zahtevima. ISO/IEC 42001, predstavlja prvi međunarodni standard za sistem menadžmenta veštačkom inteligencijom (AIMS), i kao takav pruža strukturni okvir i smernice za upravljanje AI sistemima kroz ceo njihov životni ciklus. Iako je primarno prepoznat u IT sektoru, njegova primena u procesnoj industriji može predstavljati ključni korak ka odgovornoj i održivoj digitalnoj transformaciji. U okviru rada se analizira mogućnosti implementacije ISO/IEC 42001 u ne-IT okruženjima, sa fokusom na procesnu industriju, uključujući energetiku, hemijsku i proizvodnu industriju. Poseban akcenat stavljen je na integraciju AIMS elemenata sa postojećim sistemima menadžmenta kvaliteta (ISO 9001), zaštite životne sredine (ISO 14001) i informacione bezbednosti (ISO 27001). Na kraju, rad sadrži i predlog praktičnog okvira za implementaciju koji povezuje zahteve standarda sa operativnim procesima, ciljevima održivog razvoja i principima ekonomije. Kroz ovaj pristup, kompanije mogu obezbediti veću transparentnost, smanjiti rizike i unaprediti donošenje odluka zasnovano na podacima.

The increasingly intensive application of artificial intelligence in the process industry brings significant opportunities for optimizing production and operations, as well as for more efficient resource utilization. However, alongside these benefits, challenges also arise related to system reliability, decision transparency, data governance, and compliance with regulatory and ethical requirements. ISO/IEC 42001 represents the first international standard for Artificial Intelligence Management Systems (AIMS), providing a structured framework and guidelines for managing AI systems throughout their entire lifecycle. Although it is primarily recognized in the IT sector, its application in the process industry can represent a key step toward responsible and sustainable digital transformation. This paper analyzes the possibilities of implementing ISO/IEC 42001 in non-IT environments, with a focus on the process industry, including energy, chemical, and manufacturing sectors. Special emphasis is placed on integrating AIMS elements with existing management systems such as ISO 9001 (quality management), ISO 14001 (environmental management), and ISO 27001 (information

security). Finally, the paper proposes a practical implementation framework that connects standard requirements with operational processes, sustainable development goals, and principles of circular economy. Through this approach, companies can achieve greater transparency, reduce risks, and improve data-driven decision-making.

1. Introduction

Artificial intelligence is advancing rapidly and is being increasingly adopted across all industrial sectors, including the processing industry. The focus is on various areas such as production optimization, automation, quality control, predictive maintenance, supply chain management, and energy efficiency. AI systems are increasingly influencing operational decisions, outcomes, and regulatory compliance. Due to the complexity of these technologies, the downside of this trend is the introduction of new AI-related risks in operations, particularly those related to decision transparency, reliability, ethics, data governance, and accountability. Proper identification and management of these risks have become a necessity from both strategic and operational perspectives, rather than merely a technical challenge.

To implement a structured and systematic approach to AI governance, companies are turning to the ISO/IEC 42001 international standard for AI management systems (AIMS). This standard provides a framework for governing the responsible use of AI throughout its lifecycle. ISO/IEC 42001 focuses on AI governance and the establishment of an AI management system, unlike other, more technical standards that concentrate on how AI systems should be developed. It enables companies in the processing industry to integrate AI oversight and control mechanisms into existing processes and operations, as well as into established quality, safety, and compliance domains.

The implementation of an AI management system (AIMS) in companies operating in the processing industry, considering the nature of their business, supports a balance between innovation and control. It can help ensure that AI systems are ethical, properly identified, robust, compliant, and aligned with business objectives and stakeholder expectations. This paper explores how companies in this industry can practically implement ISO/IEC 42001, taking into account the specifics of their operations, challenges related to operational continuity, workforce safety, skills and competencies, integration with other management systems, and regulatory environments.

This paper focuses on implementation rather than theory. Accordingly, the remaining sections are organized as follows. Section two provides a literature review, focusing on correlations with similar implementation use cases. Section three presents an overview of the proposed framework, along with the key implementation elements that need to be considered. Section four contains details on the implementation context as a starting point for AIMS implementation, including AI risks, roles and responsibilities, and control mechanisms. Section five emphasizes the integration of the AIMS with existing management systems, such as ISO 9001. Concluding remarks are provided at the end, along with directions for potential next steps.

2. Literature review

The expansion of artificial intelligence across non-IT sectors has significantly impacted and transformed the way companies design, analyze, optimize, and manage operational processes. As previously highlighted, AI is heavily embedded into production systems, enabling automations, real-time decision-making, advanced analytics and monitoring. However, AI systems have moved from experimental environments into critical operations, thus the focus of research has shifted from purely technical performance toward broader governance concerns. These concerns are related to the AI

system reliability, transparency of decision-making, accountability, and the potential impact of AI-driven decisions on safety, quality, and compliance. As a result, it has become clear that AI is no longer observed only from the technological capability point, but as a company asset that requires structured governance and oversight.

When it comes to the AI governance, we have seen in the last several years an increased number of international guidelines and frameworks. One comprehensive analysis was provided in [1] by Jobin et al., focusing on the frameworks related to global AI ethics guidelines, transparency, accountability, and fairness as the most consistently emphasized principles. However, the study also highlights fragmentation and lack of standardization across these initiatives, which creates challenges for companies attempting to operationalize AI governance in practice and structured way. Similarly, Floridi et al. [2] propose a unified ethical framework emphasizing importance of governing AI in the wider society and environment. Although these frameworks offer valuable guidance on the top-level, they usually lack specific mechanisms for implementation within operations and processes, which could be also limiting for the applicability in industrial environments.

From a company perspective, implementing AI systems could introduce several different challenges that extend beyond technical deployment. Some of the previously conducted researches such as [3], are emphasizing frequently encountered difficulties in integrating AI into existing processes due to a lack of in-house expertise, governance structure, rapidly evolving technological and regulatory landscapes. The effect of these challenges could be significant in complex industrial environments, where AI systems must operate within strict safety, reliability, and compliance constraints. Furthermore, the absence of defined roles and responsibilities for AI governance and control mechanisms, often leads to partial decision-making and increased operational risk. This clearly indicates that successful AI adoption requires not only technological readiness, but also organizational alignment and structured governance approach.

When it comes to the accountability in AI systems, auditing practices are playing a crucial role. Since governance must cover the entire AI lifecycle, companies need to apply end-to-end auditing and review of algorithms, data, roles and controls [4], from data collection and model development to deployment and continuous monitoring. As provided in the related research, essential components of a responsible AI system are documentation, traceability, and clearly defined control mechanisms. This perspective reinforces the idea that governance is not a one-time activity but an ongoing process that must be embedded into organizational workflows, periodically reviewed and adjusted. In addition to governance structures, effective interaction between human operators and AI systems represents a key factor in successful implementation [5]. In manufacturing and processing environments, operators must be able to understand, trust, and intervene in AI-driven decisions, particularly in situations involving anomalies or safety risks.

Another critical aspect of AI implementation is the complexity of machine learning systems in production environments, and so called “hidden technical debt” [6]. Over time, AI systems can accumulate risks, due to data dependencies, model drift, and insufficient monitoring. These issues could become relevant in industrial settings, where systems operate continuously and are subject to changing conditions. Without proper review and control mechanisms, such risks could remain undetected and lead to degraded performance or unintended consequences. In [7] an example is provided how AI-driven analytics could be integrated with physical production processes to enable real-time monitoring. Considering analytics and monitoring, it could be said that predictive maintenance is one of the most widely adopted use cases, where machine learning models are used to anticipate equip-

ment failures and minimize downtime [8]. Finally, in the context of applying AI in processing industry, other use cases detect quality control, anomaly detection, and process optimization areas [9], in which AI could contribute to higher levels of productivity and product consistency[10].

3. Overview of the proposed framework

The framework proposed as part of this paper is designed to support the practical implementation of AI governance in companies within the processing industry. The framework is aligned with the principles of structured management systems and focuses on integrating AI governance into existing processes and operations. Next key implementation elements are establishing the foundation for an AIMS:

- Identification of the organizational AI context,
- Establishment of the AI usage policy,
- Expansion of the existing organizational roles and responsibilities,
- Identification of AI-related risks,
- Introduction of the regular management reviews, and
- Implementation of the operational control mechanisms.

Identification of the organizational AI context includes recognizing where artificial intelligence is currently used or planned to be used within processes. As previously emphasized, in the processing industry, AI systems may be involved in predictive maintenance, process optimization, quality inspection, anomaly detection, energy consumption forecasting, or decision-support activities. Defining the AI context could also include the identification of the stakeholders, mapping of the operational dependencies, understanding applicable regulations, adjustments of business objectives, and assessment of the potential impacts on safety, quality, and operational continuity.

The purpose of the AI policy is to define company's principles, responsibilities, acceptable usage practices, as well as to provide guidelines for governing the expectations related to AI technologies. The policy must clearly specify how AI systems could be used, which types of data may be processed, how human oversight is maintained, and how ethical, security, and compliance considerations are addressed.

Expansion of existing organizational roles and responsibilities is another important aspect. Instead of creating entirely new structures, the framework proposes extending current operational, quality, security, and compliance roles with AI-related responsibilities. One example could be related to the quality manager who will also embrace responsibilities related to the AI output validation and AI risk management. Similar, information security officers may oversee AI-related data governance and cybersecurity risks, as well as participate in the periodical reviews together with the quality manager. Following this, operational managers may supervise the reliability, usage and effectiveness of AI-assisted processes, and could propose improvements related to AI, automation and similar.

Systematic identification and management of AI-related risks represents another key element. AI systems are introducing new categories of risks that may not be fully addressed through traditional risk management approach. These risks could be related to the biased outputs, lack of transparency, data quality problems, model drift, cybersecurity vulnerabilities, or non-compliance with regulatory and ethical requirements. Based on the proposed framework, companies should establish an AI risk register that captures identified risks, associated controls, responsible AI risk owners, mitigation steps, and latest review status.

Final part of framework are regular management reviews and control mechanisms. These are also critical governance activities that need to be properly integrated into the processes, so that company doesn't lose focus on its strategy and business goals. Management reviews should evaluate the effectiveness of AI governance processes, assess the status of identified AI risks using the risk register, review incidents and nonconformities, evaluate compliance requirements, and monitor the achievement of company's objectives related to AI usage. Control mechanisms may expand existing internal audits, could include new activities related to the AI system monitoring, performance validation, documentation reviews, approval workflows, and human oversight procedures.

4. Implementation context

Proposed framework was described in the previous section. Its important elements are also shown on the next figure.

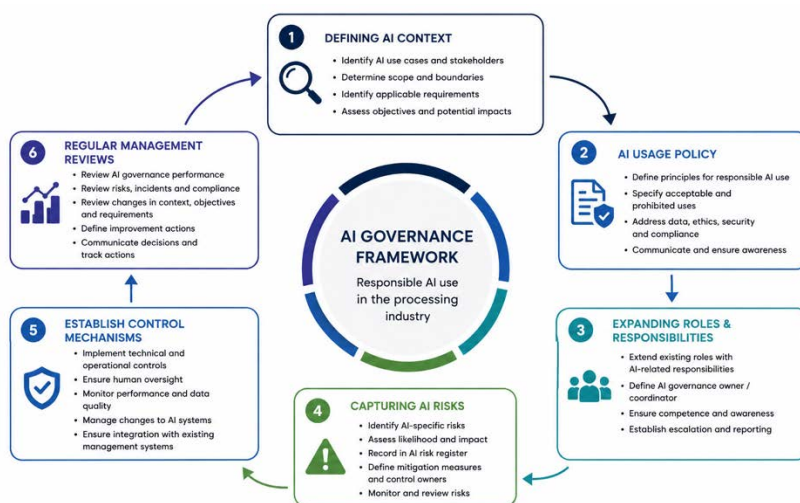


Figure 1. AI Governance Framework in Processing Industry

The successful implementation of an AIMS within the company in processing industry requires a clear understanding of the implementation context in which AI governance activities will be established. The context represents multiple environments (such as organizational, operational, governance) that could influence the AI system through its lifecycle. Environment within the processing industry is characterized by strict quality, safety, environmental, and regulatory requirements. Thus, AI governance cannot be implemented as an isolated technical initiative. It must be properly aligned with:

- Strategy and objectives,
- Management structure,
- Existing governance mechanisms, and
- Organizational resources and capabilities.

The implementation of AI is often driven by highest company goals such as cost optimization, quality improvement, energy and resource efficiency, or enhanced decision-making. The AI governance should support these goals by ensuring that AI systems will operate in a controlled, responsible and transparent way. Alignment with strategy will enable top management to prioritize AI initiative according to the business value and objectives.

AI implementation will be effective if there is an alignment with the existing management structure of the company. In many processing industry environments, responsibilities are already distributed across operational management, quality management, information security, compliance, and

safety functions. AI governance should therefore integrate into these existing structures rather than operate as independent entity.

Companies in the processing industry are using governance mechanisms established as part of the existing management systems. These mechanisms could include risk management processes, internal audits, corrective actions, compliance reviews, change management procedures, and performance monitoring activities. To avoid duplication and improve implementation efficiency, implementation of the AI governance should integrate with these existing mechanisms. Integration into existing frameworks such as ISO 9001 or ISO/IEC 27001 also enables companies to manage AI-related risks within already familiar routine and standardized processes.

Finally, the successful implementation of AI initiative will depend significantly on the availability of resources and capabilities. Companies must assess whether they have the necessary competencies to implement and manage AI systems effectively, including knowledge related to AI risks, model monitoring, cybersecurity, compliance, and human oversight. Employee training at the beginning of the implementation could play an important role in ensuring the understanding of the initiative details, potential risks of implementation, limitations, and governance requirements associated with AI technologies.

The implementation context needs to establish the foundation required for effective AIMS implementation within the company. By understanding operational dependencies, assessing company readiness, defining governance responsibilities, identifying AI risks, and establishing control mechanisms, companies could introduce AI technologies using a more structured, transparent, and sustainable approach.

5. Integration of the AIMS with existing management systems

Considering that many companies in the processing sector already operate under established standards such as ISO 9001, ISO 14001, and ISO 45001, the proposed AIMS framework emphasizes compatibility with existing systems. This should not be considered as isolated initiative. Companies should leverage existing structures, responsibilities, controls, and continual improvement mechanisms while reducing implementation complexity.

Integration with quality management systems such as ISO 9001 could be important, considering that AI systems could directly influence production quality and process stability. AI-assisted decision-making processes should therefore be incorporated into existing quality assurance and validation activities to ensure that AI-generated outputs remain accurate, traceable, and aligned with operational requirements. Potential integration points between ISO/IEC 42001 and ISO 9001 are provided below:

- **Risk-Based Thinking** (ensure consistent product and service quality). In integrated environments, existing quality risk management processes can be extended to include AI-related risks
- **Process Approach** (core management principle). Integrate AI governance directly into existing operational workflows, quality assurance activities, and process monitoring mechanisms.
- **Continual Improvement** (fundamental principle in both standards). Existing corrective and preventive action mechanisms used in quality management can also be applied to AI-related incidents.
- **Documentation and Traceability** (evidence-based decision-making). Extend existing documentation practices to include AI inventories, risk registers, records, AI monitoring logs and other.

Following similar logic, an alignment between ISO 14001, ISO 27001, ISO 45001 and ISO/IEC 42001 could be made. All these standards share several common governance principles related to risk management, continual improvement, operational control, and organizational accountability. Management systems will require from company to identify and assess risks and impacts associated within the activities, establish appropriate control mechanisms, define responsibilities, monitor performance, and conduct regular management reviews.

6. Conclusion

Artificial intelligence is advancing rapidly and is being increasingly adopted across industrial sectors. In processing industry, the focus is on various areas such as production optimization, automation, quality control, predictive maintenance, supply chain management, and energy efficiency. Due to its complexity, the downside of the adoption trend is the introduction of complex AI-related risks in operations, particularly those related to decision transparency, reliability, ethics, data governance, and accountability. Proper identification and management of these risks have become a necessity, rather than merely a technical challenge.

Companies need to implement a structured way of AI governance, identify and manage adequately the entire AI lifecycle. ISO/IEC 42001 represents the first international standard for Artificial Intelligence Management Systems (AIMS) that could provide guideliness for establishing proper AI governance processes. This paper analyzes the possibilities of implementing ISO/IEC 42001 in non-IT environments, with a focus on the process industry, including energy, chemical, and manufacturing sectors. Particular focus was placed on practical implementation framework that consists of several elements related to defining the implementation context, establishing AI governance policies, extending existing organizational roles and responsibilities, identifying and managing AI-related risks, and introducing management reviews and control mechanisms.

The proposed framework demonstrates that AI governance can be implemented in a practical and scalable manner by integrating AI-related activities into existing operational and management processes rather than establishing isolated governance structures. Considering that many companies in the processing sector already operate under established standards such as ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, ISO 27001, the proposed AIMS framework emphasizes compatibility with existing systems.

It could be said that at this point, ISO/IEC 42001 is still relatively new and implementation experiences are limited. But, its adoption could represent an important step for establishing responsible and sustainable AI governance within industrial sector. Through this approach, companies can achieve greater transparency, reduce risks, and improve data-driven decision-making.

Future work may expand existing alignment point towards other standards (ISO 14001, ISO 45001, ISO 27001) in the same manner as presented in this paper for the ISO 9001. Due to industry specifics, another further initiative could be related to the development of a sector-oriented control frameworks.

7. References

- [1] **Jobin, A., Ienca, M., & Vayena, E.**, The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature Machine Intelligence*, 1 (9), 389–399, 2019. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0088-2>
- [2] **Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., Luetge, C., Madelin, R., Pagallo, U., Rossi, F., Schafer, B., Valcke, P., Vayena, E.**, AI4People—An ethical framework for a good AI society, *Minds and Machines*, 28 (4), 689–707, 2018.

- [3] **Dwivedi, Y. K., Hughes, D. L., Ismagilova, E., Aarts, G., Coombs, C., Crick, T., Duan, Y., Dwivedi, R., Edwards, J., Eirug, A., Galanos, V., Ilavarasan, P. V., Janssen, M., Jones, P., Kar, A. K., Kizgin, H., Kronemann, B., Lal, B., Lucini, B., Medaglia, R.,** Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, *International Journal of Information Management*, 57, 2021.
- [4] **Raji, I. D., Smart, A., White, R. N., Mitchell, M., Gebru, T., Hutchinson, B., Smith-Loud, J., Theron, D., Barnes, P.,** Closing the AI accountability gap: Defining an end-to-end framework for internal algorithmic auditing, *Proceedings of the FAT* Conference*, 2020.
- [5] **Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Fourney, A., Nushi, B., Collisson, P., Suh, J., Iqbal, S., Bennett, P. N., Inkpen, K., Teevan, J., Kikin-Gil, R., Horvitz, E.,** Guidelines for human-AI interaction, *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2019.
- [6] **Sculley, D., Holt, G., Golovin, D., Davydov, E., Phillips, T., Ebner, D., Chaudhary, V., Young, M., Crespo, J. F., Dennison, D.,** Hidden technical debt in machine learning systems, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2015.
- [7] **Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. A.,** A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, *Manufacturing Letters*, 3, 18–23, 2015.
- [8] **Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., Alcalá, S. G. S.,** A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance, *Computers & Industrial Engineering*, 137, 2019.
- [9] **Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., Li, G. P.,** Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review, *Computers & Industrial Engineering*, 150, 2020.
- [10] **Chien, C. F., Hong, T. Y., Guo, H. Z.,** An empirical study for smart production for TFT-LCD to empower Industry 3.5, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 40 (7), 552–561, 2017.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.283>

Ključne reči:

tehničar grejanja i klimatizacije;
procesna industrija; energetska
efikasnost; digitalizacija; upravljanje
kvalitetom

Key words:

heating and air conditioning
technician; process industry; energy
efficiency; digitalization; quality
management

MODERNIZACIJA OBRAZOVNOG PROFILA „TEHNIČAR GREJANJA I KLIMATIZACIJE” U SKLADU SA ZAHTEVIMA PROCESNE INDUSTRIJE

MODERNIZATION OF THE EDUCATIONAL PROFILE “HEATING AND AIR CONDITIONING TECHNICIAN” IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE PROCESS INDUSTRY

Milica GERASIMOVIĆ*

* mgerasimovic@politehnika.edu.rs

Snežana BEĆIRIĆ

Akademija strukovnih studija Politehnika, Beograd

ORCID: 0009-0005-8094-761X

Zavod za unapređivanje obrazovanja i vaspitanja, Beograd

ORCID: 0009-0007-9784-8284

U radu je urađena analiza postojećeg standarda kvalifikacije Tehničar grejanja i klimatizacije, sa ciljem da se istakne neusklađenost između važećeg standarda i onoga što zahteva moderna industrija, posebno u oblastima kao što su digitalizacija, energetska efikasnost, održivi razvoj i upravljanje kvalitetom. Neophodnost navedenog, sadržana je u činjenici da savremeni razvoj procesne industrije zahteva stalno unapređenje obrazovnih profila u stručnom obrazovanju, jer su društvu sve potrebni stručnjaci sa tehničkim, digitalnim i održivim kompetencijama.

U radu se predlaže model unapređenja kroz jačanje veza između obrazovanja i industrije, kao i primena dualnog modela obrazovanja, koji omogućava učenicima da steknu praktična iskustva u realnim industrijskim uslovima rada.

Modernizovane oblasti kompetencija, učenicima bi pružile mogućnost da ovladaju veštinama koje industrija prepoznaje kao ključne, uključujući upotrebu digitalnih i automatizovanih sistema, energetske optimizovane rešenja, i principe održivog razvoja.

Realno je očekivati da bi implementacija ovih promena dovela do lakšeg pronalaženja posla i profesionalnog razvoja, i podigla kvalitet kadrova koji su spremni za rad u digitalizovanim, energetski efikasnim i održivim procesnim postrojenjima.

The paper analyzes the existing qualification standard Heating and Air Conditioning Technician, with the aim of highlighting the mismatch between the current standard and what modern industry requires, especially in areas such as digitalization, energy efficiency, sustainable development and quality management. The necessity of the above lies in the fact that the modern development of industrial processes requires constant improvement of educational profiles in vocational education, because society needs specialists with technical, digital and sustainable competencies.

The paper proposes a model of improvement through strengthening the links between education and industry, as well as the application of a dual model of education, which allows students to gain practical experience in real industrial working conditions.

Modernized competency areas would provide students with the opportunity to master skills recognized by industry as key, including the use of digital and automated systems, energy-optimized solutions, and principles of sustainable development.

It is realistic to expect that the implementation of these changes would lead to easier job finding and professional development, and raise the quality of personnel who are ready to work in digitized, energy-efficient and sustainable process plants.

1. Uvod

Procesna industrija predstavlja jedan od ključnih sektora savremene privrede, zasnovan na složenim procesima prenosa mase i energije, čija efikasnost direktno određuje ekonomičnost, bezbednost i posledice po životnu sredinu (Towler & Sinnott, 2013; Smith, 2016). Savremeni razvoj ovog sektora karakterišu povećani zahtevi u oblasti energetske efikasnosti, smanjenja emisija i primene digitalnih tehnologija upravljanja procesima (IEA, 2023).

U takvim uslovima, srednje stručno obrazovanje ima značajnu ulogu u razvoju kadrova osposobljenih za rad u savremenim industrijskim sistemima. Obrazovni profil Tehničar grejanja i klimatizacije posebno je relevantan, jer obuhvata znanja iz oblasti energetike, procesnih sistema i upravljanja tehničkim postrojenjima, uz izraženu vezu između teorije i prakse.

Međutim, ubrzani tehnološki razvoj i rastući značaj održivog razvoja ukazuju na potrebu za modernizacijom kompetencija obrazovnog profila. Postojeće kompetencije ne obuhvataju u dovoljnoj meri principe digitalizacije, energetske efikasnosti i upravljanja kvalitetom, što ograničava usklađenost sa zahtevima savremene procesne industrije (Hermann et al., 2016; CEDEFOP, 2020).

Cilj ovog rada je analiza usklađenosti obrazovnog profila Tehničar grejanja i klimatizacije sa savremenim industrijskim zahtevima, kao i definisanje pravaca njegovog unapređenja kroz integraciju principa održivosti, digitalizacije i upravljanja kvalitetom.

2. Metodologija

U ovom radu primenjen je analitičko-deskriptivni i komparativni istraživački pristup sa ciljem procene usklađenosti postojećeg standarda kvalifikacije Tehničar grejanja i klimatizacije sa savremenim zahtevima procesne industrije. Istraživanje je zasnovano na kvalitativnoj analizi obrazovnih dokumenata, relevantne stručne literature i međunarodnih standarda koji definišu savremene trendove u oblasti energetike, digitalizacije i industrijskih sistema.

U prvoj fazi istraživanja izvršena je detaljna analiza važećeg standarda kvalifikacije, pri čemu su razmatrani ishodi učenja i ključne stručne kompetencije. Fokus analize bio je usmeren na identifikovanje sadržaja koji se odnose na tehničke sisteme grejanja i klimatizacije, kao i na utvrđivanje prisustva elemenata koji se odnose na savremene tehnološke i industrijske zahteve.

U narednoj fazi sprovedeno je komparativno upoređivanje dobijenih rezultata analize sa savremenim industrijskim zahtevima koji proizilaze iz koncepta Industrije 4.0, energetske politike i standarda upravljanja energijom i kvalitetom. Ova poređenja su omogućila identifikaciju razlika između postojećih obrazovnih ishoda i kompetencija koje su neophodne u modernim procesnim sistemima, posebno u oblastima digitalizacije, energetske efikasnosti i održivog razvoja.

Na osnovu uočenih razlika razvijen je konceptualni predlog modela unapređenja standarda kvalifikacije, koji predstavlja polaznu tačku za osavremenjivanje kurikula. Formulirani su primeri savremenih nastavnih sadržaja i ishoda učenja kao ilustracija mogućih pravaca modernizacije kurikula. Model je formulisan tako da odražava potrebu jačanja povezanosti obrazovanja i industrije, kao i integracije savremenih tehnologija i principa održivosti u obrazovni proces, uz poseban akcenat na razvoj digitalnih i automatizovanih kompetencija učenika.

3. Zahtevi savremene procesne industrije

Savremena procesna industrija razvija se u pravcu visoko digitalizovanih, automatizovanih i energetski optimizovanih sistema, pri čemu se kao dominantni okvir razvoja nameće koncept Industrije 4.0. Ovakav razvoj podrazumeva integraciju fizičkih procesa sa digitalnim tehnologijama, što omogućava povećanje efikasnosti, pouzdanosti i fleksibilnosti industrijskih postrojenja, uz istovremeno smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu (Hermann et al., 2016; Kagermann et al., 2013).

Energetska efikasnost predstavlja jedan od ključnih strateških zahteva savremene industrije, posebno u kontekstu evropskih energetskih politika i standarda upravljanja energijom. Optimizacija potrošnje energije u procesnim i termotehničkim sistemima, uključujući sisteme grejanja, ventilacije i klimatizacije, postaje neophodna za smanjenje operativnih troškova i emisija gasova sa efektom staklene bašte (IEA, 2023; ISO 50001:2018). U tom smislu, savremeni HVAC sistemi se sve više projektuju kao visoko efikasni i adaptivni sistemi sa mogućnošću dinamičkog upravljanja energetskim tokovima.

Digitalizacija industrijskih procesa predstavlja centralni element transformacije savremene proizvodnje. Primena industrijskih IoT sistema, senzorskih mreža, SCADA sistema i naprednih softverskih platformi omogućava kontinuirano praćenje procesa u realnom vremenu, kao i optimizaciju rada postrojenja na osnovu prikupljenih podataka. Time se značajno unapređuje preciznost upravljanja, smanjuje verovatnoća sistemskih grešaka i povećava ukupna pouzdanost industrijskih sistema.

Održivost se u savremenoj procesnoj industriji posmatra kao integrisani razvojni princip koji obuhvata racionalno korišćenje resursa, primenu obnovljivih izvora energije i smanjenje ekološkog otiska industrijskih postrojenja. Poseban značaj ima tranzicija ka ekološki prihvatljivim rashladnim i radnim fluidima, kao i implementacija rešenja koja podržavaju dekarbonizaciju industrijskih sistema u skladu sa evropskim zelenim politikama.

Upravljanje kvalitetom i standardizacija predstavljaju osnovu pouzdanog i bezbednog funkcionisanja procesnih sistema. Implementacija međunarodnih standarda omogućava sistematičnu kontrolu procesa, ujednačavanje tehničkih procedura i povećanje nivoa sigurnosti u radu. Time se obezbeđuje ne samo tehnička pouzdanost, već i konkurentska prednost industrijskih sistema na globalnom tržištu.

Svi navedeni aspekti ukazuju na potrebu za razvojem savremenih tehničkih kompetencija koje obuhvataju kombinaciju inženjerskog znanja, digitalnih veština i razumevanja principa održivog razvoja. Navedeni zahtevi predstavljaju direktan izazov za sistem srednjeg stručnog obrazovanja, koji mora biti prilagođen potrebama savremene, digitalizovane i energetski efikasne industrije.

4. Standard kvalifikacije tehničar grejanja i klimatizacije

U obrazovnom sistemu Republike Srbije u oblasti mašinstva i obrade metala na nivou 4 postoji standard kvalifikacije i obrazovni profil tehničar grejanja i klimatizacije („Službeni glasnik RS – Prosvetni glasnik“ br. 1/2018.).

Analizom važećeg standarda kvalifikacije Tehničar grejanja i klimatizacije može se uočiti da je u značajnoj meri zasnovan na tradicionalnim tehničkim kompetencijama, pre svega u oblasti izvođenja, montaže i održavanja sistema. Iako standard prepoznaje pojedine savremene aspekte, kao što su energetska efikasnost, upotreba softvera i praćenje tehnoloških inovacija, uočavaju se određena ograničenja u pogledu usklađenosti sa aktuelnim zahtevima procesne industrije.

Princip energetske efikasnosti je prepoznat u okviru više kompetencija, ali nije dovoljno razrađen na nivou konkretnih znanja i veština. Nedostaje sistemski pristup koji bi obuhvatio integraciju

obnovljivih izvora energije (npr. toplotne pumpe, solarni sistemi), izradu jednostavnijih energetske bilansa, kao i participiranje u procesu optimizacije energetske tokova. Postojeći standard je više orijentisan na eksploataciju sistema, a manje na njihovu energetske optimizaciju, što je jedan od ključnih zahteva savremene industrije.

U oblasti digitalizacije uočava se da je upotreba „aplikativnih softvera“ navedena, ali nedovoljno precizirana i ograničena je na osnovni nivo. Nedostaju kompetencije koje se odnose na rad sa senzorima i regulatorima, primenu sistema automatskog upravljanja uz poznavanje osnova PLC i SCADA sistema, „pametnih“ HVAC sistema i IoT koncepta.

Iako standard uključuje mere zaštite životne sredine, pristup je pretežno normativan i usmeren na poštovanje propisa. Nedostaje širi koncept održivosti koji podrazumeva procenu uticaja sistema na životnu sredinu, primenu ekološki prihvatljivih rashladnih fluida, razumevanje značaja smanjenja emisije i ugljeničnog otiska, primenu principa reupotrebe i reciklaže komponenti.

Kompetencije zastupljene u postojećem standardu su uglavnom usmerene na izvršenje zadataka, a manje na upravljanje kvaliteteom procesa.

Opšte zapažanje je da postojeći standard kvalifikacije obezbeđuje solidnu osnovu za sticanje stručnih znanja u oblasti grejanja, ventilacije i klimatizacije, ali nije u potpunosti usklađen sa savremenim zahtevima procesne industrije. Ključni nedostaci odnose se na nedovoljnu zastupljenost energetske optimizacije, digitalizacije, održivog razvoja i upravljanja kvalitetom, što ukazuje na potrebu za njegovim daljim unapređenjem.

5. Predlog unapređenja standarda kvalifikacije i kurikuluma

Uporedna analiza postojećih i modernizovanih oblasti kompetencija, prikazana u tabeli 1, jasno pokazuje konkretne pravce unapređenja. Dok trenutni standard naglašava osnovne tehničke i organizacione veštine, modernizovana verzija uključuje dodatne kompetencije koje odgovaraju zahtevima savremene procesne industrije, kao što su primena digitalnih i automatizovanih sistema, energetska efikasnost, održivost, standardizacija i upravljanje kvalitetom. Ovakva struktura kompetencija omogućava da program obrazovanja ne samo da prati tehnološki razvoj industrije, već i aktivno doprinosi stvaranju kvalifikovanih stručnjaka spremnih za rad u modernim, digitalizovanim i održivim procesnim postrojenjima.

Na osnovu analize postojećeg standarda kvalifikacije za Tehničara grejanja i klimatizacije, neophodno je pristupiti njegovom unapređenju kroz integraciju savremenih zahteva procesne industrije. Prvi i ključni korak u ovom procesu jeste povezivanje obrazovanja sa privredom. Primena različitih tehnika, kao što su ankete među poslodavcima, fokus grupe, stručne radionice i analiza tržišta rada, omogućava razvoj nacrt modernog profila zanimanja. Ovaj profil treba da definiše konkretna znanja, veštine i kompetencije koje savremena industrija prepoznaje kao relevantne. U sledećoj fazi vrši se modernizacija standarda kvalifikacije Tehničar grejanja i klimatizacije, a zatim izrada kurikuluma, tj. plana i programa nastave i učenja u školi i kompaniji.

Drugi segment unapređenja odnosi se na dualni model obrazovanja, koji uključuje aktivnu saradnju sa kompanijama iz oblasti grejanja, ventilacije i klimatizacije. Učenici kroz praktično osposobljavanje u realnim industrijskim uslovima stiču iskustvo i veštine koje se ne mogu u potpunosti razviti u školskoj radionici. Takav pristup omogućava kontinuirano povezivanje teorijskog znanja sa praksom, osposobljava učenike za rad u skladu sa savremenim standardima i unapređuje njihovu zapošljivost.

Tabela 1 Usporedna analiza oblasti kompetencija (Autori, 2026)

Postojeće oblasti kompetencija	Modernizovane oblasti kompetencija (savremena procesna industrija)	Dodata vrednost
Planira i organizuje rad	Planiranje, organizacija i optimizacija rada u procesnoj industriji	Uključuje digitalne alate, optimizaciju energetske tokova, standardizaciju i upravljanje kvalitetom
Izvodi instalacije sistema grejanja	Instalacija i upravljanje sistemima grejanja, ventilacije i klimatizacije u skladu sa digitalizacijom i automatizacijom	Integracija senzora, PLC/SCADA sistema, smart HVAC, balansiranje i nadzor sistema
Izvodi instalacije sistema ventilacije i klimatizacije		
Održava sisteme grejanja, ventilacije i klimatizacije	Održavanje i unapređenje sistema sa principima održivosti i energetske efikasnosti	Ekološki prihvatljivi materijali, reciklaža, analiza kvarova digitalnim alatima, cirkularna ekonomija
Vodi evidenciju i tehničku dokumentaciju	Upravljanje kvalitetom, standardizacija i bezbednost u procesnoj industriji	Kontrola kvaliteta, ISO standardi, vođenje dokumentacije, praćenje performansi sa naglaskom na savremene standarde zaštite zdravlja, životne sredine i bezbednosti
Primena bezbednosnih, zdravstvenih i ekoloških mera		
	Digitalna pismenost i analiza podataka u radu sistema	Prikupljanje i analiza podataka sa senzora, monitoring i optimizacija procesa
	Komunikacija, timski rad i inovacije	Rad u multidisciplinarnim timovima, profesionalni razvoj, predlaganje inovacija

5.1. Primeri modernizovanih nastavnih sadržaja i ishoda učenja

U cilju konkretnijeg prikaza pravaca modernizacije obrazovnog profila Tehničar grejanja i klimatizacije, u tabeli 2 prikazani su primeri savremenih nastavnih sadržaja i odgovarajućih ishoda učenja koji bi mogli biti integrisani u kurikulum.

Tabela 2 Primeri modernizovanih nastavnih sadržaja i ishoda učenja (Autori, 2026)

Oblast	Modernizovani nastavni sadržaji	Primer ishoda učenja
Digitalizacija HVAC sistema	Osnove PLC i SCADA sistema, senzori i aktuatori, smart HVAC sistemi	Učenik povezuje i podešava osnovne senzore temperature i pritiska i prati parametre rada sistema putem softverskog interfejsa
Energetska efikasnost	Energetski bilans objekta, optimizacija rada HVAC sistema, toplotne pumpe	Učenik analizira potrošnju energije HVAC sistema i predlaže mere za povećanje energetske efikasnosti
Održivi razvoj	Ekološki rashladni fluidi, reciklaža komponenti, smanjenje emisije CO ₂	Učenik razlikuje ekološki prihvatljive rashladne fluide i primenjuje procedure bezbednog rukovanja i reciklaže
Upravljanje kvalitetom	ISO standardi, tehnička dokumentacija, kontrola kvaliteta procesa	Učenik vodi tehničku dokumentaciju i primenjuje osnovne procedure kontrole kvaliteta pri održavanju sistema
Analiza podataka i monitoring	Prikupljanje podataka sa senzora, osnovna analiza performansi sistema	Učenik prati rad HVAC sistema na osnovu očitanih parametara i identifikuje odstupanja u radu sistema

Pored modernizacije nastavnih sadržaja, značajno je unaprediti i način realizacije nastave kroz projektnu nastavu, studije slučaja i praktičan rad u kompanijama. Na primer, učenici bi mogli realizovati projekte koji uključuju analizu energetske efikasnosti školskog objekta, izradu jednostavnog sistema automatskog upravljanja ventilacijom ili praćenje rada HVAC sistema putem senzora i softverskih alata. Na taj način učenici bi razvijali ne samo stručne kompetencije, već i digitalne veštine,

sposobnost rešavanja problema, timski rad i razumevanje principa održivog razvoja, što predstavlja ključni zahtev savremene procesne industrije.

Integracija ova dva segmenta — industrijske analize i dualnog obrazovanja — predstavlja osnovu za modernizaciju programa srednjeg stručnog obrazovanja. Time se ne samo unapređuje tehnička i praktična osposobljenost učenika, već se razvijaju i kompetencije u oblasti inovacija, digitalnog upravljanja sistemima, energetske optimizacije i principa održivosti, što direktno odgovara zahtevima savremene procesne industrije.

6. Zaključak

U ovom radu izvršena je analiza usklađenosti postojećeg standarda kvalifikacije Tehničar grejanja i klimatizacije sa savremenim zahtevima procesne industrije, koja se ubrzano razvija u pravcu digitalizacije, energetske efikasnosti i održivog razvoja. Polazeći od savremenih industrijskih trendova i koncepta Industrije 4.0, uočeno je da postojeći obrazovni profil u velikoj meri obezbeđuje osnovne tehničke kompetencije, ali da nije u potpunosti prilagođen aktuelnim tehnološkim i organizacionim promenama u industrijskom okruženju.

Rezultati analize ukazuju da su najizraženija odstupanja prisutna u oblastima digitalnih tehnologija, energetske optimizacije i integrisanog upravljanja kvalitetom. Iako su određeni elementi ovih oblasti zastupljeni u okviru postojećeg standarda, njihov nivo razrade i praktične primenljivosti nije dovoljan za potrebe savremenih procesnih sistema, posebno u kontekstu primene automatizacije, IoT rešenja i naprednih sistema upravljanja HVAC procesima.

Na osnovu identifikovanih nedostataka, razvijen je konceptualni model unapređenja obrazovnog profila, koji se zasniva na jačanju povezanosti obrazovanja i industrije, kao i na primeni dualnog modela obrazovanja. Poseban akcenat stavljen je na integraciju digitalnih i automatizovanih sistema, unapređenje kompetencija iz oblasti energetske efikasnosti i održivosti, kao i na uvođenje savremenih principa upravljanja kvalitetom u obrazovni proces. Poseban doprinos predloženog modela ogleda se u definisanju konkretnih primera modernizovanih nastavnih sadržaja i ishoda učenja usklađenih sa zahtevima Industrije 4.0.

Može se zaključiti da modernizacija ovog standard kvalifikacije predstavlja neophodan korak ka usklađivanju sistema srednjeg stručnog obrazovanja sa zahtevima savremene industrije. Implementacija predloženih unapređenja doprinela bi povećanju zapošljivosti učenika, njihovoj boljoj pripremljenosti za rad u digitalizovanim i energetski efikasnim sistemima, kao i jačanju konkurentnosti obrazovnog sistema.

7. Reference

- [1] **R. Towler and G. Sinnott**, *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Oxford, UK: Elsevier, 2013.
- [2] **R. H. Perry and D. W. Green**, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [3] **R. Smith**, *Chemical Process Design and Integration*. Chichester, UK: Wiley, 2016.
- [4] **W. F. Stoecker**, *Refrigeration and Air Conditioning*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [5] **F. C. McQuiston, J. D. Parker, and J. D. Spitler**, *Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design*, 6th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2005.
- [6] *** International Energy Agency (IEA), *Energy Efficiency 2023*. Paris, France: IEA, 2023.

- [7] *** ISO, *ISO 50001:2018 – Energy Management Systems — Requirements with Guidance for Use*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [8] *** European Union, “Directive (EU) 2018/844 on the energy performance of buildings,” Official Journal of the European Union, 2018.
- [9] **H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig**, *Recommendations for Implementing Industry 4.0*. Frankfurt, Germany: acatech, 2013.
- [10] **M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto**, “Design principles for Industrie 4.0 scenarios,” in *Proc. 49th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, 2016, pp. 3928–3937.
- [11] **H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann**, “Industry 4.0,” *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014.
- [12] *** CEDEFOP, *Vocational Education and Training in Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

Stručni rad

Ključne reči:
pravila odlučivanja;
lažno prihvatanje ili odbijanje
rezultata; ventil sigurnosti

PRIMENA PRAVILA ODLUČIVANJA NA PRIMERU ISPITIVANJA VENTILA SIGURNOSTI PREMA ILAC G8:09/2019

Key words:
decision rules; false acceptance or
rejection of results; safety valve

APPLICATION OF DECISION RULES TO SAFETY VALVE TESTING IN ACCORDANCE WITH ILAC G8:09/2019

Dejan RADIĆ*
* dradic@mas.bg.ac.rs

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-8143-3224

Opšte smernice za primenu pravila odlučivanja koje koriste laboratorije za ispitivanje date su u dokumentu ILAC G8:09/2019. Pravila odlučivanja definišu kako se merna nesigurnost uzima u obzir kada se iskazuje usaglašenost sa specificiranim zahtevom. Laboratorije koje se bave ispitivanjem ventila sigurnosti se jasno opredeljuju za neko od ponuđenih pravila odlučivanja i njega iskazuju u izveštajima o ispitivanju. Međutim, izuzetno je mali broj laboratorija za ispitivanje ventila sigurnosti koje su u svojim procedurama definisala i primenjuju postupak izračunavanja verovatnoće lažnog prihvatanja ili odbacivanja rezultata ispitivanja, pri primeni usvojenog pravila odlučivanja. U svojim izveštajima samo navode maksimalnu verovatnoću lažnog prihvatanja rezultata, a ne izračunavaju je. Cilj ovog rada je da upravo prikaže postupak procene verovatnoće lažnog prihvatanja ili odbacivanja rezultata na primeru ispitivanja ventila sigurnosti. Iako je postupak prikazan na primeru ispitivanja ventila sigurnosti, procedure statističke obrade rezultata ispitivanja su univerzalne i mogu se primeniti na druge oblasti ispitivanja.

General guidelines for the application of decision rules used by testing laboratories are given in document ILAC G8:09/2019. The decision rules define how the measurement uncertainty is taken into account when declaring conformity with the specified requirement. Laboratories dealing with safety valve testing clearly determines for one of the offered decision rules and report it in the test reports. However, there is an extremely small number of safety valve testing laboratories that have defined and apply the procedure for calculating the probability of false acceptance or rejection of test results in their procedures, when applying the accepted decision rule. In their reports, they only state the maximum probability of false acceptance of the result, and do not calculate it. The aim of this paper is to show the procedure for estimating the probability of falsely accepting or rejecting results on the example of a safety valve test. Although the procedure is shown on the example of safety valve testing, the procedures for statistical processing of test results are universal and can be applied to other areas of testing.

1. Uvod

Pravilnik o pregledima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe (Službeni glasnik RS broj 114/2021-230, 63/2023-73, 7/2025-3) [1] je u svom Prilogu VI koji se odnosi na ispitivanje ventila sigurnosti propisao obavezu da se prilikom izveštavanja o rezultatima ispitivanja obavezno daje

izjava o usaglašenosti rezultata sa kriterijumima prihvatljivosti. Za ventile sigurnosti, kriterijumi prihvatljivosti su takođe definisani odredbama ovog Pravilnika ali i standardima za pojedine konstrukcije ventila sigurnosti (na primer, standardom SRPS EN ISO 4126-1 [2] ili SRPS EN 14129 [3] za sigurnosne ventile za tečni naftni gas i td.). Prilikom davanja izjave o usaglašenosti, prema zahtevima standarda SRPS ISO/IEC 17025 [4], tela za ocenjivanje usaglašenosti, odnosno u našem slučaju laboratorije za ispitivanje koje proveravaju ventile sigurnosti, u obavezi su da definišu pravilo odlučivanja koje primenjuju. U zavisnosti od vrste ispitivanja, pravila odlučivanja mogu biti unapred definisana (na primer, zakonskom regulativom ili standardom) ili, kao u slučaju ispitivanja ventila sigurnosti, ne moraju biti unapred definisana kada je prepušteno telu za ocenjivanje usaglašenosti da ga saopšti i dogovori sa korisnikom. Opšte smernice za izbor pravila odlučivanja pri davanju izjave o usaglašenosti su definisane dokumentom ILAC-G8:09/2019 [5].

Prema ILAC-G8:09/2019, prilikom izbora pravila odlučivanja moguće je opredeliti se za jedno od sledećih pravila:

- **Pravilo 1:** Binarno pravilo jednostavnog prihvatanja rezultata. Podrazumeva da se rezultati merenja jednostavno upoređuju sa granicama specifikacije TL (za pritisak otvaranja ventila sigurnosti $\pm 3\%$) bez uzimanja u obzir merne nesigurnosti (zaštitno područje $w=0$). Rezultat je prihvatljiv ako je na donjoj granici ili iznad donje granice specifikacije i ako je na gornjoj granici ili ispod gornje granice specifikacije. Obzirom da merna nesigurnost postoji za svako merenje, jasno je da rezultat koji se nalazi tačno na gornjoj ili donjoj granici specifikacije ima verovatnoću lažnog prihvatanja ili odbijanja od čak 50%, pa se ovo pravilo odlučivanja često naziva i pravilom podeljenog rizika.
- **Pravilo 2:** Binarno pravilo sa zaštitnim područjem. Slično kao i Pravilo 1 ima kao rezultat samo prihvatanje ili odbijanje rezultata ali uzima u obzir zaštitno područje w koje se određuje u odnosu na proširenu mernu nesigurnost. U praksi za ispitivanje ventila sigurnosti najčešće se uzima zaštitno područje preporučeno od ILAC-G8:09/2019, odnosno jednako je proširenoj mernoj nesigurnosti $w=U$, mada se mogu uzeti u obzir i druge vrednosti (Tabela 1). Primenom ovog pravila, rezultat je prihvatljiv ako je na ili iznad donje granice specifikacije uvećanoj za vrednost zaštitnog područja (donja granica prihvatanja, $LAL=LTL+w$) i ako je na ili ispod gornje granice specifikacije umanjenoj za vrednost zaštitnog područja (gornja granica prihvatanja, $UAL=UTL-w$). Drugim rečima prihvatljiv opseg rezultata merenja se sužava za vrednost proširene merne nesigurnosti.
- **Pravilo 3:** Ne-binarno pravilo sa zaštitnim područjem. Ovo pravilo odlučivanja uzima u obzir zaštitno područje w identično kao i Pravilo 2 ali rezultatu ispitivanja pridružuje i mernu nesigurnost merenja. Prihvatljiv je onaj rezultat koji se nalazi unutar intervala prihvatanja koji uzima u obzir zaštitno područje ($TL-w$). Pravilo uvodi pojam uslovno prihvatljivog i uslovno odbijenog rezultata. Uslovno prihvatljiv rezultat je onaj koji se nalazi u oblasti zaštitnog područja, odnosno u intervalu $[TL-w, TL]$. Tada je rezultat merenja u granicama specifikacije ali sa proširenom mernom nesigurnošću prelazi propisane granice. Uslovno odbijen rezultat je onaj koji se nalazi van granica specifikacije ali sa pridruženom mernom nesigurnošću (odnosno zaštitnim područjem) može se naći unutar granica specifikacije. Konačno, odbijen (odnosno neusaglašen) će biti samo onaj rezultat koji se nalazi van granica specifikacije uvećanoj za zaštitno područje ($TL+w$). Taj rezultat, kada mu se pridoda proširena merna nesigurnost, se sigurno ne može naći unutar granica specifikacije i kao takav je odbijen.

Sva tri opisana pravila odlučivanja su grafički prikazana u dokumentu ILAC-G8:09/2019. Primena svakog od tri navedena pravila odlučivanja povlači određeni rizik lažnog prihvatanja ili lažnog odbijanja rezultata ispitivanja kada se rezultat nađe blizu granice prihvatanja.

Rizik lažnog prihvatanja rezultata se pojavljuje u slučaju kada je rezultat unutar intervala prihvatanja ali sa pridruženom mernom nesigurnošću može izaći iz granica specifikacije. Taj rizik je od interesa za korisnika i zato se često naziva i rizik korisnika. Najveći je pri primeni Pravila 1 i može ići do 50%, dok pri primeni Pravila 2 ako je zaštitno područje jednako proširenoj mernoj nesigurnosti ($w=U$) ne prelazi 2,5%. U Tabeli 1 su navedeni maksimalni rizici lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja pri primeni različitih vrednosti zaštitnog područja w .

Rizik lažnog odbijanja rezultata ispitivanja se pojavljuje kada je rezultata ispitivanja van granica specifikacije ali sa pridruženom mernom nesigurnošću može biti unutar granica specifikacije. Ovaj rizik je pre svega od interesa za proizvođača i zato se često naziva i rizik proizvođača.

To praktično znači da ako je rezultat u zoni prihvatanja računaće se rizik lažnog prihvatanja, a ako je u zoni odbijanja računaće se rizik lažnog odbijanja rezultata ispitivanja. Pri tome, rizik lažnog prihvatanja očigledno zavisi od:

- Udaljenosti rezultata od granice specifikacije,
- Merne nesigurnosti,
- Usvojenog zaštitnog područja.

Jasno je da što je rezultat merenja bliži granici specifikacije to rizik lažnog prihvatanja naglo raste, a što je zaštitno područje veće to je manji rizik lažnog prihvatanja rezultata. Sa druge strane, veće zaštitno područje znači veću verovatnoću lažnog odbijanja rezultata. Zaštitno područje je najefikasniji način da se smanji rizik lažnog prihvatanja rezultata ali može dovesti do toga da se preveliki broj ispravnih uzorka lažno odbaci.

Tabela 1. Rizik lažnog prihvatanja rezultata u zavisnosti od primenjenog zaštitnog područja [5]

Pravilo odlučivanja	Zaštitno područje	Rizik lažnog prihvatanja
6 sigma	3U	< 1 ppm
3 sigma	1,5U	< 0,16 %
ILAC G8 preporučeno pravilo	U	< 2,5 %
ISO 14253-1:2017	0,83U	< 5 %
Jednostavno prihvatanje	0	< 50%

Rizici lažnog prihvatanja rezultata merenja prikazani u tabeli 1 su maksimalno mogući rizici koji se mogu javiti pri usvajanju različitih zaštitnih područja. Cilj ovog rada je da prikaže metodologiju izračunavanja stvarne vrednosti ovih rizika na primeru ispitivanja pritiska otvaranja ventila sigurnosti. Iako se rad bazira na obradi rezultata ispitivanja ventila sigurnosti, metodologija je svakako primenjiva i na druga merenja.

2. Primena ILAC G8:09/2019 na oblast ispitivanja ventila sigurnosti

Kod ispitivanja ventila sigurnosti, prema Pravilniku o pregledima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe, proveravaju se sledeći parametri:

- Pritisak početka otvaranja ventila sigurnosti
- Nepropusnost u okviru koga se ispituje i pritisak zatvaranja ventila sigurnosti
- Čvrstoća kućišta hidrauličkim ili pneumatskim ispitivanjem.

Karakteristike protoka ventila se ne ispituju u redovnim pregledima tokom eksploatacije, već su deo tipskih ispitivanja koja se rade na novim ventilima sigurnosti, prema zahtevima standarda SRPS EN ISO 4126-1.

Statistički obrada rezultata ispitivanja nema smisla za hidraulička ili pneumatska ispitivanja kućišta i primenjiva je jedino na određivanje pritiska otvaranja (i zatvaranja) ventila sigurnosti.

Pri tome akreditovane laboratorije za ispitivanje pri davanju izjave o usaglašenosti, koja je prema Pravilniku [1] obavezna, moraju jasno definisati i u izveštajima iskazati:

- Rezultat merenja,
- Primenjeno pravilo odlučivanja,
- Mernu nesigurnost,
- Zaključak o ispitivanom uzorku (usaglašen / neusaglašen).

U tom pogledu zahtevi standarda SRPS ISO/IEC 17025, smernice ILAC G8:09/2019 i Pravilnika [1] su u potpunosti harmonizovani, odnosno sva tri dokumenta imaju isti pristup.

2.1. Proračun merne nesigurnosti rezultata ispitivanja ventila sigurnosti

Način na koji će telo za ocenjivanje usaglašenosti, odnosno u slučaju ispitivanja ventila sigurnosti akreditovana laboratorija za ispitivanje, procenjivati mernu nesigurnost metode ispitivanja pritiska otvaranja ventila sigurnosti je procedura koju definiše sama laboratorija. Pri tome, laboratorije su u obavezi da vrednuju uticajne faktore na mernu nesigurnost metode, a to mogu raditi na različite načine.

Za ispitivanje ventila sigurnosti jasno je da tačnost pokazivanja merila pritiska svakako predstavlja jedan od dominantnih uticaja na mernu nesigurnost metode ispitivanja. Zbog toga dokumenti koji definišu metodu ispitivanja specificiraju klasa merila pritiska (prema Pravilniku [1] to je klasa 0,6). Za grešku pokazivanja merila pritiska, umesto klase instrumenta kao maksimalno moguće greške merila, najčešće se uzima podatak o tačnosti merila iz uverenja o etaloniranju, data u formi 95% intervala poverenja. Na taj način se dobija greška tipa B (U_B).

Drugi uticajni faktori, poput karakteristika samog uzorka koji se ispituje, karakteristika ispitnog stola, obučenosti ispitivača, uslova radne sredine i drugo u opštem slučaju bi se mogli pojedinačno vrednovati. Međutim, pojedinačno vrednovanje ovih uticaja nije opravdano za ispitivanje pritiska otvaranja ventila sigurnosti. Uobičajeni pristup u našim akreditovanim laboratorijama je da se svi ostali uticajni faktori na mernu nesigurnost rezultata procenjuju na osnovu statističke obrade rezultata većeg broja ponavljanja ispitivanja. Izračunavanjem standardne devijacije ponavljanja ispitivanja pritiska otvaranja ventila sigurnosti dobija se greška tipa A. Pri tome, srednja vrednost merenja se dobija iz pojedinačno izmerenih vrednosti:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

Standardna devijacija merenja (σ) u suštini pokazuje prosečno odstupanje pojedinačnih rezultata od srednje vrednosti. Izvedena je po principu metode najmanjih kvadrata (po Gausu) i data je izrazom:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

gde je n – ukupni broj ponovljenih merenja.

Merna nesigurnost tipa A (standardna greška srednje vrednosti merenja) direktno je srazmerna izračunatoj standardnoj devijaciji i izračunava se iz izraza:

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

Važno je napomenuti, a iz jednačine (3) se to jasno vidi, da što je veći broj ponovljenih merenja greška tipa A je manja.

Kombinovana standardna merna nesigurnost se računa iz izraza:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}, \quad (4)$$

a proširena merna nesigurnost metode ispitivanja je proizvod standardne merne nesigurnosti i faktora pokrivanja koji za normalnu raspodelu i interval poverenja 95% iznosi $k=2$:

$$U = k \cdot U_C. \quad (5)$$

U tom slučaju, rezultat merenja pritiska otvaranja ventila sigurnosti se može iskazati u obliku:

$$\text{rezultat merenja} = \bar{x} \pm U, \text{ bar}. \quad (6)$$

2.2. Izračunavanje verovatnoće lažnog prihvatanja (ili odbijanja) rezultata ispitivanja ventila sigurnosti

Smernica ILAC-G8:09/2019 koristi pojmove verovatnoće lažnog prihvatanja i lažnog odbijanja rezultata ispitivanja ali ne daje detaljna uputstva za izračunavanja te verovatnoće. Ona se, međutim, relativno jednostavno može izračunati na osnovu klasične matematičke statistike kako je to u ovom radu prikazano.

Kako je ranije naglašeno, verovatnoća lažnog prihvatanja se odnosi na situaciju kada je na osnovu rezultata merenja ventil sigurnosti prihvaćen ali zbog merne nesigurnosti postoji mogućnost da je pritisak otvaranja ventila van granica tolerancije.

Prema tome, **prvi korak** o primeni pravila odlučivanja je da se definišu parametri od značaja za ocenu rezultata ispitivanja a oni obuhvataju:

- Granice specifikacije (tolerancije): za pritisak otvaranja ventila sigurnosti definisane su Pravilnikom [1] i iznose $\pm 3\%$ ili $\pm 0,1$ bar, veća od te dve vrednosti. Gornja granica tolerancije u daljem tekstu biće označena kao UTL, a donja granica kao LTL.
- Izmerenu vrednost, x .
- Proširenu mernu nesigurnost (standardna), U .
- Pretpostavlja se da greška merenja ima normalnu (Gausovu) raspodelu.

Drugi korak je definisanje pravila odlučivanja. U tački 1 ukratko su objašnjenja sva tri pravila odlučivanja koje preporučuje ILAC-G8:09/2019, a praksa je da laboratorije usvajaju ili:

- Pravilo 1 (binarno pravilo jednostavnog prihvatanje bez zaštitnog područja):

$$LTL < x < UTL, \quad (7)$$

- ili Pravilo 2 (binarno pravilo sa zaštitnim područjem) gde se definišu gornja granica prihvatanja ($UAL=UTL-w$) i donja granica prihvatanja ($LAL=LTL+w$), odnosno rezultat je prihvatljiv ako je u intervalu:

$$LTL + k \cdot U_C < x < UTL - k \cdot U_C. \quad (8)$$

Treći korak je ključan i podrazumeva izračunavanje verovatnoće da je stvarna vrednost (X_{true}) van granica prihvatanja iako je izmerena vrednost x unutar prihvatljivog opsega. Ta verovatnoća se

računa pomoću normalne raspodele. Verovatnoća lažnog prihvatanja (P_{FA}) rezultata da je stvarna vrednost van granica je suma verovatnoća da se ona nalazi ispod donje granice tolerancije i verovatnoće da se nalazi iznad gornje granice tolerancije, odnosno:

$$P_{FA} = P(X_{true} < LTL) + P(X_{true} > UTL). \quad (9)$$

Da bi se izračunale verovatnoće u jednačini (9) potrebno je izračunati Z-vrednosti normalne raspodele za postavljenu donju i gornju graničnu vrednost, odnosno:

$$Z_{LTL} = \frac{LTL - x}{U_C} \quad (10)$$

$$Z_{UTL} = \frac{UTL - x}{U_C}, \quad (11)$$

i zatim izračunati ukupnu verovatnoću lažnog prihvatanja za standardnu normalnu raspodelu $\Phi(Z)$ koja iznosi:

$$P_{FA} = \Phi\left(\frac{LTL - x}{U_C}\right) + \left[1 - \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right)\right]. \quad (12)$$

Pošto kumulativna funkcija $\Phi(Z)$ uvek predstavlja verovatnoću do vrednosti Z ("leva strana normalne raspodele"), drugi član u izrazu (12), odnosno $1 - \Phi(Z)$, praktično predstavlja ukupnu verovatnoću iznad vrednosti Z ("desna strana normalne raspodele").

Za izračunavanje vrednosti $\Phi(Z)$ moguće je koristiti tablice normalne funkcije raspodele koje su dostupne u literaturi ili softver kao na primer Excel. U Excel-u vrednost funkcije $\Phi(Z)$ se dobija pozivanjem komade: =NORM.S.DIST(Z,TRUE).

Prilikom svakog merenja, normalno je da se teži da merna nesigurnost rezultata bude višestruko manja od kriterijuma prihvatljivosti. Kada je to obezbeđeno, verovatnoće lažnog prihvatanja rezultata u slučajevima kada je rezultat blizu donje, odnosno gornje granice neće se preklapati. Kod ventila sigurnosti kriterijum prihvatljivosti rezultata pritiska otvaranja je $\pm 3\%$, dok Pravilnik [1] zahteva merila pritiska klase 0,6, a standard SRPS EN ISO 4126-1 dokazanu tačnost merenja pritiska 0,5% i bolju. Jasno je da je kod ispitivanja ventila sigurnosti uvek obezbeđena tačnost merenja višestruko bolja od kriterijuma prihvatljivosti. U tom slučaju, jednačina (12) se može uprostiti na sledeći način:

$$- \text{ U slučaju kada je rezultat merenja blizu donje granice prihvatljivosti član } \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right) \rightarrow 1$$

pa se verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata svodi na izraz:

$$P_{FA} = \Phi\left(\frac{LTL - x}{U_C}\right), \quad (13)$$

$$- \text{ U slučaju kada je rezultat merenja blizu gornje granice prihvatljivosti } \Phi\left(\frac{LTL - x}{U_C}\right) \rightarrow 0$$

pa je:

$$P_{FA} = 1 - \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right), \quad (14)$$

Na sličan način se može postupiti kada je rezultat ispitivanja izvan intervala prihvatljivosti. U tom slučaju rezultat je odbijen (neusaglašen), a od interesa je verovatnoća lažnog odbijanja rezultata

(P_{FR}). Rezultat će biti lažno odbijen ako se stvarna vrednost X_{true} nađe između granica tolerancije, a verovatnoća tog događaja je:

$$P_{FR} = P(X_{true} > LTL) + P(X_{true} < UTL). \quad (15)$$

Verovatnoća lažnog odbijanja rezultata ispitivanja, odnosno verovatnoća da se stvarna vrednost rezultata merenja koji se nalazi van intervala prihvatljivosti nađe u tim granicama se izračunava iz razlike kumulativnih funkcija, kao razlika dve vrednosti:

$$P_{FR} = \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right) - \Phi\left(\frac{LTL - x}{U_C}\right). \quad (16)$$

Ponovo, pošto je merna nesigurnost merenja višestruko manja od kriterijuma prihvatljivosti jednačina (16) se može uprostiti na sledeći način:

- U slučaju kada je rezultat merenja nešto ispod donje granice prihvatljivosti član

$$\Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right) \rightarrow 1$$

pa se verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata svodi na izraz:

$$P_{FR} = 1 - \Phi\left(\frac{LTL - x}{U_C}\right), \quad (17)$$

- U slučaju kada je rezultat merenja nešto iznad gornje granice prihvatljivosti

$$\Phi\left(\frac{LTL - x}{U_C}\right) \rightarrow 0$$

pa je:

$$P_{FR} = \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right). \quad (18)$$

3. Primer izračunavanja verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja ventila sigurnosti

U cilju jasnijeg prikazivanja primene opisanog postupka određivanja verovatnoće lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja u daljem tekstu je prikazan jedan konkretan primer. U ovom primeru usvojeno je u prvom koraku:

- Nominalna vrednost pritiska otvaranja ventila sigurnosti: 10 bar,
- Granice tolerancije: $\pm 3\%$, odnosno pritisak otvaranja treba da je u granicama (9,7 bar÷10,3 bar),
- Izmerena vrednost pritiska otvaranja: $x=10,2$ bar,
- Prema tački 2.1 izračunata proširena merna nesigurnost metode ispitivanja: $U=1\%$, što u odnosu na nominalnu vrednost pritiska otvaranja ventila sigurnosti iznosu $U=0.1$ bar.

U drugom koraku će, radi poređenja, biti analizirana oba pravila odlučivanja koje usvajaju laboratorije, odnosno Pravilo 1 i Pravilo 2.

U trećem koraku su računaju verovatnoće lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja, obzirom da je izmerena vrednost unutar granica tolerancije, a za kombinovanu mernu nesigurnost metode ispitivanja $U_C=U/2=0,05$ bar (merna nesigurnost je u ovom primeru usvojena a izračunava se kako je

objašnjeno u tački 2.1 na osnovu greške tipa A – standardne devijacije ponavljanja rezultata i greške tipa B – tačnost pokazivanja manometra iz uverenja o etaloniranju).

U ovom primeru Z-vrednosti normalne raspodele iznose:

$$Z_{LTL} = \frac{LTL - x}{U_C} = \frac{9,7 - 10,2}{0,05} = -10$$

$$Z_{UTL} = \frac{UTL - x}{U_C} = \frac{10,3 - 10,2}{0,05} = 2,$$

a standardne verovatnoće za ove funkcije iznose:

$$\Phi(Z_{LTL}) = \Phi(-10) \rightarrow 0 \quad \text{i} \quad \Phi(Z_{UTL}) = \Phi(2) = 0,97725$$

Na osnovu izračunatih Z-vrednosti i jednačine (12) dobija se da je verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja jednaka:

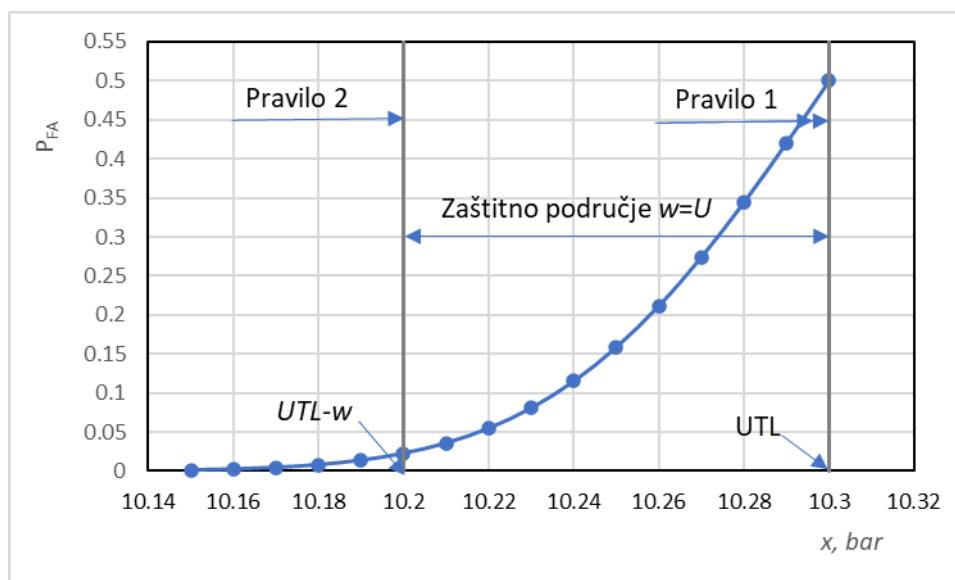
$$P_{FA} = \Phi\left(\frac{LTL - x}{U_C}\right) + \left[1 - \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right)\right] = 1 - \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right) = 1 - \Phi(2) = 1 - 0,97725 = 0,02275.$$

Ukoliko se pretpostavi da je izmerena vrednost pritiska otvaranja tačno na gornjoj granici tolerancije $x=10,3$ bar, za sve ostale iste parametre, na isti način se dobija sledeća verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja pritiska otvaranja ventila sigurnosti:

$$P_{FA} = 0 + \left[1 - \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right)\right] = 1 - \Phi\left(\frac{UTL - x}{U_C}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{10,3 - 10,3}{0,05}\right) = 1 - \Phi(0) = 1 - 0,5 = 0,5.$$

Iz prethodno izračunatih verovatnoća za izmerene vrednosti $x=10,2$ bar i $x=10,3$ bar može se zaključiti da u ovom opsegu verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja naglo raste sa vrednosti $P_{FA}=2,275\%$ (za $x=10,2$ bar) na vrednost $P_{FA}=50\%$ (za $x=10,3$ bar). Prilikom primene Pravila 1 odlučivanja (bez zaštitnog područja) poslednja prihvatljiva vrednost rezultata ispitivanja je tačno na granici tolerancije $x=10,3$ bar, a pri primeni Pravila 2 (sa zaštitnim područjem jednakim proširenoj mernoj nesigurnosti $w=U=2U_C=0,1$ bar) poslednja prihvatljiva vrednost je upravo $x=UTL-w=10,2$ bar. Na osnovu ovog primera očigledno je kako izbor primenjenog pravila odlučivanja (Pravilo 1 ili Pravilo 2), drastično utiče na verovatnoću lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja kada se on nalazi blizu granice prihvatanja. Na slici 1 prikazana je trend promena verovatnoće lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja u funkciji stvarno izmerene vrednosti pritiska otvaranja ventila sigurnosti, u zoni zaštitnog područja $w=U=0,1$ bar.

Sa dijagrama na slici 1 očigledan je uticaj izbora širine zaštitnog područja na verovatnoću lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja. Što se primeni veće zaštitno područje, odnosno što je veća merna nesigurnost merenja, jasno je da će verovatno lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja, koja je svakako najveća za vrednost $x=UTL-w$, biti manja. Međutim, kako je već ranije navedeno, u tom slučaju, raste verovatnoća lažnog odbijanja rezultata kada se on nađe van granica prihvatanja, odnosno kada je rezultat ispitivanja neusaglašen (odbijen).



Slika 1. Promena vrednosti verovatnoće lažnog prihvatanja (P_{FA}), u konkretnom primeru, kada se izmerena vrednost (x) nalazi u blizini gornje granice tolerancije (UTL)

4. Zaključak

U radu je analizirana primena različitih pravila odlučivanja prema ILAC G8:09/2019, na oblast ispitivanja pritiska otvaranja ventila sigurnosti, prilikom davanja izjave o usaglašenosti. Definisana je metodologija određivanja verovatnoće lažnog prihvatanja i lažnog odbijanja rezultata ispitivanja ventila sigurnosti, a takođe ovaj postupak je primenjen i razrađen na jednom konkretnom primeru.

Praksa je da se naše akreditovane laboratorije za ispitivanje ventila sigurnosti opredeljuju za jedno od dva binarna pravila odlučivanja: Pravilo 1 bez zaštitnog područja ili Pravilo 2 sa zaštitnim područjem koje je najčešće jednako proširenoj mernoj nesigurnosti ($w=U$). Pri tome u ogromnoj većini slučajeva u izveštajima o ispitivanju, uz pravilo odlučivanja, samo se navodi maksimalno moguća verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja koja za Pravilo 1 iznosi do 50%, a za Pravilo 2 sa zaštitnim područjem $w=U$ do 2,5%. Laboratorije najčešće ne izračunavaju stvarnu verovatnoću.

Važno je istaći da su akreditovane laboratorije koje se bave ovim ispitivanjima i primenjuju Pravilo 1 u obavezi da vode računa o zahtevu standarda ILAC G8:09/2019 koji u svom Appendix-u B navodi da se ovo pravilo odlučivanja može primenjivati uz uslov da proširena merna nesigurnost ispitivanja U mora biti manja od $1/3$ granice tolerancije. Pošto su granice tolerancije za ispitivanje pritiska otvaranja ventila sigurnosti $\pm 3\%$, to znači da se pri primeni Pravila 1 mora ispoštovati zahtev da proširena merna nesigurnost ispitivanja bude manja od 1%, odnosno ako je interval poverenja 95% i faktor pokrivanja $k=2$ to znači da je uslov za primenu Pravila 1 da kombinovana merna nesigurnost U_C metode ispitivanja pritiska otvaranja mora biti manja od 0,5%.

Ventili sigurnosti svakako predstavljaju kritičan element opreme pod pritiskom jer su poslednja bezbednosna zaštita – štite opremu pod pritiskom od prekoračenja maksimalnog dozvoljenog pritiska. Uzimajući u obzir tu činjenicu, logično je da se usvoji da ciljana vrednost verovatnoće lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja ne sme biti visoka, odnosno cilja se verovatnoća lažnog prihvatanja reda veličine nekoliko procenata. Zbog toga, u ovom radu se kao preporučeno Pravilo odlučivanja predlaže Pravilo 2, u kome verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja, kada je rezultat blizu granice prihvatanja, nije veća od 2,5%.

Takođe, treba istaći da akreditovane laboratorije za ispitivanje ventila sigurnosti koje u izveštajima o ispitivanju navode samo maksimalnu vrednost verovatnoće lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja, bez izračunavanja te verovatnoće, na određeni način dovode u zabunu korisnika. U ogromnoj većini slučajeva, rezultat ispitivanja pritiska otvaranja ventila sigurnosti je daleko od granica tolerancije, odnosno u oblasti je gde merna nesigurnost metode uopšte ne utiče na kriterijume prihvatljivosti. Ventili sigurnosti su uređaji koji se jednostavno podešavaju i rezultat merenja pritiska otvaranja je na taj način lako približiti nominalnoj vrednosti, odnosno udaljiti od granica tolerancije. To suštinski znači da je u ogromnoj većini ispitivanja, iako se u izveštajima za pravilo odlučivanja navodi drugačije, izmerena vrednost pritiska otvaranja sa izračunatom mernom nesigurnosti u sigurnoj zoni, što obezbeđuje da je verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja praktično jednaka nuli. Laboratorije i u tim slučajevima, u izveštajima o ispitivanju, navode, na primer, da primenjuju Pravilo 1 odlučivanja uz verovatnoću lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja do 50%. Postavlja se pitanje, zašto u izveštajima o ispitivanju navoditi da je maksimalna verovatnoća lažnog prihvatanja do 50%, ako se ona može izračunati i dokazati da je daleko manja, a najčešće je za konkretno izmerenu vrednost, u slučaju kada merna nesigurnost ne može uticati na kriterijum prihvatanja rezultata, toliko mala da iznosi 0%?

Verovatnoću lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja u većini merenja uopšte nema potrebe računati, obzirom da laboratorija mernu nesigurnost može adekvatno proceniti za svako merenje i argumentovano tvrditi da je rezultat u sigurnoj zoni. Verovatnoću lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja potrebno je računati i iskazati njenu stvarnu vrednost samo u slučajevima kada je rezultat blizu granica prihvatanja. Ukoliko je rezultat u sigurnoj zoni, daleko od granica prihvatanja, akreditovane laboratorije u svom izveštaju o ispitivanju mogu argumentovano, i bez proračuna, navoditi da je verovatnoća lažnog prihvatanja rezultata ispitivanja približno nula procenata.

Na kraju, treba još jednom istaći, da se za rezultat koji se nalazi izvan oblasti prihvatanja rezultata u izveštaju o ispitivanju navodi da je ventil sigurnosti neusaglašen (odbijen), a u tom slučaju ima smisla računati samo verovatnoću lažnog odbijanja ventila sigurnosti.

5. Literatura

- [1] ***, Pravilnik o pregledima opreme pod pritiskom tokom veka upotrebe, Službeni glasnik RS broj 114/2021-230, 63/2023-73, 7/2025-3.
- [2] ***, SRPS EN ISO 4126-1:2014, Sigurnosni uređaji za zaštitu od previsokog pritiska — Deo 1: Sigurnosni ventili, Institut za standardizaciju Srbije, 2014.
- [3] ***, SRPS EN 14129:2024, Опрема и прибор за ТНГ – Сигурносни вентили за растерећење посуда под притиском за ТНГ, Institut za standardizaciju Srbije, 2024.
- [4] ***, SRPS ISO/IEC 17025:2017, Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje, Institut za standardizaciju Srbije, 2017.
- [5] ***, ILAC-G8:09/2019, Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity, ILAC, 2019.

Stručni rad

Ključne reči:

dekarbonizacija industrije;
procesna tehnika;
European Green Deal;
cirkularna ekonomija

Key words:

decarbonization of industry;
process engineering;
European Green Deal;
circular economy

Miloš IVOŠEVIĆ*

* mivosevic@mas.bg.ac.rs

Nikola BUDIMIR

Nikola KARLIČIĆ

Branislav GAJIĆ

KAKO EVROPSKA POLITIKA OBLIKUJE BUDUĆNOST PROCESNE TEHNIKE

HOW EUROPEAN POLICY SHAPES THE FUTURE OF PROCESS ENGINEERING

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0001-8167-5672

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0001-9359-9240

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-5510-9500

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-6651-0498

Evropska politika, kroz European Green Deal, Fit for 55, reformu ETS-a, implementaciju CBAM-a, taksonomiju održivih finansija, industrijsku strategiju EU i Inovacione fondove, usmerava disciplinu procesne tehnike ka dekarbonizaciji, digitalizaciji i cirkularnoj ekonomiji. Ovaj rad analizira regulatorni okvir, tehnološke implikacije na projektovanje, vođenje i optimizaciju procesa, kao i obrazovne i istraživačke posledice za formiranje nove generacije inženjera. Dodatno, razmatra se finansijska i infrastrukturna izvodljivost tranzicije i rizici implementacije. Zaključak ističe potrebu za integrisanim pristupom u kojem se klimatski ciljevi i industrijska konkurentnost saglasno ostvaruju [1–9].

European policy, through the European Green Deal, Fit for 55, the reform of the ETS, the implementation of CBAM, the sustainable finance taxonomy, the EU industrial strategy, and Innovation Funds, is steering the discipline of process engineering toward decarbonization, digitalization, and the circular economy. This paper analyzes the regulatory framework, the technological implications for process design, operation, and optimization, as well as the educational and research consequences for shaping a new generation of engineers. In addition, the financial and infrastructural feasibility of the transition and the risks of implementation are examined. The conclusion highlights the need for an integrated approach in which climate goals and industrial competitiveness are achieved in harmony [1–9].

1. Uvod

Procesna tehnika, kao multidisciplinarna osnova hemijske proizvodnje, stoji u središtu evropske tranzicije ka klimatskoj neutralnosti. Značaj ove discipline proističe iz njene sposobnosti da multiplikuje uštede i smanjenja emisija kroz projektni dizajn, izbor rute i parametara procesa, upravljanje energijom i integraciju povratnih tokova. European Green Deal i Fit for 55 postavljaju jasne numeričke ciljeve (–55% emisija do 2030, neto nula do 2050), dok industrijska strategija EU i taksonomija održivih finansija uvode kriterijume i mehanizme za usmeravanje kapitala ka tehnologijama niskog

ugljenika [1-3]. U takvom okviru, procesna tehnika nije samo „izvođač radova“ klimatske politike, nego i njen ko-dizajner: kroz izbor tehnoloških ruta, integraciju otpadne toplote, elektrifikaciju kritičnih jedinica, merenje i verifikaciju emisija, te digitalnu orkestraciju kompleksnih sistema [4, 5].

2. Regulatorni okvir: Green Deal, Fit for 55, ETS i CBAM

u odnosu na procesnu tehniku

Green Deal definiše strateški horizont, a Fit for 55 ga operacionalizuje kroz reforme ETS-a (smanjenje „cap“, jačanje linearne redukcije, smanjenje besplatnih alokacija i povezivanje sa CBAM-om), proširenje regulacije na zgrade/transport, unapređenje standarda efikasnosti i ubrzanje obnovljivih izvora [2-4]. Za procesnu tehniku, to znači da se granice dizajna pomeraju: projektovanje se mora voditi metrikama emisija po jedinici proizvoda, uz certificirane metodologije LCA (Life Cycle Assessment) i MRV (Measurement, Reporting, Verification) [3, 4]. CBAM (Carbon Border Adjustment mechanism), iako trgovinski instrument, ima direktne inženjerske implikacije – evropske fabrike moraju dokazivo kvantifikovati ugrađene emisije po proizvodu, a uvozni inputi (npr. amonijak, urea, metanol) moraju dolaziti sa transparentnim emisijskim faktorima kako bi se izbegle karbonske penalizacije [3]. Taksonomija i Inovacioni fond EU zatim presudno utiču na bankabilnost projekata elektrifikacije, CCS/CCU (Carbon Capture and Storage/ Carbon Capture and Utilization) i vodonika: bez jasnog taksonomskog „zelena“ statusa, trošak kapitala ostaje visok, a rizik implementacije neprihvatljiv [2, 6].

3. Tehnološke implikacije: dekarbonizacija,

elektrifikacija, vodonik i CCS/CCU

Dekarbonizacija procesa obuhvata tri fronta. Prvi je elektrifikacija: zamena termičkih jedinica električnim (električne peći, indukcione i otporničke tehnologije), integracija visokotemperaturnih toplotnih pumpi, te strateški PPA (Power Purchase Agreement) ugovori sa proizvođačima obnovljive energije kako bi se oborio CO₂ intenzitet ulazne električne energije [4-6]. Drugi front je vodonik: zeleni vodonik (elektroliza uz obnovljivu električnu energiju) i plavi vodonik (parno reformisanje uz hvatanje CO₂) menjaju sirovine i energente u amonijačnoj, metanolskoj i rafinerskoj hemiji; inženjerski izazovi su dimenzionisanje elektrolizera, sigurnosna integracija H₂ u postojeće sisteme, te ekonomija skale u klasterima [5, 7]. Treći front su CCS/CCU rute: hvatanje na dimnim gasovima, post-kombustiono ili direktno na procesu, transport CO₂ cevovodima i geološko skladištenje ili konverzija u hemijske proizvode (urea, metanol, karbonati), gde procesna tehnika zadire u separacione tehnologije, termodinamiku mešavina i optimizaciju ciklusa [4, 7]. Sve tri rute zahtevaju snažnu digitalnu infrastrukturu (napredni softverski modeli, digitalni blizanci, MPC – Model Predictive Control), standarde merenja i verifikacije, te integraciju sa finansijskim i regulatornim zahtevima [5, 8].

4. Digitalizacija i operativna izvrsnost

Digitalni blizanci postrojenja, kalibrisani istorijskim i real-time podacima, omogućavaju scenario-planiranje i optimizacije uz preciznu procenu emisijskih i energetskih učinaka promene parametara [5, 8]. IoT senzorski stubovi sakupljaju granularne podatke, dok AI modeli identifikuju energetske gubitke, predviđaju ispade i generišu optimalne rasporede operacija u okviru dozvoljenih karbonskih budžeta. U tom režimu, procesna tehnika prelazi iz statičnog dizajna u dinamičko upravljanje performansama, povezujući OPEX uštede sa smanjenjem emisija i povećanjem raspoloživosti opreme [5, 8].

5. Cirkularna ekonomija i bio-bazirane rute

Cirkularne rute (hemijska reciklaža plastike, depolimerizacija, piroliza, solvoliza) transformišu raspoloživost sirovina, smanjujući oslanjanje na fosilne izvore i emisijski intenzitet po toni proizvoda. Bio-bazirane platforme (fermentacija do monomera, biokataliza) uvode nove procesne topologije sa drugačijim energetskim profilom i kontrolom nečistoća [1, 8, 9]. Za procesnu tehniku, to znači projektovanje integrisanih sistema koji minimizuju otpadne tokove, standardizuju kvalitet reciklata, i implementiraju MRV protokole za dokazivanje smanjenja emisija u skladu sa EU taksonomijom [2, 6, 9].

6. Obrazovanje, istraživanje i finansijska izvedivost

Tranzicija zahteva novu kompetenciju: inženjere koji simultano upravljaju termodinamikom, kinetikom i digitalnom analitikom, razumeju ETS/CBAM logiku, i umeju da argumentuju bankabilnost projekata u okvirima taksonomije [2, 6]. Kurikulumi se šire na LCA, MRV, energetsku ekonomiku i upravljanje rizikom, dok industrijsko-akademska partnerstva ubrzavaju prelaz tehnologija sa TRL 4–5 (Technology Readiness Level) na TRL 8–9 [6, 9]. Finansijski, ključ je kombinovanje grantova (Innovation Fund), povoljnih kredita (EIB), PPA ugovora i korporativnih zelenih obveznica kako bi se smanjio ponderisani trošak kapitala; bez toga, elektrifikacija i CCS projekti teško prelaze investicionu barijeru [2, 6, 7].

7. Zaključak

Evropska politika ne samo da definiše ciljeve već i menja inženjersku praksu procesne tehnike, zahtevajući kvantifikovane emisijske metrike, digitalnu izvrsnost i integraciju obnovljivih ruti. Kratkoročni izazovi su viši troškovi i složenija implementacija; srednjoročno, industrija koja usvoji elektrifikaciju, vodonik, CCS/CCU i cirkularne rute, te obezbedi finansijsku strukturu u skladu sa taksonomijom, može povratiti konkurentnost kroz diferencijaciju i otpornost [2, 4, 7]. Akademska zajednica je ključni akcelerator, a procesna tehnika - kao disciplina - postaje operativni jezik evropske industrijske transformacije.

8. Zahvalnica

Rad je finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

9. References

- [1] *** The European Green Deal, European Commission, 2019-2025 (consolidated updates).
- [2] *** Fit for 55: Legislative Package Overview, European Commission, 2024-2025.
- [3] *** EU ETS: Cap reduction and MRV guidance, European Commission, 2025.
- [4] *** CBAM: Transitional phase and methodology, European Commission, 2024-2025.
- [5] **Smith, J. H., Müller**, Digital Twins and Advanced Control in Chemical Plants, *Journal of Process Technology*, 18 (2025), issue 2, pp. 11–55.
- [6] *** EU Taxonomy and Sustainable Finance for Industrial Projects, European Investment Bank (EIB), 2024-2025.
- [7] *** Decarbonizing European Chemicals: Electrification, Hydrogen and CCS, KPMG International, 2025.
- [8] *** Industrial Digitalization and Net-Zero Operations, World Economic Forum, 2025.
- [9] *** Circular Economy Pathways in Energy-Intensive Industries, OECD, 2024.

Originalni naučni rad

<https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.305>

Ključne reči:

PM2.5; kvalitet vazduha; EU Direktiva
2024; prekoračenje graničnih
vrednosti; Srbija

**PRIMENA NOVE EU DIREKTIVE O KVALITETU VAZDUHA
I PROCENA PREKORAČENJA PM2.5 U SRBIJI:
IMPLIKACIJE NA GODIŠNJU KLASIFIKACIJU ZAGAĐENJA**

Key words:

PM2.5; air quality; EU Directive
2024; limit value exceedance; Serbia

**APPLICATION OF THE NEW EU AIR QUALITY DIRECTIVE
AND ASSESSMENT OF PM2.5 EXCEEDANCES IN SERBIA:
IMPLICATIONS FOR ANNUAL AIR POLLUTION
CLASSIFICATION**

Aleksandar MADŽAREVIĆ*

* aleksandar.madzarevic@rgf.bg.ac.rs

Miroslav CRNOGORAC

Filip MILETIĆ

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-8997-1393

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-8078-2684

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0001-5402-5818

Ovaj rad analizira implikacije primene nove EU Direktive o kvalitetu vazduha iz novembra 2024. godine na stanje kvaliteta vazduha u Srbiji, sa posebnim fokusom na suspendovane čestice PM2.5. Direktiva po prvi put uvodi dnevnu graničnu vrednost od $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, uz dozvoljeno maksimalno 18 dana prekoračenja u toku jedne kalendarske godine. Cilj istraživanja je da prikaže kako bi izgledala klasifikacija kvaliteta vazduha u Srbiji kada bi se ovi kriterijumi odmah primenili na dostupne podatke sa automatskih mernih stanica. Analiza podataka za januar 2026. godine pokazuje da je u velikom broju gradova već tokom prvog meseca premašen dozvoljeni godišnji limit od 18 dana sa prekoračenjem dnevne koncentracije PM2.5. U pojedinim urbanim sredinama zabeleženo je prekoračenje tokom svih 31 dana, što bi prema novim pravilima značilo da je vazduh za celu godinu ocenjen kao zagađen. Rezultati ukazuju da problem nije ograničen na pojedinačne lokalitete, već je široko rasprostranjen i obuhvata različite regione zemlje. Rad naglašava značaj usklađivanja nacionalnog zakonodavstva sa evropskim standardima, kao i potrebu za sistemskim merama smanjenja emisija iz sektora grejanja, saobraćaja i industrije. Zaključuje se da bi primena strožih kriterijuma dovela do realnijeg sagledavanja stanja i mogla poslužiti kao snažan podsticaj za unapređenje politika zaštite vazduha i javnog zdravlja u Srbiji.)

This paper analyzes the implications of the new EU Air Quality Directive adopted in November 2024 for air quality assessment in Serbia, with a particular focus on fine particulate matter (PM2.5). For the first time, the Directive introduces a daily limit value of $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM2.5, allowing a maximum of 18 exceedance days per calendar year. The aim of this study is to evaluate how air quality in Serbia would be classified if these criteria were immediately applied to data obtained from the national automatic monitoring network. The analysis of data for January 2026 indicates that in numerous cities the annual limit of 18 exceedance days was surpassed within the first month of the year. In several urban areas, exceedances were recorded on all 31 days, which, under the new EU standards, would result in the classification of air quality as polluted for the entire year. The findings demonstrate that the issue is not limited to isolated locations but is geographically widespread, affecting cities of different sizes and regions across the country. The paper highlights the importance

of harmonizing national legislation with updated European standards and emphasizes the need for systemic emission reduction measures in the residential heating, transport, and industrial sectors. It is concluded that the adoption of stricter criteria would provide a more realistic assessment of air quality conditions and could serve as a strong policy driver for improving air protection strategies and safeguarding public health in Serbia.

1. Uvod

Kvalitet vazduha predstavlja jedan od najznačajnijih izazova savremene politike zaštite životne sredine, posebno u urbanim sredinama u kojima su koncentrisani izvori emisija iz saobraćaja, industrije i individualnih sistema grejanja. Intenzivna urbanizacija, rast broja vozila, kao i značajna upotreba fosilnih goriva u energetsom i sektoru domaćinstava doprinose povećanju koncentracija zagađujućih materija u atmosferi. Posledice ovakvog zagađenja ne odražavaju se samo na stanje životne sredine, već imaju i značajne negativne efekte na javno zdravlje, ekonomiju i kvalitet života stanovništva. Posebnu pažnju u savremenim istraživanjima i politikama zaštite vazduha imaju suspendovane čestice prečnika manjeg od 2.5 mikrometara (PM_{2.5}) [1, 2]. Ove čestice su dovoljno male da mogu prodreti duboko u respiratorni sistem, dopreti do alveola u plućima, a u određenim slučajevima čak i ući u krvotok. Zbog toga su povezane sa povećanim rizikom od respiratornih i kardiovaskularnih bolesti, uključujući hronične bolesti pluća, srčane udare i povećanu stopu prerane smrtnosti. Veliki broj epidemioloških studija pokazuje da dugotrajna izloženost povišenim koncentracijama PM_{2.5} predstavlja jedan od najvažnijih faktora rizika za zdravlje stanovništva u urbanim sredinama [3].

U cilju smanjenja negativnih uticaja zagađenja vazduha, Evropska unija kontinuirano unapređuje regulatorni okvir koji definiše granične vrednosti za ključne zagađujuće materije u ambijentalnom vazduhu. U novembru 2024. godine usvojena je nova Direktiva o kvalitetu vazduha, kojom se uvode strožiji standardi za praćenje i kontrolu koncentracija zagađujućih materija, sa ciljem postepenog približavanja preporukama Svetske zdravstvene organizacije [1]. Ova direktiva predstavlja važan korak ka unapređenju zaštite zdravlja građana i smanjenju negativnih efekata zagađenja na životnu sredinu. Jedna od ključnih novina direktive odnosi se na suspendovane čestice PM_{2.5}, za koje je po prvi put definisana dnevna granična vrednost od 25 µg/m³, uz maksimalno dozvoljenih 18 dana prekoračenja u toku kalendarske godine. Uvođenje ovog kriterijuma omogućava preciznije praćenje kratkotrajnih epizoda zagađenja koje su često povezane sa zimskim periodom i povećanom potrošnjom energenata za grejanje. Istovremeno, ovakav pristup omogućava realnije sagledavanje izloženosti stanovništva povišenim koncentracijama čestica tokom godine [1,3].

S obzirom na to da Srbija teži harmonizaciji svog zakonodavstva sa propisima Evropske unije, analiza potencijalnih posledica primene ovih standarda ima veliki značaj za planiranje budućih politika zaštite vazduha. Iako su određeni koraci već preduzeti u pravcu unapređenja sistema monitoringa i upravljanja kvalitetom vazduha, u brojnim urbanim sredinama i dalje se beleže česte epizode povišenih koncentracija suspendovanih čestica, naročito tokom zimskog perioda. Posebno je važno sagledati kako bi nova pravila uticala na klasifikaciju kvaliteta vazduha u domaćim urbanim sredinama, kao i na procenu učestalosti prekoračenja dozvoljenih koncentracija. Cilj ovog rada je da analizira stanje kvaliteta vazduha u Srbiji u odnosu na kriterijume nove evropske direktive, sa posebnim fokusom na koncentracije PM_{2.5} i učestalost prekoračenja dnevnih graničnih vrednosti. Analiza se zasniva na podacima sa automatskih mernih stanica i ima za cilj da prikaže kako bi izgledala klasifikacija kvaliteta vazduha u Srbiji ukoliko bi se novi evropski kriterijumi primenili na postojeće podatke. Rezultati istraživanja mogu doprineti boljem razumevanju trenutnog stanja, ali i poslužiti kao osnova za definisanje efikasnijih mera za smanjenje emisija i unapređenje kvaliteta vazduha u budućnosti.

2. Pregled literature

Kvalitet vazduha i posebno koncentracije suspendovanih čestica PM_{2.5} predstavljaju jedan od najvažnijih izazova savremene politike zaštite životne sredine. Veliki broj istraživanja ukazuje da su fine čestice povezane sa povećanim rizikom od respiratornih i kardiovaskularnih bolesti, kao i povećanom stopom mortaliteta u urbanim sredinama. Zbog toga su međunarodne organizacije i regulatorna tela poslednjih decenija značajno pooštrila standarde za praćenje i kontrolu ovih zagađujućih materija.

Evropska unija već duži niz godina razvija regulatorni okvir za upravljanje kvalitetom vazduha kroz Direktivu o ambijentalnom vazduhu. Najnovija revizija ovog zakonodavstva doneta je 2024. godine i predstavlja značajan korak ka usklađivanju evropskih standarda sa preporukama Svetske zdravstvene organizacije. Novom direktivom uvode se strožiji granični nivoi za ključne zagađivače, uključujući suspendovane čestice PM_{2.5} i PM₁₀, azot-dioksid i druge zagađujuće materije [1]. Posebno značajna promena odnosi se na PM_{2.5}, za koje je uvedena nova dnevna granična vrednost od 25 µg/m³ koja ne sme biti prekoračena više od 18 dana tokom kalendarske godine. Istovremeno je planirano smanjenje godišnje granične vrednosti sa 25 µg/m³ na 10 µg/m³ do 2030. godine. Prema izveštajima Evropske agencije za životnu sredinu, koncentracije PM_{2.5} u Evropi pokazuju dugoročni trend opadanja, ali i dalje predstavljaju značajan zdravstveni rizik. U 2023. godini mali procenat mernih stanica premašivao je postojeće EU granične vrednosti, dok je znatno veći broj stanica i dalje prelazio preporučene vrednosti Svetske zdravstvene organizacije, koje su znatno strože. Istraživanja takođe ukazuju da su epizode visokih koncentracija PM_{2.5} često povezane sa lokalnim izvorima emisija i nepovoljnim meteorološkim uslovima [1, 2]. U urbanim sredinama značajan doprinos zagađenju daju individualna ložišta na čvrsta goriva, drumski saobraćaj i određeni industrijski procesi. Tokom zimskog perioda, temperaturne inverzije i slaba cirkulacija vazduha mogu dodatno pogoršati kvalitet vazduha i dovesti do kratkotrajnih, ali intenzivnih epizoda zagađenja. Posebnu pažnju u naučnoj literaturi privlači pitanje usklađivanja nacionalnih politika sa evropskim standardima u zemljama koje se nalaze u procesu pristupanja Evropskoj uniji. U tim zemljama, uključujući države Zapadnog Balkana, zagađenje vazduha često predstavlja ozbiljniji problem nego u većem delu Evropske unije, pre svega zbog strukture energetskog sektora, zastupljenosti individualnih sistema grejanja i sporije modernizacije industrije.

U tom kontekstu, analiza potencijalnih efekata primene novih evropskih standarda na postojeće podatke o kvalitetu vazduha predstavlja važan istraživački pravac. Takve analize omogućavaju procenu koliko su trenutne koncentracije zagađujućih materija udaljene od budućih regulatornih ciljeva, kao i identifikaciju ključnih sektora u kojima su potrebne dodatne mere za smanjenje emisija. Brojna istraživanja potvrđuju da je zagađenje vazduha jedan od vodećih globalnih faktora rizika po zdravlje stanovništva. Analize sprovedene u okviru Global Burden of Disease Study pokazuju da dugotrajna izloženost finim suspendovanim česticama PM_{2.5} značajno doprinosi povećanju mortaliteta i učestalosti respiratornih i kardiovaskularnih oboljenja na globalnom nivou [4]. Prema procenama predstavljanim u časopisu *The Lancet*, ambijentalno zagađenje vazduha svake godine uzrokuje milione pre vremena smrti širom sveta, pri čemu PM_{2.5} predstavlja jedan od najznačajnijih pojedinačnih faktora rizika [3, 4]. Dalja istraživanja naglašavaju da su zdravstveni efekti zagađenja vazduha posebno izraženi u regionima sa intenzivnom upotrebom fosilnih goriva i nedovoljno razvijenim sistemima kontrole emisija [5, 6]. Rezultati novijih analiza takođe ukazuju da i relativno male promene u dugoročnim koncentracijama PM_{2.5} mogu imati značajan uticaj na javno zdravlje, što dodatno naglašava značaj strožih regulatornih standarda i efikasnih politika upravljanja kvalitetom vazduha [7].

3. Potreba, regulatorni okvir i nova EU Direktiva o kvalitetu vazduha

Zagađenje vazduha predstavlja jedan od najozbiljnijih ekoloških i javno zdravstvenih problema u Srbiji. Dugoročna merenja koncentracija suspendovanih čestica ukazuju da se u brojnim urbanim sredinama redovno beleže vrednosti koje značajno premašuju preporučene smernice za kvalitet vazduha. Posebno su izražene epizode povećanih koncentracija PM_{2.5} tokom zimskog perioda, kada kombinacija intenzivnog korišćenja čvrstih goriva u individualnim ložištima, emisija iz saobraćaja i nepovoljnih meteoroloških uslova dovodi do akumulacije zagađujućih materija u prizemnom sloju atmosfere. Prema procenama World Health Organization, dugotrajna izloženost povišenim koncentracijama finih suspendovanih čestica značajno povećava rizik od respiratornih i kardiovaskularnih bolesti, dok zagađenje vazduha predstavlja jedan od vodećih faktora rizika za preranu smrtnost u Evropi [2]. U zemljama Zapadnog Balkana ovaj problem je dodatno izražen zbog strukture energetskog sektora, značajne upotrebe uglja i čvrstih goriva u domaćinstvima, kao i sporijeg procesa modernizacije industrijskih postrojenja i sistema grejanja. U poređenju sa državama članicama Evropske unije, zemlje Zapadnog Balkana beleže znatno veće koncentracije suspendovanih čestica u ambijentalnom vazduhu. Analize koje objavljuje European Environment Agency pokazuju da iako se kvalitet vazduha u Evropi postepeno poboljšava zahvaljujući strožim regulativama i tehnološkim unapređenjima, značajan deo stanovništva i dalje je izložen koncentracijama PM_{2.5} iznad preporučenih vrednosti Svetske zdravstvene organizacije. Ovaj problem je posebno izražen u regionu jugoistočne Evrope, gde su koncentracije čestica često višestruko veće od vrednosti koje se smatraju bezbednim za zdravlje ljudi. U tom kontekstu, Srbija se svrstava među zemlje sa izraženim epizodama zimskog zagađenja, što ukazuje na potrebu za sistemskim merama koje obuhvataju energetska tranziciju, modernizaciju sistema grejanja i unapređenje politika upravljanja kvalitetom vazduha.

Politika Evropske unije u oblasti zaštite vazduha kontinuirano se razvija sa ciljem smanjenja negativnih uticaja zagađenja na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Nova Direktiva o kvalitetu vazduha iz 2024. godine predstavlja značajan korak ka usklađivanju evropskih standarda sa preporukama Svetske zdravstvene organizacije [1, 2]. Jedna od ključnih novina direktive odnosi se na strože kriterijume za suspendovane čestice PM_{2.5}. Pored postojećih godišnjih graničnih vrednosti, uvedena je i dnevna granična vrednost od 25 µg/m³ [1]. Direktiva takođe ograničava broj dana u toku godine kada ova vrednost može biti prekoračena na najviše 18 [1].

Ovakav pristup omogućava preciznije praćenje kratkoročnih epizoda zagađenja, koje često imaju najveći uticaj na zdravlje stanovništva. Istovremeno, postavlja se znatno veći izazov za države koje se suočavaju sa čestim epizodama visokih koncentracija čestica tokom zimskog perioda. Za zemlje koje se nalaze u procesu pristupanja Evropskoj uniji, uključujući Srbiju, ovi standardi predstavljaju važan referentni okvir za unapređenje nacionalnog zakonodavstva i sistema upravljanja kvalitetom vazduha.

4. Metodologija istraživanja i rezultati analize

4.1. Metodološki pristup

U ovom radu analizirani su podaci o koncentracijama PM_{2.5} sa automatskih mernih stanica u Srbiji. Podaci obuhvataju dnevne vrednosti koncentracija za januar 2026. godine, što omogućava procenu učestalosti prekoračenja u odnosu na kriterijume nove evropske direktive. Metodološki pristup zasniva se na sledećim koracima:

- prikupljanje dnevnih koncentracija PM_{2.5} sa dostupnih automatskih stanica,
- identifikacija dana u kojima je koncentracija prelazila 25 µg/m³,

- poređenje broja prekoračenja sa maksimalno dozvoljenim godišnjim limitom od 18 dana,
- analiza prostornih obrazaca zagađenja u različitim gradovima Srbije.

Posebna pažnja posvećena je proceni koliko brzo se dostiže godišnji limit prekoračenja ukoliko se kriterijumi nove direktive primene na postojeće podatke [1, 8].

4.2. Rezultati analize

Rezultati analize pokazuju da je u velikom broju gradova u Srbiji već tokom januara 2026. godine premašen dozvoljeni godišnji limit od 18 dana sa prekoračenjem dnevne koncentracije PM2.5. U pojedinim urbanim sredinama zabeležena su prekoračenja tokom gotovo svih dana u mesecu, odnosno čak 31 dan. Ukoliko bi se primenili kriterijumi nove evropske direktive, to bi značilo da je dozvoljeni godišnji limit prekoračenja iscrpljen već tokom prvog meseca godine.

Ovakav rezultat ukazuje na ozbiljan problem epizodnog zagađenja tokom zimskog perioda, koji je uglavnom povezan sa:

- intenzivnim korišćenjem individualnih sistema grejanja,
- nepovoljnim meteorološkim uslovima,
- emisijama iz saobraćaja,
- lokalnim industrijskim izvorima.

Analiza takođe pokazuje da problem nije ograničen na nekoliko izolovanih lokaliteta, već da se javlja u različitim regionima Srbije, što ukazuje na sistemsku prirodu problema. U tom kontekstu nastavak rada se fokusirao na izbor 4 grada iz različitih regiona Republike Srbije koji će opisati situaciju sa primenama kriterijuma nove EU direktive na godišnji limit prekoračenja zagađenja PM2.5 česticama.

4.3. Studija slučaja

Za potrebe ukazivanja na sistematsku prirodu problema odabrana su 4 grada na oprečnim stranama sveta, u različitim regionima, sa drugačijim demografskim, geografskim, topografskim i klimatskim odlikama to su Negotin, Užice, Vranje i Sombor.

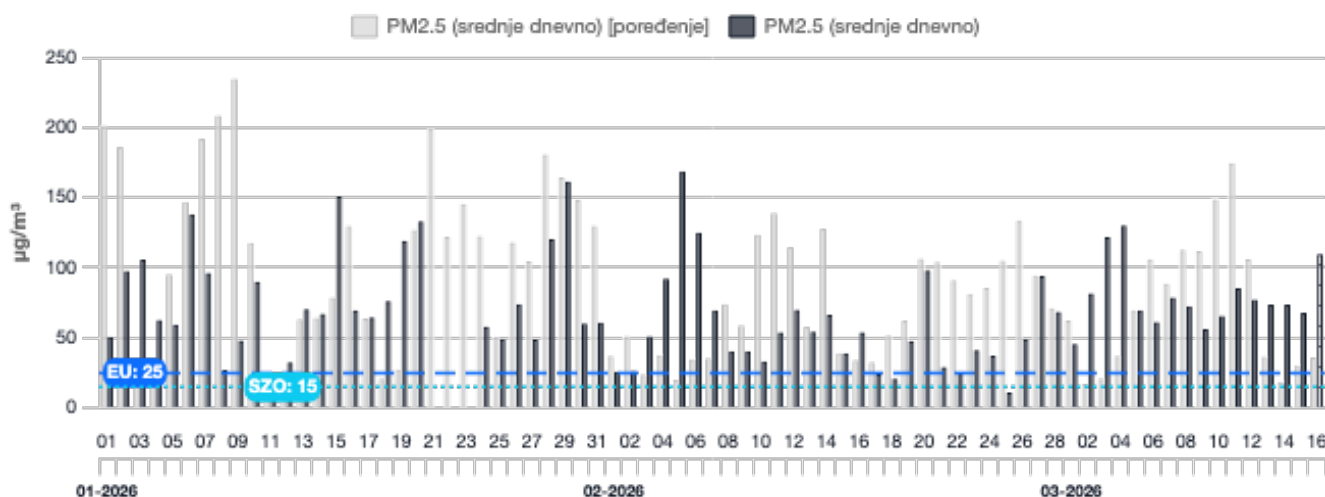
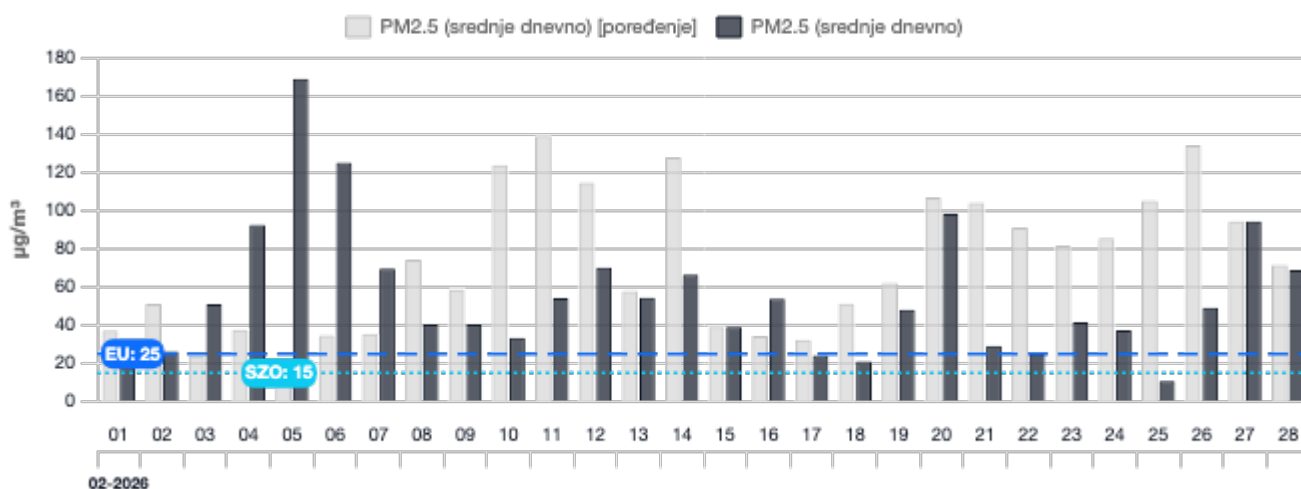
5. Negotin

Grad Negotin nalazi se u istočnoj Srbiji, u blizini granice sa Rumunijom i Bugarskom, i predstavlja administrativni, privredni i kulturni centar Borskog okruga. Poznat je po bogatoj istoriji, ali i po vinogradarstvu i proizvodnji vina, što ga čini jednim od značajnijih vinarskih regiona u Srbiji. U blizini Negotina nalazi se i hidroenergetski sistem Đerdap na Dunavu, koji ima veliki značaj za energetiku zemlje. Grad se nalazi na nadmorskoj visini od oko 42 m i ima umereno-kontinentalnu klimu sa izraženim temperaturnim oscilacijama. U poslednje vreme, Negotin se suočava sa izazovima u oblasti kvaliteta vazduha, posebno u zimskom periodu, usled individualnih ložišta i meteoroloških uslova koji pogoduju zadržavanju zagađenja. Rezultati analize su prezentovani u okviru Tabele 1 i Slika 1. i 2 [8].

Tabela 1. Poređenje izmerenih ekstrema emisija PM_{2,5} u gradu Negotinu [8]

Negotin	2025	2026
Period	01-01-2025 - 16-03-2025.	01-01-2026. - 16-03-2026.
Raspoloživost podataka %	99,9	94,3
Minimum PM _{2,5} µg/m ³	12,2	11,0
Srednja vrednost PM _{2,5} µg/m ³	90,2	69,7
Maksimum PM _{2,5} µg/m ³	234,8	168,7
EU 2025 prekoračenje	67	68
SZO prekoračenje	74	71

Primećena je razlika srednje vrednosti emisija PM_{2,5} od 22,8% više u 2025. godini.

Slika 1. Emisija PM_{2,5} u prvih 75 dana 2025. i 2026. godine za grad Negotin [8]Slika 2. Emisija PM_{2,5} u februaru 2025. i 2026.godine za grad Negotin [8]

6. Užice

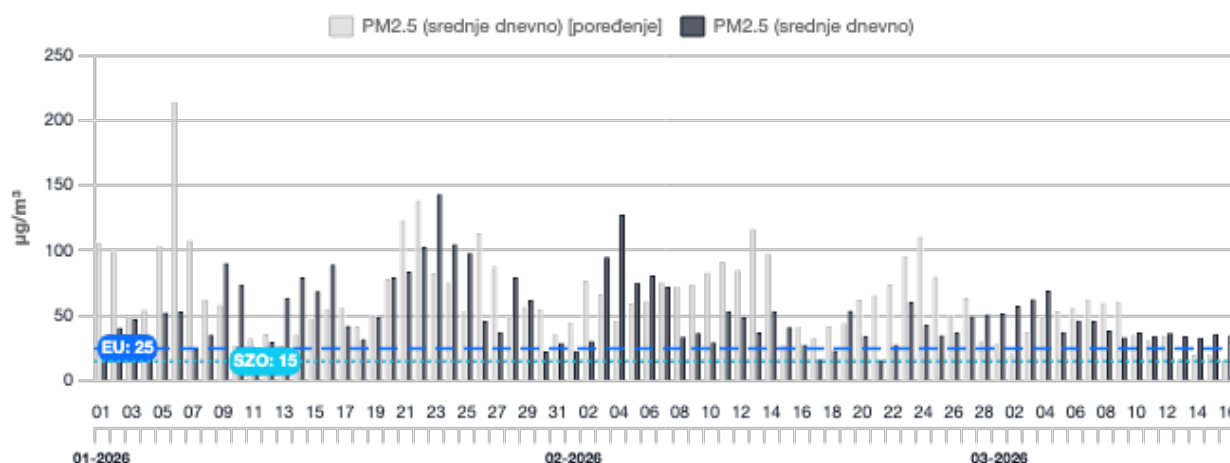
Grad Užice je grad u zapadnoj Srbiji smešten u dolini reke Đetinje i predstavlja administrativni, privredni i kulturni centar Zlatiborskog okruga. Grad ima bogatu istoriju koja seže još u srednji vek, a posebno je poznat po industrijskom razvoju tokom 20. veka. U njegovoj blizini nalaze se značajni turistički lokaliteti poput Zlatibor i Tara. Užice je takođe poznato po staroj hidroelektrani na Đetinji, jednoj od najstarijih u Evropi koja je i dalje u funkciji. Danas grad predstavlja važan regionalni centar sa razvijenim obrazovnim, zdravstvenim i kulturnim institucijama. Užice se nalazi na nadmorskoj visini od oko 411 m, u dolini reke Đetinje, i ima umereno-kontinentalnu klimu sa relativno hladnim zimama i toplim letima. U tabeli 2 je prikazan poredbeni rezultat za prvih 75 dana merenja u poslednje 2 godine, sa ekstremno visokim brojem dana prekoračenja limita zagađenja.

U okviru slike 3 i 4 se nalaze dijagrami koji grafički prezentuju uporedni rezultat emisija PM_{2,5}, kao i iste vrednosti za februar 2025. i februar 2026. godine [8].

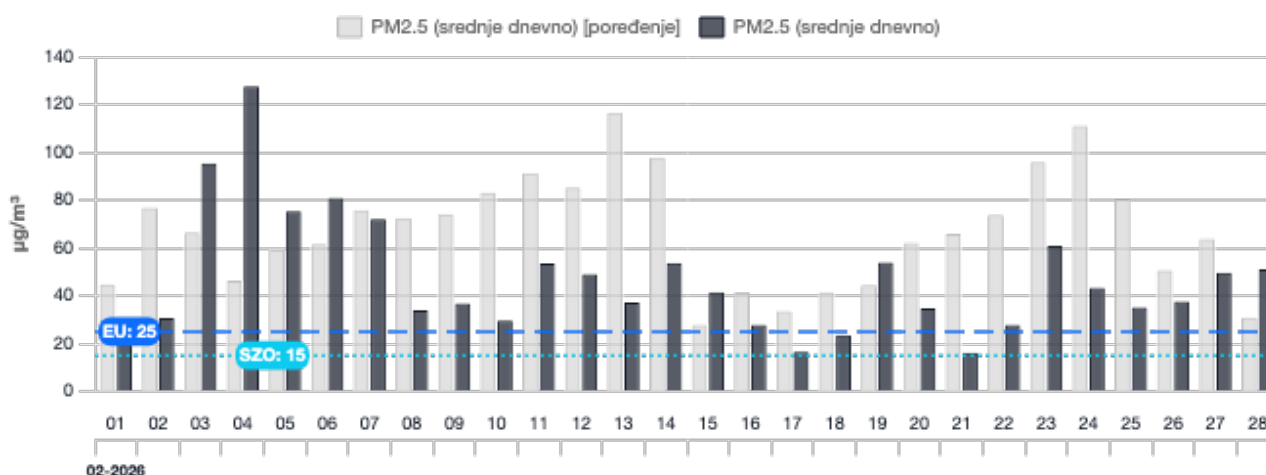
Tabela 2. Poređenje izmerenih ekstrema emisija PM_{2,5} u gradu Užicu [8]

Užice	2025	2026
Period	01-01-2025 - 16-03-2025.	01-01-2026. - 16-03-2026.
Raspoloživost podataka %	100	99,9
Minimum PM _{2,5} µg/m ³	15,4	16,2
Srednja vrednost PM _{2,5} µg/m ³	62,9	51,5
Maksimum PM _{2,5} µg/m ³	214	143,3
EU 2025 prekoračenje	70	68
SZO prekoračenje	75	75

Primećena je razlika srednje vrednosti emisija PM_{2,5} od 18,1% više u 2025. godini.



Slika 3. Emisija PM_{2,5} u prvih 75 dana 2025. i 2026. godine za grad Užice [8]



Slika 4. Emisija PM_{2,5} u februaru 2025. i 2026.godine za grad Užice [8]

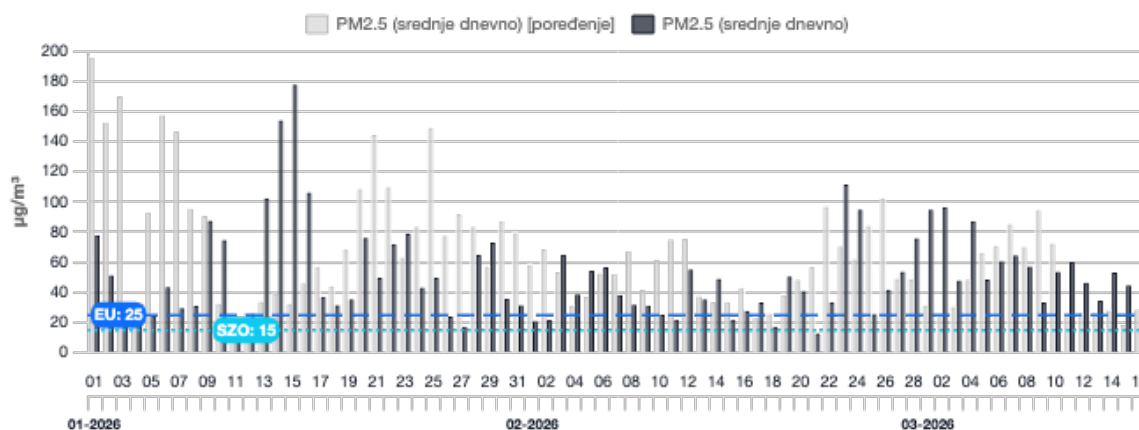
7. Vranje

Grad Vranje smešten je na krajnjem jugu Srbije i predstavlja administrativni, ekonomski i kulturni centar Pčinjskog okruga. Vranje ima bogatu kulturnu tradiciju i poznato je po specifičnom južnjačkom duhu, ali i po razvoju tekstilne i drvne industrije. Grad se nalazi u kotlini okruženoj planinama, na nadmorskoj visini od oko 480 m, što utiče na njegovu umereno-kontinentalnu klimu sa toplim letima i hladnijim zimama. Geografski položaj doprinosi povremenom zadržavanju zagađujućih materija u vazduhu, posebno tokom zimskih meseci. U analizama kvaliteta vazduha uočavaju se povremena prekoračenja koncentracija PM čestica, što ukazuje na potrebu za unapređenjem sistema upravljanja životnom sredinom (Tabela 3., Slika 5 i 6.) [8].

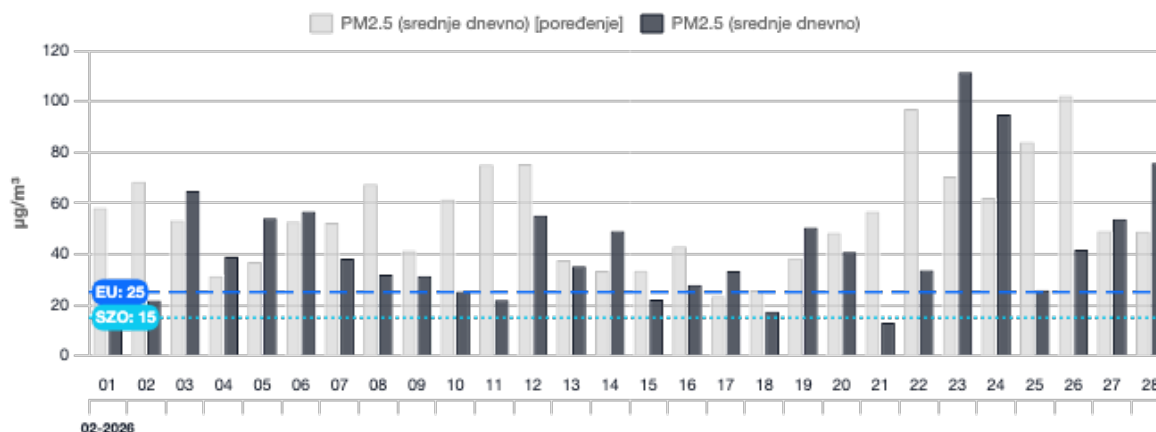
Tabela 3. Poređenje izmerenih ekstrema emisija PM_{2,5} u gradu Vranju [8]

Vranje	2025	2026
Period	01-01-2025 - 16-03-2025.	01-01-2026. - 16-03-2026.
Raspoloživost podataka %	100	100
Minimum PM _{2.5} µg/m ³	18,3	13,0
Srednja vrednost PM _{2.5} µg/m ³	66,1	51,9
Maksimum PM _{2.5} µg/m ³	195,7	177,5
EU 2025 prekoračenje	72	64
SZO prekoračenje	75	74

Primećena je razlika srednje vrednosti emisija PM_{2,5} od 21,4% više u 2025. godini.



Slika 5. Emisija PM_{2,5} u prvih 75 dana 2025. i 2026. godine za grad Vranje [8]



Slika 6. Emisija PM_{2,5} u februaru 2025. i 2026.godine za grad Vranje [8]

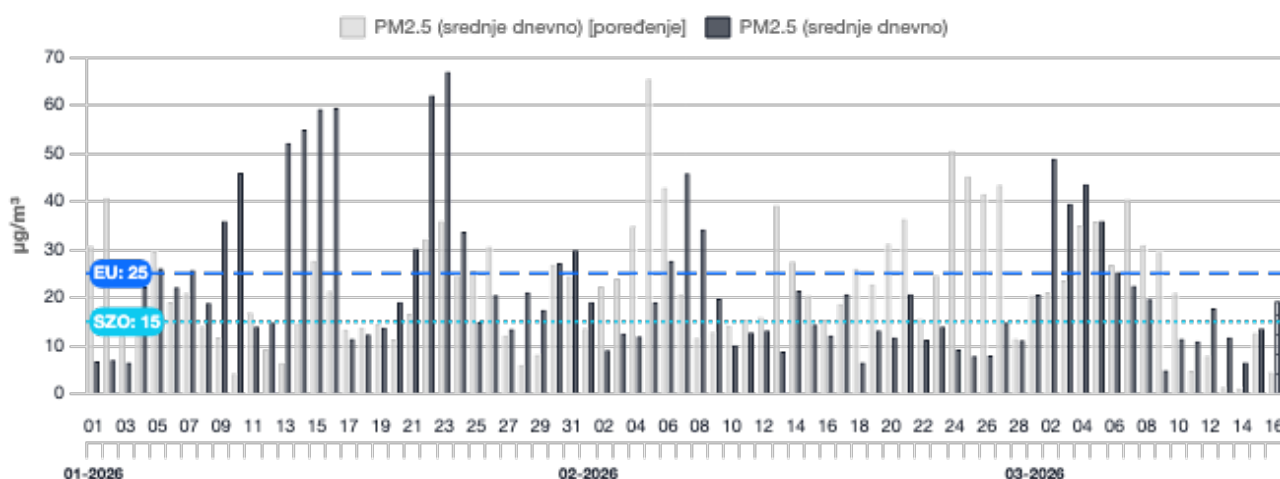
8. Sombor

Grad Sombor nalazi se u severozapadnom delu Srbije, u Autonomnoj Pokrajini Vojvodini, i predstavlja administrativni centar Zapadnobačkog okruga. Poznat je po svojoj bogatoj kulturnoj baštini, zelenilu i karakterističnoj urbanističkoj strukturi. Sombor je tradicionalno orijentisan ka poljoprivredi i prehrambenoj industriji, uz razvijen sektor usluga. Grad se nalazi na nadmorskoj visini od oko 89 m, u ravničarskom području, sa umereno-kontinentalnom klimom i izraženim uticajem vetrova. Iako nema tešku industriju, kvalitet vazduha može biti narušen tokom grejne sezone zbog emisija iz individualnih ložišta. Praćenje koncentracija PM čestica ukazuje na sezonske varijacije i potrebu za dodatnim merama zaštite životne sredine (Tabela 4, slike 7. i 8.) [8].

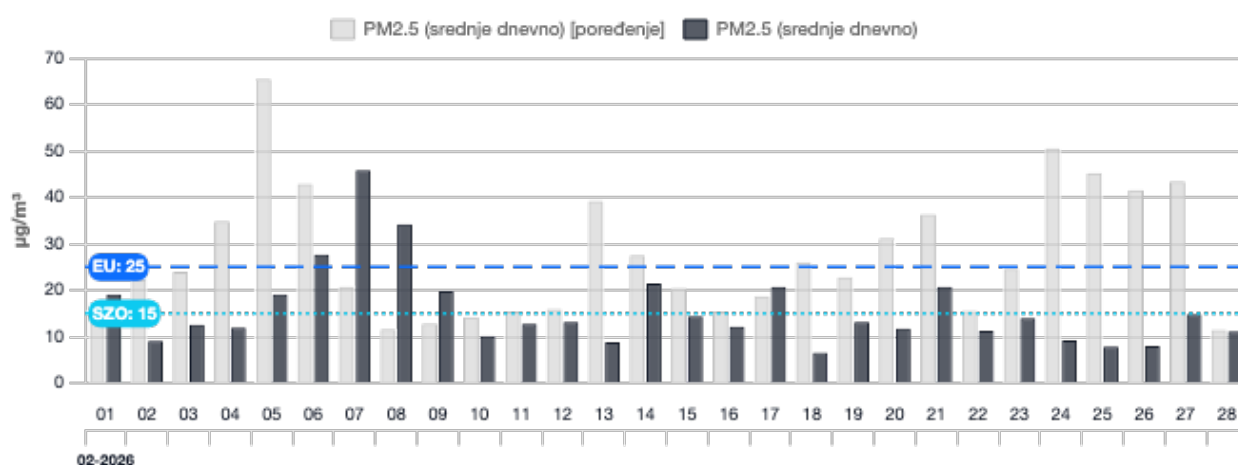
Tabela 4. Poređenje izmerenih ekstrema emisija PM_{2,5} u gradu Somboru [8]

Sombor	2025	2026
Period	01-01-2025 - 16-03-2025.	01-01-2026. - 16-03-2026.
Raspoloživost podataka %	99,8	99,6
Minimum PM _{2.5} µg/m ³	1,2	21,9
Srednja vrednost PM _{2.5} µg/m ³	22,3	21,9
Maksimum PM _{2.5} µg/m ³	65,4	66,9
EU 2025 prekoračenje	27	22
SZO prekoračenje	50	39

Primećena je razlika srednje vrednosti emisija PM_{2,5} od 1,5% više u 2025. godini.



Slika 7. Emisija PM_{2,5} u prvih 75 dana 2025. i 2026. godine za grad Sombor [8]



Slika 8. Emisija PM_{2,5} u februaru 2025. i 2026. godine za grad Sombor [8]

9. Diskusija i zaključak

Rezultati sprovedene analize ukazuju na izrazito nepovoljno stanje kvaliteta vazduha u Srbiji u kontekstu primene nove EU Direktive o kvalitetu vazduha iz 2024. godine. Posebno je značajno da je u velikom broju analiziranih urbanih sredina dozvoljeni godišnji limit prekoračenja dnevnih koncentracija PM_{2.5} iscrpljen već tokom januara 2026. godine. Ovakav nalaz potvrđuje da problem zagađenja vazduha u Srbiji nije sporadičan, već ima sistemski karakter i zahteva sveobuhvatan pristup rešavanju.

Analiza podataka iz različitih gradova, uključujući Negotin, Užice, Vranje i Sombor, pokazuje da su epizode povećanih koncentracija PM_{2.5} prisutne u različitim geografskim i klimatskim uslovima, što dodatno potvrđuje širinu problema. Iako postoje razlike u intenzitetu zagađenja, zajednički imenitelj su dominantni izvori emisija, pre svega individualna ložišta na čvrsta goriva, saobraćaj i lokalni industrijski izvori. Tokom zimskog perioda, nepovoljni meteorološki uslovi, poput temperaturnih inverzija i slabe cirkulacije vazduha, dodatno pogoršavaju situaciju i doprinose akumulaciji zagađujućih materija. Uvođenje dnevne granične vrednosti za PM_{2.5} omogućava preciznije sagledavanje kratkotrajnih epizoda zagađenja, koje imaju značajan uticaj na zdravlje stanovništva. Međutim, primena ovih kriterijuma istovremeno otkriva značajan jaz između trenutnog stanja i budućih regulatornih zahteva. Ovi rezultati ukazuju na potrebu za ubrzanom implementacijom mera koje obuhvataju unapređenje energetskog sektora, modernizaciju sistema grejanja i jačanje politika upravljanja kvalitetom vazduha. Bez sistemskih promena, dostizanje evropskih standarda ostaje ozbiljan izazov.

Posebno je značajno naglasiti da problem zagađenja vazduha u Srbiji ima izraženu sezonsku komponentu, pri čemu su zimski meseci kritični zbog povećane potrošnje energenata za grejanje. Dominantni izvori emisija, uključujući individualna ložišta, saobraćaj i industriju, zahtevaju ciljane politike i investicije usmerene ka smanjenju emisija. U tom kontekstu, energetska tranzicija, povećanje energetske efikasnosti i prelazak na čistije izvore energije predstavljaju ključne pravce delovanja. Harmonizacija nacionalnog zakonodavstva sa evropskim standardima predstavlja ne samo obavezu u procesu evropskih integracija, već i priliku za unapređenje kvaliteta života stanovništva. Primena strožih kriterijuma omogućava realnije sagledavanje problema i može poslužiti kao snažan podsticaj za donošenje efikasnijih politika zaštite životne sredine.

Konačno, na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da bi primena nove EU Direktive o kvalitetu vazduha imala značajne implikacije na klasifikaciju kvaliteta vazduha u Srbiji. Ovakva situacija ukazuje na potrebu za hitnim i sistemskim merama u cilju unapređenja kvaliteta vazduha i zaštite javnog zdravlja. Unapređenje kvaliteta vazduha zahteva koordinisano delovanje svih relevantnih sektora, uključujući energetiku, saobraćaj, industriju i lokalne zajednice. Samo integrisanim pristupom moguće je postići održive rezultate i obezbediti zdraviju životnu sredinu za buduće generacije. Ipak, treba napomenuti da se zaključci temelje na jednom zimskom periodu i da je za sveobuhvatnu procenu potrebna dugoročnija serija podataka, čime bi analiza koja je predmet istraživanja bila kompleksnija, verodostojnija i kredibilnija.

10. Zahvalnica/Acknowledgement

*Prikazani rezultati su deo istraživanja koje se sprovodi u okviru projekta „Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition – FF GreEN“ koji se realizuje sredstvima Fonda za nauku Republike Srbije (grant br. 4344).

The presented results are part of the research supported by the Science Fund of the Republic of Serbia (#Grant No. 4344), Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition - FF GreEN.

*Приказани резултати су део истраживања финансирано по Уговору о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2026. години бр. 451-03-34/2026-03/200126, Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (Contract on realization and financing of scientific research of SRI in 2026, No.451-03-34/2026-03/200126, Ministry of Science, Technological Development and Innovation of Republic of Serbia).

11. References

- [1] *** European Parliament and Council, *Directive (EU) 2024/2881 on ambient air quality and cleaner air for Europe*, Official Journal of the European Union, Brussels, 2024.
- [2] *** World Health Organization, *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*, Geneva, 2021
- [3] **Cohen, A. J., et al. (2017)**, Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Disease Study 2015, *The Lancet*, 389 (10082), 1907–1918., [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- [4] *** GBD 2019 Risk Factors Collaborators. (2020), Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019, *The Lancet*, 396(10258), 1223–1249., [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)

-
- [5] **Landrigan, P. J., et al. (2018)**, The Lancet Commission on pollution and health, *The Lancet*, 391 (10119), 462–512, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0)
 - [6] **Fuller, R., et al. (2022)**, Pollution and health: A progress update, *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535–e547, [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)
 - [7] *** GBD 2019 Air Pollution Collaborators. (2021), Health effects of ambient air pollution: Global estimates of mortality and disease burden from the Global Burden of Disease Study 2019., *Environmental Research*, 202, 111–124., <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111>
 - [8] *** Aplikacija xEco Vazduh (2026), "eXtreme ECOlogy" - Ekstremna ekologija - Evropski Indeks kvaliteta vazduha, dostupno na: <https://xeco.info/xeco/vazduh/>

Originalni rad <https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.317>

Ključne reči:
Fenton proces; mikroreaktorski
sistem; Reactive Blue 5

ISPITIVANJE MOGUĆNOSTI OBEZBOJAVANJA RASTVORA BOJE REACTIV BLUE 5 U MIKROREAKTORSKOM SISTEMU

Key words:
Fenton process; microreactor system;
Reactive Blue 5

INVESTIGATION OF THE POTENTIAL FOR REACTIVE BLUE 5 DYE SOLUTION DECOLORIZATION IN MICROREACTOR SYSTEMS

Ana DAJIĆ*
* aveljasevic@tmf.bg.ac.rs
Marina MIHAJLOVIĆ

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0002-4427-1393
Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd
ORCID: 0000-0003-3643-345X

Rad ispituje mogućnost tretmana rastvora boje Reactive Blue 5 u vodi u mikroreaktorskim sistemima primenom unapređenog procesa oksidacije. Otpadne vode tekstilne industrije karakteriše visok sadržaj boja i njihovo ispuštanje u vodoprijemnike bez primene odgovarajućeg tretmana predstavlja značajan rizik za životnu sredinu. Ovu vrstu otpadnih voda je moguće tretirati na razne načine ali nusproizvode ovih tretmana je često potrebno dalje obraditi pre ispuštanja. Alternativno rešenje je tretman u mikroreaktorskim sistemima. U radu je ispitan tretman rastvora boje Fentonovim reagensom u mikroreaktorskom sistemu. Sistem se sastoji od dve klipne pumpe, mešalice i PTFE cevi. Uspešnost procesa je ispitana spektrofotometrijskom analizom proizvoda reakcije sa fokusom na parametre sistema, brzinu protoka reaktanata kroz sistem i molski odnos reaktanata u reakcionoj smeši.

The study examines the possibility of treating aqueous solutions of the dye Reactive Blue 5 in microreactor systems using an improved oxidation process. Wastewater from the textile industry is characterised by a high dye content, and its discharge into water bodies without appropriate treatment poses a significant environmental risk. This type of wastewater can be treated in various ways, but the by-products of these treatments often require further processing before discharge. An alternative solution is treatment in microreactor systems. The paper investigates the treatment of dye solutions with Fenton's reagent in a microreactor system. The system consists of two plunger pumps, a stirrer, and a PTFE tube. The effectiveness of the process was evaluated by spectrophotometric analysis of the reaction products, focusing on system parameters, the flow rate of the reactants through the system, and the molar ratio of the reactants in the reaction mixture.

1. Uvod

Tekstilna industrija je, posle naftne industrije, drugi najznačajniji zagađivač vode, jer, prema dostupnim podacima doprinosi približno 20% njenog globalnog zagađenja. Otpadne vode koje nastaju u proizvodnim procesima tekstilne industrije često karakteriše značajna količina nefiksiranih boja i pomoćnih sredstava za bojenje. Godišnje se proizvede preko 10.000 različitih sintetskih boja i to u količini od oko 800.000 tona [1].

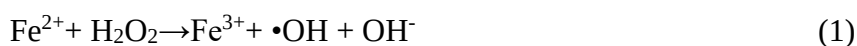
Ove otpadne vode predstavljaju mešavinu boja, metala i drugih zagađujućih supstanci. Boje se prema poreklu dele na prirodne i sintetske. Proces proizvodnje sintetskih boja nije komplikovan a ovako nastale boje karakteriše postojanost [2]. Sintetske boje se prema svojoj hemijskoj strukturi

klasifikuju u različite klase (azo, antrahinon, sumpor, ftalocijanin...) i prema načinu upotrebe (reaktivne, direktnedisperzne, bazne...) [3].

Zbog svoje postojanosti, prisustvo boja u otpadnim vodama često predstavlja problem koji nije jednostavno rešiti i razvijene su mnoge metode koje pokazuju uspeh za prečišćavanje vode opterećene različitim vrstama boja. Metode koje su pokazale uspešnim su tzv. unapređeni oksidativni procesi (engl. *advanced oxidation processes*, AOP) od kojih je najšire primenjivan Fentonov proces.

1.1. Fenton proces

Fenton proces započinje proizvodnjom OH radikala u reakciji smeše vodonik-peroksida i jona gvožđa, jednačina 1. OH radikali su visoko reaktivni i neselektivni i reaguju sa širokim spektrom organskih jedinjenja razgrađujući ih na vodu, ugljen-dioksid i neorganske jone [4].



Gvožđe u ovoj reakciji predstavlja katalizator dok se vodonik-peroksid tokom reakcije neprekidno troši i on predstavlja pogonsku silu reakcije.

Uspeh Fentonove reakcije pored karakteristika zagađujuće materije u velikoj meri zavisi i od uslova pod kojima se reakcija odvija odnosno od koncentracije i molskog odnosa učesnika reakcije $[\text{Fe}^{2+}]$, $[\text{Fe}^{3+}]$ i $[\text{H}_2\text{O}_2]$ kao i pH vrednosti, temperature, dužine trajanja reakcije, prisustva OH radikala i prisustva organskih i neorganskih zagađivača. Mehanizam po kome će se reakcija odvijati zavisi od količine Fe^{2+} jona i molekula H_2O_2 . Značajnu ulogu u uspehu reakcije ima i pH vrednost reakcione smeše za koju se pokazalo da je najuspešnija kada je približno 3.

1.2. Reactive Black 5

U radu je ispitana mogućnost razgradnje reaktivne boje Reactive Black 5 (RB5). Molekulska formula ove boje je $\text{C}_{26}\text{H}_{21}\text{N}_5\text{Na}_4\text{O}_{19}\text{S}_6$, molekulaska masa 991,82 g/mol a karakteristična talasna dužina pika je na 597 nm. U pitanju je diazo vinil sulfonska reaktivna boja koja se široko koristi u tekstilnoj, papirnoj i kožnoj industriji zbog svoje visoko efikasne fiksacije i duboke crne nijanse. Široka upotreba ove boje za posledicu ima ispuštanje u industrijske otpadne vode što je nepovoljno sa stanovišta zaštite životne sredine. Iako boja RB5 pokazuje nisku akutnu toksičnost, njegov potencijal za hroničnu toksičnost, posebno genotoksičnost i kancerogenost predmet su stalnog istraživanja [5].

1.3. Mikroreaktorski sistemi

Mikroreaktorski sistemi predstavljaju značajan pomak u hemijskom inženjerstvu, udaljavajući se od tradicionalnih sistema velike zapremine ka minijaturizovanim uređajima za izvođenje hemijskih reakcija. Ovi sistemi koriste kontinualan tok gde se reaktanti pumpaju kroz uske kanale umesto da se mešaju u statičkom rezervoaru. Takav kontinualni proces nudi visok stepen kontrole reakcionih uslova što je teško postići u šaržnim reaktorima. Efikasnost mikroreaktorskih sistema je posledica ponašanja fluida na mikroskali. Najvažnija karakteristika dizajna je visok odnos površine i zapremine koji može biti desetine hiljada kvadratnih metara po kubnom metru. Ovo geometrijsko svojstvo značajno poboljšava prenos toplote i mase preko zidova kanala. Na taj način, temperature reakcija se mogu kontrolisati sa visokom preciznošću sprečavajući formiranje lokalizovanih tačaka visoke temperature čak i u visokoenergetskim reakcijama.

Dinamika fluida unutar mikrokanala obično funkcioniše u režimu laminarnog toka koji karakteriše predvidivo, neturbulentno kretanje. Nizak Rejnoldsov broj osigurava da se fluidi kreću u paralelnim slojevima, što znači da mešanje zavisi od molekularne difuzije preko međupovršine. Ovo oslanjanje na difuziju obezbeđuje ponovljivo i ujednačeno reakciono okruženje.

U eksperimentu su korišćeni mikoreaktori izrađeni od politetrafluoroetilena visokih performansi.

Cilj rada je ispitivanje mogućnosti korišćenja relativno nove, održive i ekološki prihvatljive tehnologije za uklanjanje boje iz otpadnih voda. Konkretno, ovaj rad se bavi određivanjem efikasnosti razgradnje boje Reactive Black 5 pomoću Fentonovog reagensa u mikoreaktorskom sistemu.

2. Eksperimentalni deo

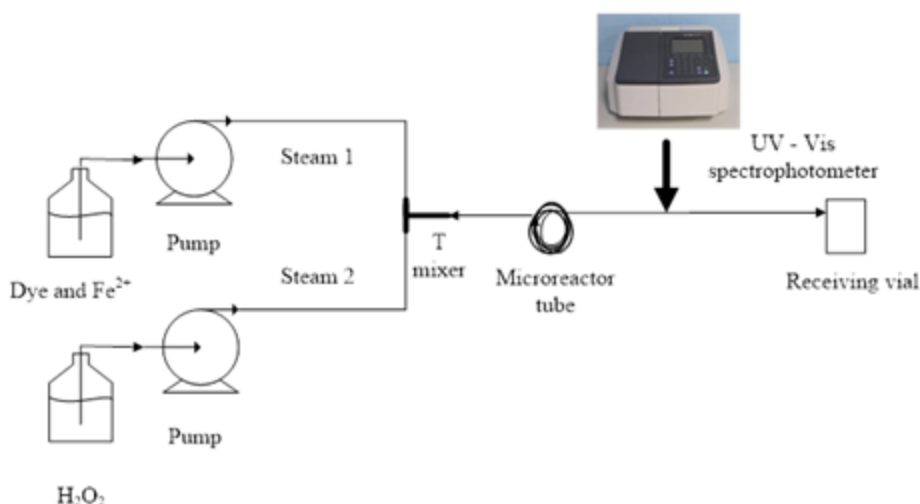
Ispitivanje mogućnosti degaradacije antrahinonske reaktivne boje RB5 izvedeno je Fentonovim reagensom u mikoreaktorskim uslovima na sobnoj temperaturi. Rastvori boje napravljeni su korišćenjem destilovane vode i boje Reactive Black 5. Sumporna kiselina (Zorka Pharma-Hemija d.o.o. 95-97 %) je korišćena za podešavanje pH vrednosti. U eksperimentu je upotrebljen vodonik peroksid (H_2O_2 , 3 %) proizvođača Galena Lab (Srbija) i gvožđe sulfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) analitičke čistoće proizvođača Centrohem (Srbija).

Koncentracije rastvora boje bile su $0,1 \text{ g/dm}^3$, $0,15 \text{ g/dm}^3$ i $0,2 \text{ g/dm}^3$. Rastvori boje ovih koncentracija smatraju se veoma zaprljanom otpadnom vodom. Ovakvu vodu neophodno je tretirati kako bi njen kvalitet zadovoljio zahteve o kvalitetu vode za ispuštanje u vodoprijemnike propisane odgovarajućim regulativama.

Sledeći korak u pripremi reaktanata bilo je rastvaranje gvožđa. U svim rastvorima boje koncentracija gvožđa podešena je tako da odnos molekula gvožđa i molekula vodonik peroksida u reakcionoj smeši bude 0,5. Nakon dodavanja gvožđa u reakcionu smešu rastvorima boje podešavana je pH vrednost 3 jer se prema literaturnim podacima i rezultatima prethodnih istraživanja [6] ova vrednost pokazala kao najpovoljnija. Podešavanje pH vrednosti izvedeno je razblaženim rastvorom H_2SO_4 . pH vrednosti simulirane otpadne vode merene su pomoću Hanna Wastewater treatment photometer HI83314-02.

Reakcija u mikoreaktorskom sistemu izvedena je u reakcionom sklopu koji se sastojao od dve klipne pumpe (LC-20AD XR, Shimadzu), T miksera i politetrafluoroetilen reaktora dužine 15 m prečnika 0,3 mm.

Na slici 1 data je skica aparature u kojoj izveden eksperiment. Pomoću prve pumpe (tok 1) reakcioni sistem se snabdeva rastvorom boje u kojoj je rastvorena so gvožđa dok se drugom pumpom reakcioni sistem snabdeva rastvorom vodonik-peroksida. Ova dva toka spajaju se pomoću T miksera nakon čega reakcija počinje u mikoreaktoru. Na kraju reakcije uzorci su prihvatani i analizirani spektrofotometrijski (Shimadzu UV-Vis 1700) na talasnoj dužini 597 nm.



Slika 1. Šema mikoreaktorskog sistema [6]

U ovom eksperimentu mikoreaktorski sklop je bio konstantan a varirane su ukupne brzine protoka reaktanata, pojedinačni protoci i molarni odnosi reaktanata u reakcionoj smeši. Tabela 1 prikazuje primenjene reakcione uslove.

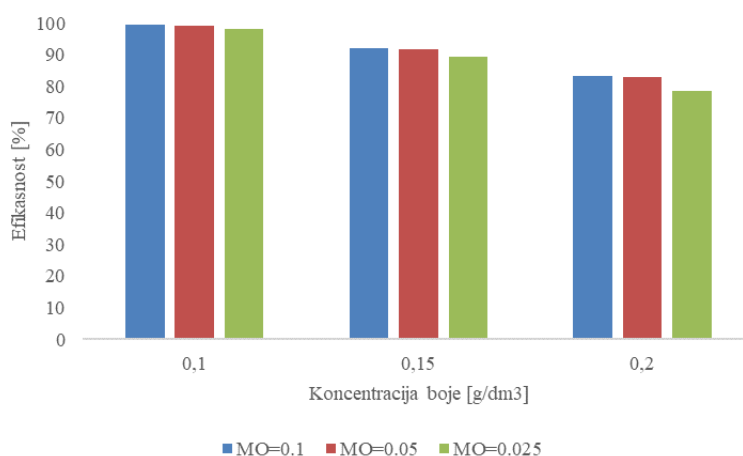
Tabela 1. Reakcioni uslovi

	Vrednost			Jedinica
Pritisak	101,3			kPa
Temperatura	25			°C
pH	3			
Početna koncentracija boje	0,1	0,15	0,2	gdm ⁻³
Prečnik mikoreaktora	0,3			mm
Dužina mikoreaktora	15			m
Molski odnos H ₂ O ₂ /Fe ²⁺	0,1	0,05	0,025	

Viskozimetar LE0089, EU Instruments iskorišćen je za određivanje viskoznosti smeše koja se kretala kroz reaktor. Korišćenjem podataka o viskoznosti i primenjenim brzinama protoka izračunat je Reynoldsov broj koji je potvrdio da se reakciona smeša kroz mikoreaktorski sistem kretala laminarno. Vreme zadržavanja reakcione smeše pri konstantnim dimenzijama reaktora zavisilo jedino od podešene brzine protoka. Pri brzini protoka od 1 µl/min vreme zadržavanja reakcione smeše u reaktoru 64 s dok je pri protoku od 5 µl/min 13s.

3. Rezultati i diskusija

Uticaj molskog odnosa, u daljem tekstu MO, reakcione smeše na efikasnost razgradnje boje RB5 Fentonovim reagensom ispitan je u mikoreaktorskom sistemu dužine 15 m i prečnika 0,3 mm za dve vrednosti brzine kretanja smeše kroz reaktor. Slika 2 prikazuje rezultate eksperimenta kada se reakciona smeša kroz mikoreaktorski sistem kreće brzinom od 1 µl/min.

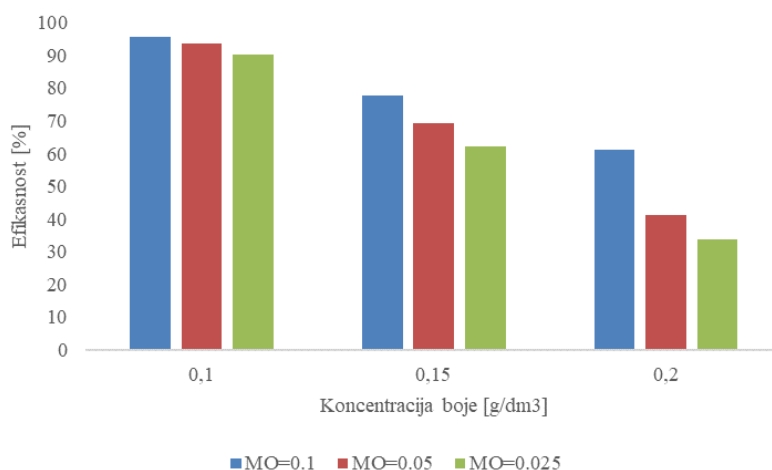


Slika 2. Efikasnost razgradnje boje RB5 koncentracije 0,1 g/dm³ ; 0,15 g/dm³ i 0,2 g/dm³ u mikoreaktorskom sistemu u zavisnosti od molskog odnosa reaktanata u smeši pri brzini protoka od 1 µl/min

Sa slike se vidi da je efikasnost razgradnje boje najveća kada je koncentracija boje najniža i to preko 98% pri bilo kom molskom odnosu reaktanata u reakcionoj smeši. Efikasnost Fentovog reagensa u procesu razgradnje boje RB5 nešto je niža kada je u pitanju rastvor boje koncentracije 0,15 g/dm³. Efikasnost razgradnje reastvora boje ove koncentracije i dalje se može smatrati veoma

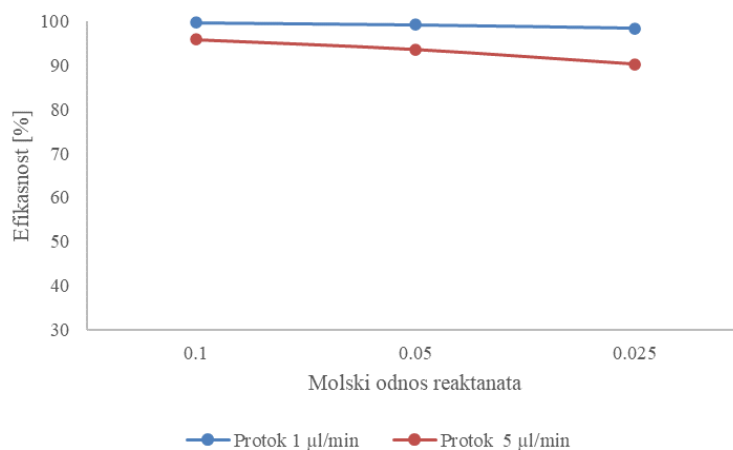
uspešnom jer za bilo koji primenjeni molaski odnos rezultati efikasnosti razgradnje su preko 89% dok je efikasnost razgradnje boje u slučaju rastvora koncentracije $0,2 \text{ g/dm}^3$ preko 78%. Efikasnost razgradnje boje iz vodenih rastvora na ovaj način je izuzetno visoka posebno imajući u vidu da sam proces obezbojavanja traje približno 1 minut.

Slika 3 prikazuje rezultate efikasnosti razgradnje boje RB 5 iz vodenih rastvora Fentonovim reagensom u slučaju kada se reakciona smeša kreće brzinom od $5 \text{ } \mu\text{l/min}$. Sa slike je očigledno da je efikasnost razgradnje boje koncentracije 1 izuzetno visoka, preko 90% za bilo koji od primenjenih molaskih odnosa. Efikasnost uklanjanja boje koncentracije 0,15 je nešto niža ali, za molaski odnos 0,1 je skoro 78% što se ne može smatrati lošom efikasnošću. Kada je koncentracija boje $0,2 \text{ g/dm}^3$ efikasnost razgradnje boje je niska za slučaj molaskih odnosa 0,05 i 0,025, dok se za slučaj molaskog odnosa 0,1 to ne može reći jer je postignuta efikasnost razgradnje boje od preko 60% za samo 13 s.



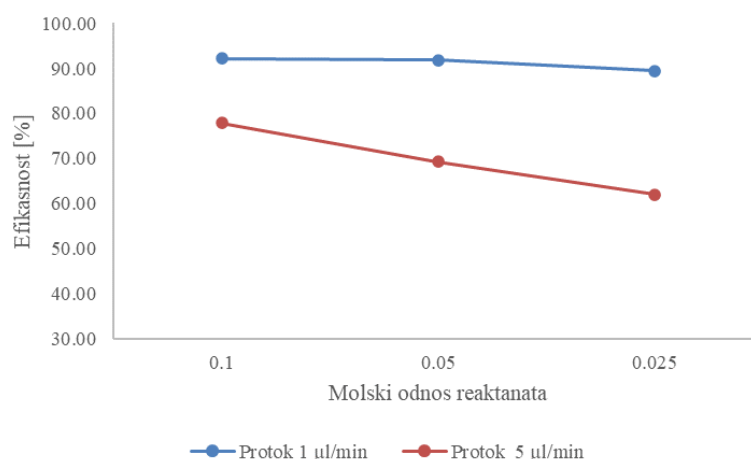
Slika 3. Efikasnost razgradnje boje RB5 koncentracije $0,1 \text{ g/dm}^3$; $0,15 \text{ g/dm}^3$ i $0,2 \text{ g/dm}^3$ u mikroreaktorskom sistemu u zavisnosti od molaskog odnosa reaktanata u smeši pri brzini protoka od $5 \text{ } \mu\text{l/min}$

Nakon toga, eksperimenti su nastavljani ispitivanjem uticaja brzine kretanja reakcione smeše kroz reaktor na efikasnost procesa degradacije boje RB5. U slučaju degradacije boje koncentracije $0,1 \text{ g/dm}^3$ efikasnost razgradnje boje je veoma visoka bez obzira na primenjenu brzinu protoka. Nešto viša efikasnost je u slučaju kada reakcija traje duže ali, zadovoljavajući rezultati su dobijeni kada reakcija traje 13 s.



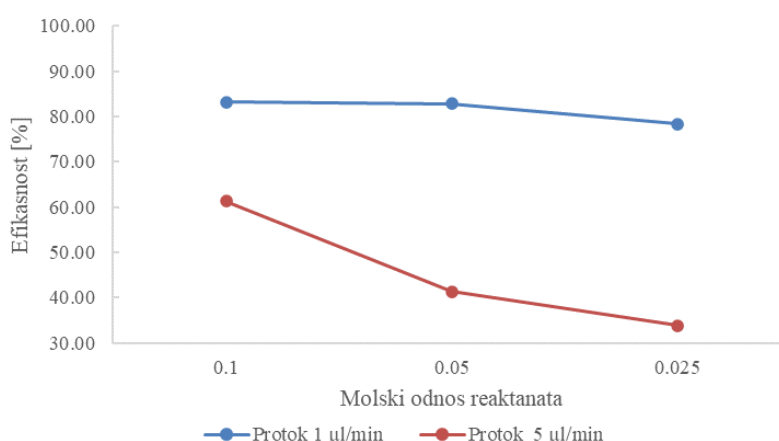
Slika 4. Efikasnost razgradnje boje RB5, koncentracije $0,1 \text{ g/dm}^3$, u zavisnosti od brzine protoka boje i molaskog odnosa reaktanata

Efikasnost obezbojavanja boje koncentracije $0,15 \text{ g/dm}^3$ pokazuje nešto veću razliku u rezultatima efikasnosti kada se reakciona smeša kreće brzinom od $1 \text{ } \mu\text{l/min}$ ili $5 \text{ } \mu\text{l/min}$. Tako, najviša efikasnost je dobijena u slučaju kada je molski odnos reaktanata $0,1$ i tada razlika između rezultata dobijenih pri protoku reakcione smeše od $1 \text{ } \mu\text{l/min}$ ili $5 \text{ } \mu\text{l/min}$ iznosi nešto manje od 4% dok je za slučaj reakcione smeše sa molskim odnosom $0,025$ ta razlika 8%. Ova razlika se ne može smatrati velikom i pri donošenju odluke koji bi reakcione uslove trebalo primeniti treba imati na umu i vreme trajanja procesa.



Slika 5. Efikasnost razgradnje boje RB5, koncentracije $0,15 \text{ g/dm}^3$, u zavisnosti od brzine protoka boje i molskog odnosa reaktanata

Slučaj razgradnje rastvora boje koncentracije $0,15$ pokazuje efikasnost od preko 60% za obe brzine kretanja smeše kroz reaktor ali, je razlika između primenjenih protoka značajnija kod uspeha za slučajeve istih molskih odnosa a različite protoke smeša. Tako, za slučaj molskog odnosa $0,1$ razlika u dobijenim rezultatima iznosi približno 14% dok za slučaj molskog odnosa $0,025$ ova razlika iznosi preko 27%.



Slika 6. Efikasnost razgradnje boje RB5, koncentracije $0,2 \text{ g/dm}^3$, u zavisnosti od brzine protoka boje i molskog odnosa reaktanata

Najlošiji rezultati efikasnosti dobijeni su za slučaj kada je koncentracija rastvora boje iznosila $0,2$. Uticaj brzine protoka smeše kroz reaktor, odnosno vremena zadržavanja u sistemu, je za ovaj

slučaj najočiglednija i to u slučaju molskog odnosa 0,1 razlika u efikasnosti je 22% dok je za slučaj molskog odnosa 0,025 ta razlika viša od 44%.

4. Zaključak

U ovom istraživanju ispitana je mogućnost degradacije boje Reactive Blue 5 Fentonovim reagensom u mikroreaktorskom sistemu. Eksperimenti su izvedeni kako bi se utvrdio uticaj molskog odnosa i brzine kretanja reacione smeše kroz mikroreaktorski sistem na efikasnost obezbojavanja sintetske boje RB5.

Rezultati su pokazali da je efikasnost uklanjanja boje veća kada se reakciona smeša kroz sistem kreće brzinom 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ nego 5 $\mu\text{l}/\text{min}$, odnosno kada reakcija traje 64 s. Degradacija boje se može smatrati uspešnom i kada se reakciona smeša kroz sistem kreće brzinom 5 $\mu\text{l}/\text{min}$ odnosno kada reakcija obezbojavanja traje 13 s u slučaju kada je u pitanju degradacija boje koncentracije 0,1 i 0,15 g/dm^3 i tada je efikasnost, za bilo koji molski odnos, preko 62%.

Dobijeni rezultati su pokazali da je primena Fentonovog reagensa za degradaciju boje RB5 u mikroreaktorskom sistemu dobar način da se boja visoke koncentracije uspešno razgradi za veoma kratko vreme.

5. Zahvalnica

Istraživanja u ovom radu izvršena su u okviru aktivnosti koje finansira Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije pod ugovorom evidencioni broj 451-03-33/2026-03/200287.

6. Reference

- [1] **Periyasamy, A. P.**, Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment, *Sustainability*, 16 (2024), pp. 495, <https://doi.org/10.3390/su16020495>.
- [2] **Khehra MS, H. S. Saini, D. K. Sharma, B. S. Chadha, S. S. Chimni**, Biodegradation of azo dye C.I. Acid red 88 by an anoxic–aerobic sequential bioreactor. *Dyes Pigments* 70 (2006), pp. 1–7.
- [3] **Yaseen D. A., M. Scholz**, Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16 (2019):1193–1226, <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>.
- [4] **de Oliveira M., S.M. Loures Marcionílio, K. Borges Machado, D. Medeiros de Araújo, C.A. Martínez-Huitle, A.L. Leão Arantes, J.E. Ferreira da Silva Gadêlha**, Fenton: A Systematic Review of Its Application in Wastewater Treatment, *Processes* 11 (2023), 2466, <https://doi.org/10.3390/pr11082466>.
- [5] **Xie X. H., J. Zhao, T. Liu et al.**, Label-Free and Real-Time Impedance Sensor Integrated Liver Chip for Toxicity Assessment: Mechanism and Application, *Sensors and Actuators B, Chemical*, 393 (2023) 134282, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134282>.
- [6] **Dajić, A., Mihajlović, M.**, Novel treatment for dye decolorization using a microreactor system and Fenton's reagent. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 43 (2024) 2, 271–280. <https://doi.org/10.20450/mjcce.2024.2903>.

Originalni rad <https://doi.org/10.24094/ptk.026.1.325>

Ključne reči:
pepeo suncokretove ljuske;
NPK đubriva;
cirkularna ekonomija

**MOGUĆNOST VALORIZACIJE PEPELA
SUNCOKRETOVE LJUSKE U PROIZVODNJI
MINERALNIH GRANULISANIH ĐUBRIVA
U SKLADU SA PRINCIPIMA CIRKULARNE EKONOMIJE**

Key words:
sunflower husk ash;
NPK fertilizers;
circular economy

**POSSIBILITY OF SUNFLOWER HUSK ASH VALORIZATION
IN THE PRODUCTION OF MINERAL GRANULATED
FERTILIZERS IN ACCORDANCE WITH THE
PRINCIPLES OF CIRCULAR ECONOMY**

Alija SALKUNIĆ*	Elixir Zorka – Mineralna đubriva, Šabac, Srbija
* alija.salkunic@elixirzorka.rs	ORCID: 0000-0002-5372-1018
Dejan TODORVIĆ	Centar za primenjenu cirkularnu ekonomiju d.o.o., Šabac, Srbija
Nikola BELOBABA	Elixir Zorka – Mineralna đubriva, Šabac, Srbija
Julijana BOGIĆEVIĆ	Elixir Zorka – Mineralna đubriva, Šabac, Srbija
Slavica BOGDANOVIĆ	Elixir Zorka – Mineralna đubriva, Šabac, Srbija

U radu je ispitana mogućnost valorizacije pepela suncokretove ljuske, nastalog kao nusproizvod termičkog tretmana biomase, u cilju delimične supstitucije mineralnih sirovina u proizvodnji NPK đubriva. Primarni cilj bio je razvoj formulacije kompleksnog granulisanog đubriva NPK 6:12:24 + 6% S koja zadržava visok nutritivni kvalitet uz potpunu bezbednost po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

Sprovedena je detaljna fizičko-hemijska karakterizacija uzorka pepela, sa posebnim fokusom na sadržaj primarnih nutrijenata i teških metala. Laboratorijska granulacija varijanti sa dodatkom 30 kg/t i 50 kg/t pepela realizovana je u Eirich granulatoru, uz primenu mineralnih kiselina i soli koje se standardno koriste u procesu proizvodnje đubriva. Finalni proizvodi su podvrgnuti laboratorijskom testiranju, a bezbednost je proverena u skladu sa kriterijumima Uredbe (EU) 2019/1009.

Laboratorijske analize potvrdile su da je pepeo suncokreta izuzetno bogat kalijumom (48,33% K₂O), pri čemu je preko 93% ovog elementa u vodorastvornom obliku. Iako sam pepeo sadrži povišene koncentracije nikla i šestovalentnog hroma, rezultati ispitivanja finalnih đubriva pokazuju da su vrednosti svih teških metala višestruko niže od zakonski dozvoljenih granica, zahvaljujući efektu razblaživanja unutar normativa. Varijanta sa 50 kg/t pepela pokazala je najveći potencijal za supstituciju mineralnih soli, uz blago povećanje egzotermne reakcije tokom procesa granulacije.

Istraživanje dokazuje da pepeo suncokretove ljuske predstavlja konkurentnu i ekološki opravdanu alternativu tradicionalnim izvorima kalijuma. Implementacija ovog rešenja direktno doprinosi principima cirkularne ekonomije, omogućavajući povratak nutrijenata u zemljište i smanjenje depoziranja industrijskog otpada, uz punu usklađenost sa evropskom regulativom.

The paper investigates the possibility of valorizing sunflower husk ash, generated as a byproduct of thermal biomass treatment, for the partial substitution of mineral raw materials in NPK fertilizer production. The primary objective was to develop a complex granulated fertilizer formulation, NPK 6:12:24 + 6% S, which maintains high nutritional quality while ensuring complete safety for human health and the environment.

A detailed physicochemical characterization of the ash sample was conducted, with a specific focus on the content of primary nutrients and heavy metals. Laboratory granulation of variants with the addition of 30 kg/t and 50 kg/t of ash was performed in an Eirich granulator, utilizing mineral acids and salts standardly used in the fertilizer manufacturing process. Final products underwent laboratory testing, and safety was verified according to the criteria of Regulation (EU) 2019/1009.

Laboratory analyses confirmed that sunflower ash is exceptionally rich in potassium (48.33% K₂O), with over 93% of this element in water-soluble form. Although the raw ash contains elevated concentrations of nickel and hexavalent chromium, the testing results of the final fertilizers show that the values of all heavy metals are several times lower than the legally permitted limits, thanks to the dilution effect within the formulation. The variant with 50 kg/t of ash demonstrated the highest potential for mineral salt substitution, alongside a slight increase in the exothermic reaction during the granulation process.

The research proves that sunflower husk ash represents a competitive and environmentally justified alternative to traditional potassium sources. The implementation of this solution directly contributes to the principles of circular economy, enabling the return of nutrients to the soil and reducing the landfilling of industrial waste, while maintaining full compliance with European regulations.

1. Introduction

The growth of the global population is associated with an increasing demand for food and natural resources worldwide [1]. According to data from the United Nations, more than 430 million tonnes of food waste are generated annually at the global level, while over 85 million tonnes are produced within the European Union [2]. Food waste has been identified as a priority area in the Waste Prevention Programme due to the substantial economic losses it causes, its significant potential for prevention, and its high ranking on the international political agenda (Sustainable Development Goals) [3]. In addition to social and ethical considerations, the issue of food surplus is also important from an environmental protection perspective, as large amounts of natural resources are consumed during food production, distribution, and storage.

According to available data, food waste generates approximately 8% of total greenhouse gas emissions [3], thereby contributing to climate change. Consequently, the issue of sustainable food waste management is of great importance from social, environmental, and economic perspectives. Nevertheless, modern society continues to face significant challenges in fully achieving a circular economy, which implies the development of efficient approaches for managing waste streams from all industrial sectors, as well as from households.

The need for a transition towards a circular economic model is not driven solely by environmental concerns—accelerated industrialization also leads to the gradual depletion of natural resources [4,5]. Viewing waste materials as potential by-products and their subsequent valorization can contribute to environmental protection while also increasing the availability of natural resources.

2. Regulatory framework and strategic management of waste streams

In contrast to agriculture, which predominantly generates biodegradable residues, waste from various industrial sectors often exhibits characteristics of hazardous waste. Consequently, efforts in many countries have primarily been directed toward the treatment and utilization of industrial waste, while circular management of agricultural waste has so far been considerably less represented [6]. Among the commonly applied approaches for reducing the negative environmental impact of waste, waste-to-energy processes, as well as improvements in composting, storage, and waste treatment methods, stand out [7].

In combination with stricter waste management policies, these measures can lead to significant positive outcomes; however, a key element is also raising awareness among producers and consumers regarding the importance of sustainable development. An additional mechanism for encouraging waste recycling and its transformation into valuable resources lies in the creation of economic benefits derived from such processes [8].

The application of the concept of valorization of agricultural by-products and waste—such as plant residues, animal waste, and other materials—enables their transformation into useful products. This approach not only significantly reduces the amount of waste disposed of in landfills but also facilitates the reintegration of organic and inorganic components into production cycles, in the form of fertilizers, soil amendments, pigments, and other products [9,10].

Within the framework of the European Commission's Circular Economy Action Plan, the revision of fertilizer regulations has been recognized as a key mechanism for stimulating the market for secondary raw materials. With the adoption of Regulation (EU) 2019/1009 [11], European legislation has significantly expanded its scope by integrating products derived from biogenic waste and other secondary sources. This regulation not only establishes a level playing field for all types of fertilizers but also actively promotes the use of recycled materials in agriculture.

In parallel with legislative changes, a technical report by a group of authors [12] has defined frameworks for the safe production and placement on the market of fertilizers derived from waste. This document sets strict criteria regarding permitted input materials and process conditions, quality standards and quality management systems, as well as the assessment of impacts on food safety and environmental protection.

At the national level, the quality of fertilizers in the Republic of Serbia is regulated by the Law on Plant Nutrition Products and Soil Amendments [13]. The accompanying by-laws [14,15] are aligned with the earlier European regulation EU 2003/2003, particularly in the domain of classification and labeling of mineral fertilizers.

2.1. Potential of sunflower husk ash in fertilizer production

Historically, biomass ash represented a primary source of potassium carbonate as early as the 18th century, while records of the first patents for fertilizer production from ash date back to 1790. Although the emergence of more economically accessible mineral sources temporarily displaced this material, contemporary research has reaffirmed sunflower husk ash as a safe and cost-effective alternative for potassium extraction [16].

During the industrial processing of sunflower for the production of edible oil or biodiesel, significant quantities of husks are generated. While these residues have traditionally been used as animal feed or disposed of in landfills, their energy potential through pyrolysis and combustion is increasingly being recognized [17,18]. The implementation of a two-stage reuse approach—where the husk

is first utilized as an energy source and the resulting ash subsequently as a raw material for fertilizers—offers a synergy between energy efficiency and environmentally sustainable agriculture.

Depending on the applied agrotechnical practices and sunflower cultivation conditions, ash obtained from the combustion of husks may be rich in key elements such as potassium, calcium, and magnesium, as well as certain microelements, including zinc, copper, and manganese [16,19–22]. Potassium carbonate, which can be extracted from plant ash, has long been used in agriculture as a fast-acting fertilizer [23–28]. Previous studies confirm that ash derived from sunflower husk combustion possesses exceptional value as a secondary raw material due to its specific mineral composition. According to research conducted by Ninkov et al. [29], ash samples tested in accredited laboratories exhibit a high content of water-soluble potassium, making this material a directly applicable source of nutrients. Analyses further confirm that the heavy metal content in this type of ash is significantly below the limit values prescribed by both national and European regulations, thereby eliminating the risk of soil contamination [29].

Additionally, studies conducted at industrial facilities indicate that sunflower ash, in addition to its primary potassium content, contains significant amounts of secondary nutrients such as calcium and magnesium, as well as beneficial microelements [30]. Zgureva-Filipova et al. [30] emphasize that, through the application of appropriate granulation technologies, this waste material can be successfully transformed into a highly efficient biofertilizer. Such characterization confirms that sunflower ash is not merely a by-product of energy processes, but a resource with substantial potential to enhance the sustainability of agricultural production.

Table 1. Comparative Characteristics of Sunflower Husk Ash According to Different Authors

Parameter	Unit	[29]	[30]
Moisture	%	0.40 – 1.63	0.42 – 0.76
pH value	–	11.0 – 12.6	12.0 – 12.1
Total P ₂ O ₅	%	4.90 – 10.42	1.40 – 10.50
Total K ₂ O	%	42.85 – 55.30	12.00 – 44.00

The aim of this study is to investigate the possibility of replacing conventional raw materials that serve as carriers of the potassium component (potassium chloride or potassium sulfate) in complex mineral fertilizers with ash obtained from the combustion of sunflower husks. The research focuses on the analysis of macro- and microelement content in the resulting fertilizers, as well as on evaluating their compliance with current regulatory requirements regarding the safety and quality of plant nutrition products.



Figure 1. A two-stage approach to the reuse of sunflower processing waste

3. Materials and methods

For the purposes of this study, ash obtained from sunflower processing followed by subsequent thermal treatment (combustion) of husks in an industrial facility located in the Republic of Serbia was used.

The sample represents a mixture of ash collected from different filtration sections, thereby ensuring the representativeness of the raw material under real industrial conditions, where logistical requirements often necessitate the use of a unified material stream. Such a composite sample constitutes a representative mixture that simulates the actual raw material available for fertilizer production. Prior to its introduction into the granulation process, the ash was homogenized and prepared in accordance with standard protocols for handling powdered materials.

The integration of such a novel raw material into the mineral fertilizer production process requires comprehensive physicochemical characterization in order to assess its compatibility with the selected formulation. In this context, laboratory analyses serve as the primary screening criterion for the acceptance or rejection of the raw material, while the accompanying documentation is systematically archived to ensure traceability and quality control.

In the case of a positive evaluation, the Development Laboratory proceeds with the preparation of experimental samples, focusing on two critical parameters:

1. Physical properties: Granulation potential of the sample and the stability of the resulting particles.
2. Chemical properties: Quantitative analysis of nutrient elements and control of heavy metal concentrations.

The first phase of the study was focused on evaluating the tendency toward granulation. To simulate the industrial process under controlled conditions, a laboratory granulator *Eirich Type EL10 Profi Plus* (Figure 2) was used.

Figure 2. Eirich granulator



The procedure began with the homogenization of solid components, followed by the gradual addition of liquid phases. Water was used as a technological modifier to initiate granule growth in cases where spontaneous granulation was insufficiently pronounced. High moisture content of the mixture was interpreted as an indicator of low granulation tendency or as a signal for the need to adjust phase ratios, which is crucial for optimizing the stability of the final product.

In the experimental part of the study, a wide range of raw materials was used to evaluate the substitution of conventional potassium carriers with sunflower ash:

- Mineral acids: phosphoric acid and sulfuric acid.
- Salts and mineral ores: ammonium sulfate, aluminum sulfate, SSP powder (Single Superphosphate), raw Egyptian phosphate (27% P_2O_5), and potassium chloride (60% K_2O).
- Secondary raw materials: ash obtained from the combustion of sunflower husks.

3.1. Definition of the Test Formulation and Analytical Methods

To evaluate the potential for integrating sunflower husk ash into the final product, an NPK 6:12:24 + 6% S formulation was selected. This formulation represents a complex mineral fertilizer with a high potassium content, making it an ideal model for investigating the substitution of conventional potassium sources (such as KCl or K_2SO_4) with the tested ash.

Different experimental variants of this formulation were designed based on the theoretical norm (TRN.EZ.VAR.), which serves as a reference model for calculating the proportions of raw materials and predicting the final nutrient content.

All physicochemical analyses of the prepared samples were carried out in the Testing Laboratory of the “Center for Applied Circular Economy Ltd.”, which is accredited in accordance with the international standard ISO/IEC 17025.

Table 2 provides a systematic overview of the methods used for the characterization of samples in the accredited laboratory [31]

Parameter	Method designation
Total nitrogen (N)	SRPS EN ISO 21663:2021
Ammonium nitrogen (N-NH ₄)	SRPS EN 15475:2016
Amide nitrogen (N-NH ₂)	SRPS H.B8.287:1983 (withdrawn)
Nitrate nitrogen (N-NO ₃)	SRPS EN 15476:2016

Parameter	Method designation
Total P ₂ O ₅	VM 003*
P ₂ O ₅ soluble in formic acid	SRPS EN 15919:2011 / SRPS EN 15959:2024
P ₂ O ₅ soluble in NAC	VM 003 ¹
P ₂ O ₅ soluble in citric acid	SRPS H.B8:292:1983 (withdrawn)
P ₂ O ₅ soluble in water	SRPS H.B8:290:1983 (withdrawn)
Total K ₂ O	SRPS EN H.B.8.294:1986 (withdrawn)
K ₂ O soluble in water	
Total organic carbon	SRPS EN 15936:2022 Method B
Fluorides (F ⁻)	VM 002
Chlorides (Cl ⁻)	VM 033
pH (1% solution)	VM 027
Moisture at 105°C	SRPS EN 12880:2007
Perchlorates	SRPS EN 17246:2020
Loss on ignition	SRPS EN 15935:2021
Free acidity	SRPS H.B8.295:1986
Silicon dioxide (SiO ₂)	VM 013
Total calcium (Ca)	EPA 7000B:2007 / SRPS EN 16319:2016
Water-soluble calcium (Ca)	
Total magnesium (Mg)	SRPS EN 16197:2013 / SRPS EN 15960:2012
Water-soluble magnesium (Mg)	
Total zinc (Zn)	EPA 6010C:2000 / EPA 3050B:1996
Total sulfur (S)	SRPS EN 15749:2022 Method A / SRPS EN 15960:2012
Water-soluble sulfur (S)	
Total copper (Cu)	EPA 6010C:2000 / EPA 3050B:1996
Total aluminum (Al)	
Total boron (B)	
Total sodium (Na)	
Water-soluble sodium (Na)	SRPS EN 16199:2013 / SRPS EN 15960:2012
Total iron (Fe)	
Total manganese (Mn)	
Total cobalt (Co)	
Arsenic (As)	EPA 7061A:1992 / EPA 3050B:1996
Cadmium (Cd)	
Cd / P ₂ O ₅	Calculated
Nickel (Ni)	EPA 6010C:2000 / EPA 3050B:1996
Chromium (Cr)	

* Mineral fertilizers - determination of extracted phosphorus (spectrophotometry), edition 01 of 10.01.223. based on SRPS H.B8:290:1983 "withdrawn" and SRPS H.B8:292:1983 "withdrawn". Sample preparation is carried out according to standard methods SRPS EN 15919:2011, SRPS EN 15957:2012, SRPS EN 15956:2012

Parameter	Method designation
Hexavalent chromium (Cr ⁶⁺)	SRPS EN ISO 15192:2021
Mercury (Hg)	EPA 6010C:2000 / EPA 3050B:1996
Lead (Pb)	
Selenium (Se)	
Wet sieving	VM 062

4- Results and discussion

4.1. Characterization of the Investigated Sunflower Husk Ash

Figure 3 shows the physical appearance of the analyzed ash, characterized by a gray color and a fine-grained structure.



Figure 3. Ash Obtained from the Combustion of Sunflower Husks

Based on the results of laboratory analyses, it was determined that the investigated ash possesses a high content of active substances. A particularly significant parameter is the total potassium content, expressed as K₂O, which amounts to 48.33%, of which as much as 44.99% is water-soluble. Such a high proportion of water-soluble potassium ensures high bioavailability of this element for plants, which is of crucial importance for the quality of mineral fertilizers.

During the drying of the raw material to the required moisture level of <2%, the K₂O content proportionally increases to approximately 50.00%. These values position sunflower husk ash as a competitive alternative to conventional potassium sources, considering that the K₂O content in standard potassium sulfate is around 50%.

The phosphorus content, expressed as P₂O₅, amounts to 7.58%. Although this value is lower compared to primary phosphate raw materials, it is important to emphasize that nearly the entire content is acid-soluble, while approximately 50% is water-soluble, which significantly contributes to the overall agronomic value of the raw material. The recorded loss on ignition of 17.62% indicates the presence of inorganic matter and incomplete combustion during thermal treatment, which is characteristic of raw materials of organic origin.

Table 3. Complete Results of Laboratory Analysis of the Ash Sample

Parameter	Unit	Content	Parameter	Unit	Content
Total nitrogen (N)	%	<0.5	Free acidity	%	<0.1
Ammonium nitrogen (N-NH ₄)	%	<1.0	Silicon dioxide (SiO ₂)	%	3.11
Amide nitrogen (N-NH ₂)	%	<1.0	Total calcium (Ca)	%	2.33
Nitrate nitrogen (N-NO ₃)	%	<1.0	Water-soluble calcium (Ca)	%	0.028
Total P ₂ O ₅	%	7.58	Total magnesium (Mg)	%	2.1
P ₂ O ₅ soluble in formic acid	%	7.06	Water-soluble magnesium (Mg)	%	0.015
P ₂ O ₅ soluble in NAC	%	5.57	Total zinc (Zn)	mg/kg	1129
P ₂ O ₅ soluble in citric acid	%	7.46	Total sulfur (S)	%	4.32
P ₂ O ₅ soluble in water	%	3.51	Water-soluble sulfur (S)	%	4.1
Total K ₂ O	%	48.33	Total copper (Cu)	mg/kg	392
K ₂ O soluble in water	%	44.99	Total aluminum (Al)	mg/kg	1545
Total organic carbon	%	1.78	Total boron (B)	mg/kg	835.4
Fluorides (F ⁻)	%	<0.005	Total sodium (Na)	%	0.72
Chlorides (Cl ⁻)	%	4.06	Water-soluble sodium (Na)	%	0.5
Moisture (105°C)	%	5.28	Total iron (Fe)	%	0.21
Perchlorates	mg/kg	<25	Total manganese (Mn)	mg/kg	92.5
Loss on ignition	%	17.62	Total cobalt (Co)	mg/kg	3.44

The pH value is 10.95, indicating a strongly alkaline reaction. This parameter represents a technological constraint regarding the maximum proportion of ash in the NPK 6:12:24 + 6% S formulation, considering that the target pH of the final product ranges from 3.7 to 5.0. An increase in pH above the critical threshold may lead to degradation of the granule structure, necessitating correction through the addition of acids, which directly affects the formulation space available for other components.

The results of heavy metal content analysis (Table 4) confirm that the raw material is fully compliant with the requirements of European Regulation (EU) 2019/1009. Although a hexavalent chromium (Cr⁶⁺) content of 2.69 mg/kg was detected, the expected incorporation level of ash in the final product (3–5%) ensures that the chromium content in the fertilizer remains well below the prescribed limit of 2 mg/kg.

A similar rationale applies to nickel (Ni). Although a value of 196.5 mg/kg was detected in the ash itself, which exceeds the limit for the final product, the mass fraction of ash in the final mixture ensures complete safety and compliance of the final fertilizer with European standards.

Table 5 presents the results of the particle size distribution analysis of the ash sample used for the preparation of mixtures corresponding to the NPK 6:12:24 + 6% S formulation. Based on the granulometric distribution (Table 5), it was determined that the raw material is predominantly characterized by a powdered structure, which is technologically advantageous for its application in mineral fertilizer production. Such a structure enables efficient homogenization of components and supports an effective granulation process.

Table 4. Heavy Metal Content in the Investigated Sunflower Ash

Parameter	Unit	Value	Limit value (EU 2019/1009) [†]
Arsenic (As)	mg/kg	3.60	40
Cadmium (Cd)	mg/kg	1.80	60
Cd / P ₂ O ₅ ratio	mg/kg P ₂ O ₅	23.75	60
Nickel (Ni)	mg/kg	196.5	100
Chromium (total Cr)	mg/kg	7.18	–
Hexavalent chromium (Cr ⁶⁺)	mg/kg	2.69	2.0
Mercury (Hg)	mg/kg	0.089	1
Lead (Pb)	mg/kg	10.86	120
Selenium (Se)	mg/kg	<1.0	–

*Table 5. Results of Granulometric Composition**Analysis of the Investigated Ash*

Particle size fraction	Unit	Value
Residue on sieve > 0.200 mm	%	0.14
Residue on sieve > 0.160 mm	%	0.20
Residue on sieve > 0.125 mm	%	0.22
Residue on sieve > 0.090 mm	%	0.20
Residue on sieve > 0.071 mm	%	1.22
Residue on sieve > 0.063 mm	%	0.28
Residue on sieve > 0.045 mm	%	1.42
Residue on sieve > 0.032 mm	%	0.82
Residue on sieve > 0.020 mm	%	2.86
Residue on sieve < 0.020 mm	%	92.64

4.2. Production of NPK 6:12:24 + 6% S Fertilizer

Based on the conducted investigations, it was determined that ash obtained from the combustion of sunflower husks demonstrates high potential for application in the production of mineral fertilizers. In accordance with the obtained results, formulations were developed with the addition of ash in amounts of 30 kg (TRN.EZ.VAR.1) and 50 kg (TRN.EZ.VAR.2) per 1000 kg of product, while comparison was performed with a control sample without ash addition (PLN.EZ.VAR.0).

During the experimental phase, the behavior of the raw material during the reaction, the granulation process, and gas evolution were carefully monitored. The formulation containing 30 kg of ash did not exhibit vigorous reactions. During the mixing of liquid and solid raw materials, only minimal gas release was observed. In contrast, the formulation containing 50 kg of ash showed a more pronounced exothermic reaction, accompanied by increased gas evolution (Figure 4) and heating of the reaction vessel.

[†] *Limit values are defined for the final product (inorganic fertilizer with macronutrients).



Figure 4. Gas Evolution as a Result of the Reaction Between Liquid and Solid Raw Materials Using the Formulation with 50 kg of Ash

This phenomenon has a dual significance. On one hand, the elevated reaction temperature may positively affect the reduction of additional energy requirements during the drying of the intermediate product under process conditions. On the other hand, increased gas evolution may represent an additional load on the gas scrubbing system, requiring appropriate technological control and process optimization.

During the preparation of NPK 6:12:24 + 6% S samples, no significant differences were observed in the granulation process between formulations with ash addition and those without it, confirming the suitability of the investigated raw material for application in NPK fertilizer production.

TRN.EZ.VAR.1 - 30kg



TRN.EZ.VAR.2 - 50kg



PLN.EZ.VAR.0 - 0kg



Figure 5. Granulation and Drying of NPK 6:12:24 + 6% S Samples (Before Sieving)

The addition of ash resulted in a lighter color of the product (Figure 6) compared to the formulation without ash, representing a visible difference relative to the control sample.

TRN.EZ.VAR.1 - 30kg



TRN.EZ.VAR.2 - 50kg



PLN.EZ.VAR.0 - 0kg



Figure 6. Appearance of the Final Product (After Sieving)

The results of the analysis of key parameters (Table 6) indicate system stability, suggesting that the addition of the investigated raw material does not negatively affect the quality of the final product. The total nitrogen (N) content ranges from 5.94 to 6.27%, with a slight decrease observed in samples containing ash compared to the control sample. Considering that ash is not a source of nitrogen, this effect can be attributed to dilution within the overall formulation.

For phosphorus, expressed as P_2O_5 , minor differences were observed among the samples. The total P_2O_5 content is slightly lower in samples with ash addition, while soluble forms (in NAC and water) show somewhat higher values in the sample containing 50 kg/t of ash, which may indicate a favorable influence of the ash's mineral composition on the solubility of phosphorus compounds.

The potassium content, expressed as K_2O , shows a slight increase compared to the control sample. The total K_2O content increased from 23.99% in the control sample to 24.75–24.85% in samples with ash addition, while the water-soluble K_2O fraction also shows a slight increase. This result is expected, given that biomass ash, including sunflower husk ash, represents a significant source of potassium.

An increase in calcium and magnesium content was also observed, both in total and water-soluble forms, as a consequence of the mineral composition of the ash. This increase may have a positive agronomic effect, as these elements contribute to improving soil chemical properties and nutrient availability for plants.

For microelements (B, Zn, Cu, Co, Mn, and Fe), minor variations in concentration were observed; however, all values remain within the expected limits for this type of product. A notable increase in boron and zinc content was observed, which may represent an additional agronomic benefit.

The chloride content is lower in samples with ash addition compared to the control sample, which is favorable from the perspective of fertilizer quality and potential effects on chloride-sensitive crops. Perchlorate and phosphonate levels are below detection limits or present at very low concentrations.

The pH value ranges from 5.63 to 6.08, indicating a slightly acidic reaction of the product, with no significant changes observed due to ash addition. Moisture content in samples containing ash is lower compared to the control sample, which may contribute to improved product stability during storage.

Based on the obtained results, it can be concluded that the addition of sunflower husk ash in amounts up to 50 kg/t does not compromise the declared nutritional composition of NPK fertilizers, and may even contribute to an increase in certain macro- and microelements.

The results of heavy metal content analysis (Table 7) indicate that all obtained values are significantly below the limit values prescribed by European Regulation (EU) 2019/1009 and the applicable regulations of the Republic of Serbia, confirming the safety of the product with respect to the presence of potentially toxic elements.

A positive effect of ash application is reflected in the reduced content of arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), and hexavalent chromium (Cr^{6+}), while a slight increase in nickel (Ni) and mercury (Hg) content was observed compared to the control sample. These changes remain within permissible limits and do not pose a risk to product quality or safety.

*Table 6. Results of Basic Parameter Analysis of NPK 6:12:24 + 6% S
Products Obtained Using Ash*

Parameter	Unit	PLN.EZ.VAR.0 (Control)	TRN.EZ.VAR.1 (30 kg ash)	TRN.EZ.VAR.2 (50 kg ash)
Total N	%	6.27	5.94	6.05
N-NH ₄ (ammonium)	%	6.27	5.94	6.05
Total P ₂ O ₅	%	12.68	12.21	12.25
P ₂ O ₅ soluble in formic acid	%	10.34	10.19	10.52
P ₂ O ₅ soluble in NAC	%	9.17	8.76	9.38
P ₂ O ₅ soluble in water	%	6.36	6.10	6.97
Total K ₂ O	%	23.99	24.75	24.85
K ₂ O soluble in water	%	23.89	24.15	24.25
Chlorides (Cl ⁻)	%	17.73	15.75	15.81
Perchlorates (ClO ₄ ⁻)	mg/kg	<25.0	<25.0	<25.0
Phosphonates (PHO ₃ ²⁻)	%	<0.1	<0.1	<0.1
Total Ca	%	6.39	7.65	7.06
Total CaO	%	8.95	10.71	9.88
Water-soluble Ca	%	1.04	1.08	1.49
Water-soluble CaO	%	1.46	1.54	2.13
Total Mg	%	0.21	0.2181	0.2708
Total MgO	%	0.29	0.3635	0.4513
Water-soluble Mg	%	0.09	0.1483	0.2403
Water-soluble MgO	%	0.15	0.2472	0.4005
Total S	%	7.06	7.95	8.15
Total SO ₃	%	17.65	19.88	20.37
Water-soluble S	%	6.99	7.13	7.40
Water-soluble SO ₃	%	17.47	17.82	18.50
Total B	%	0.002	0.0034	0.0049
Total Zn	%	0.009	0.012	0.015
Total Cu	%	<0.001	0.0018	0.0026
Total Co	%	<0.001	0.0002	0.0002
Total Mn	%	0.03	0.0215	0.022
Total Fe	%	0.65	0.58	0.56
Total Na	%	0.50	0.34	0.36
Water-soluble Na	%	0.29	0.25	0.25
pH	—	5.88	6.08	5.63
Moisture (105°C)	%	0.90	0.50	0.50

Table 7. Comparative Overview of Heavy Metal Content in Fertilizer Samples and Regulatory Limits

Parameter	Unit	PLN.EZ.VAR.0 (Control)	TRN.EZ.VAR.1 (30 kg ash)	TRN.EZ.VAR.2 (50 kg ash)	Limit value (EU 2019/1009)
Arsenic (As)	mg/kg	7.40	6.66	6.55	40
Cadmium (Cd)	mg/kg	2.84	2.17	2.71	60
Cd / P ₂ O ₅	mg/kg	22.40	17.77	22.12	60
Total chromium (Cr)	mg/kg	44.04	39.65	45.80	–
Hexavalent chro- mium (Cr ⁶⁺)	mg/kg	0.70	0.45	0.53	2.0
Nickel (Ni)	mg/kg	13.08	15.17	19.30	100
Lead (Pb)	mg/kg	<5.0	<5.0	<5.0	120
Mercury (Hg)	mg/kg	0.028	0.062	0.060	1.0

The analysis of heavy metals in the final NPK 6:12:24 + 6% S product (Table 7) demonstrates that the integration of ash at levels up to 50 kg per tonne (Variant TRN.EZ.VAR.2) is entirely safe. It was observed that ash-containing variants even exhibit lower arsenic and cadmium content compared to the control sample, indicating that sunflower ash may act as a “cleaner” component relative to certain mineral raw materials.

Regarding the mercury (Hg) dynamics, a slight increase was observed in the ash-amended variants, where the concentration rose from 0.028 mg/kg in the control sample (PLN.EZ.VAR.0) to 0.062 mg/kg and 0.060 mg/kg in the TRN.EZ.VAR.1 and TRN.EZ.VAR.2 variants, respectively. This minor incremental rise is directly attributable to the baseline Hg concentration naturally present in the raw sunflower husk ash (0.089 mg/kg, Table 4), which undergoes minor concentration within the residual ash fraction during biomass combustion. However, despite this slight increase, the Hg levels in all formulated fertilizer variants remain orders of magnitude below the strict threshold of 1.0 mg/kg established by Regulation (EU) 2019/1009, reinforcing that the incorporation of this circular raw material satisfies all ecological and toxicological safety criteria.

Table 8 presents the granulometric composition of the samples after sieving. The results show that the particle size distribution complies with the requirements of European regulations and the applicable legislation of the Republic of Serbia.

Compared to the control sample, the distribution of granule sizes is very similar; however, an increase in the fraction of granules in the 4–5 mm size range was observed, which can be considered a positive effect. Theoretically, an ideal granulometric distribution would imply an even representation of granules in three fractions: 2–3 mm (33.33%), 3–4 mm (33.33%), and 4–5 mm (33.33%). This parameter plays a significant role in optimizing the granulation process and achieving stable physico-mechanical properties of the final product.

Table 8. Results of Granulometric Composition Analysis of NPK 6:12:24 + 6% S Products

Granulometric fraction	Unit	PLN.EZ.VAR.0 (Control)	TRN.EZ.VAR.1 (30 kg ash)	TRN.EZ.VAR.2 (50 kg ash)
Residue on sieve >5.60 mm	%	0.00	0.00	0.00
Residue on sieve >5.00 mm	%	0.49	0.36	0.44
Residue on sieve >4.00 mm	%	11.24	17.78	18.68
Residue on sieve >3.00 mm	%	38.97	29.26	27.34
Residue on sieve >2.00 mm	%	45.27	47.78	46.86
Residue on sieve >1.80 mm	%	3.11	3.82	4.26
Residue on sieve >1.18 mm	%	0.86	0.82	1.90
Residue on sieve <1.18 mm	%	0.06	0.18	0.52

5. Conclusion

This study confirmed that sunflower husk ash represents a high-quality secondary raw material with a potassium content of 48.33% K₂O, of which nearly 93% is in water-soluble form. The implementation of ash into the NPK 6:12:24 + 6% S formulation not only successfully replaced a portion of conventional potassium components but also contributed to an increased content of secondary elements such as calcium (Ca) and magnesium (Mg), as well as essential microelements, primarily boron (B) and zinc (Zn).

The most significant result in terms of safety is the confirmation that the final product fully complies with the requirements of Regulation (EU) 2019/1009. Although the raw ash contains elevated concentrations of nickel and hexavalent chromium, the dilution effect within the formulation (ash content of 3–5%) ensures that the levels of these metals in the fertilizer remain well below the permitted limits. Moreover, ash-containing variants exhibited lower levels of arsenic and cadmium compared to the control sample, further supporting the environmental profile of this raw material.

Experimental granulation using the Eirich granulator demonstrated that the powder-like structure of the ash (with more than 92% of particles smaller than 0.020 mm) enables excellent homogenization and the formation of stable, spherical granules. The variant with 30 kg/t (TRN.EZ.VAR.1) exhibited a more stable process without vigorous chemical reactions, while the variant with 50 kg/t (TRN.EZ.VAR.2) resulted in a more pronounced exothermic reaction accompanied by gas evolution. In industrial conditions, this requires enhanced control of gas treatment systems but may also reduce energy requirements for product drying.

This study demonstrates that the “waste-to-energy-to-fertilizer” principle can be successfully implemented in a real industrial context. The use of ash as a by-product of the energy utilization of sunflower husks directly reduces landfill pressure and dependence on imported mineral raw materials, thereby closing the nutrient loop in agriculture.

The integration of sunflower ash at levels up to 50 kg per tonne of product represents an optimal solution that balances high nutritional value, technological efficiency, and full safety for human health and the environment.

6. References

- [1] *** Food and Agriculture Organization (FAO), *About FAO*, FAO, Rome, Italy, 2025. Available online: <https://www.fao.org/about/about-fao/en/> (accessed on 14 March 2025).

- [2] *** United Nations Environment Programme (UNEP), *Food Waste Index Report 2021*, UNEP, Nairobi, Kenya, 2021. Available online: <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021> (accessed on 14 March 2025).
- [3] *** Ministry of Environmental Protection of the Republic of Serbia, *Waste Prevention Plan*, Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 17/2025, Belgrade, Serbia, 2025. Available online: https://www.ekologija.gov.rs/sites/default/files/2025-03/plan_prevencije_stvarana_otpada_1.pdf (accessed on 14 March 2026).
- [4] **Ngangnchi, F. H., N. A. Aquilas, M. E. Mbella**, Natural resource use, industrialization and climate change in Africa: Blueprints for sustainable regional development, *Research in Globalization*, 9 (2024), pp. 100245.
- [5] **Usman, M., D. Balsalobre-Lorente**, Environmental concern in the era of industrialization: Can financial development, renewable energy and natural resources alleviate some load?, *Energy Policy*, 162 (2022), pp. 112780.
- [6] **Pagey, S. V., C. S. Nagar**, Waste management in food and agricultural industries, In *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences*, Iterative International Publishers (IIP), Chikkamagaluru, India, 2024, pp. 555–561.
- [7] **Petrov, P., D. Zgureva-Filipova, K. Filipov, I. Ganev**, Analysis of the overall potential for electricity production from farm animals manure in Bulgaria, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1128 (2023), 012001.
- [8] **Hale, A., A. R. Koker**, Analyzing and mapping agricultural waste recycling research: An integrative review for conceptual framework and future directions, *Resources Policy*, 85 (2023), pp. 103987.
- [9] **Raimi, A., A. Roopnarain, R. Adeleke**, Biofertilizer production in Africa: Current status, factors impeding adoption and strategies for success, *Scientific African*, 11 (2021), e00694.
- [10] **Yunus, M. U., K. Silas, A. L. Yaum, B. H. Kwaji**, A review of biofertilizer production: Bioreactor, feedstocks and kinetics, *SSRG International Journal of Recent Engineering Science*, 9 (2022), pp. 39–49.
- [11] *** European Parliament and of the Council, *Regulation (EU) 2019/1009*, Official Journal of the European Union, 2019. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/eng> (accessed on 14 March 2026).
- [12] **Huygens, D., H. G. M. Saveyn, D. Tonini, P. Eder, L. Delgado Sancho**, Technical Proposals for Selected New Fertilising Materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009), European Commission, Joint Research Centre, Luxembourg, 2019. Available online: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC117856> (accessed on 14 March 2025).
- [13] *** Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management, *Law on Plant Nutrition Products and Soil Conditioners*, Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 41/2009 and 17/2019, 2019. Available online: <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-sredstvima-za-ishranu-bilja-oplemenjivacima-zemljista.html> (accessed on 14 March 2025).
- [14] *** Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management, *Regulation on the Methods of Fertilizers and Soil Conditioners Testing*, Official Gazette of the Republic of Serbia, No. 84/2017, 2017. Available online: https://www.paragraf.rs/propisi_download/pravilnik-o-metodama-ispitivanja-sredstava-za-ishranu-bilja-i-oplemenjivaca-zemljista.pdf (accessed on 14 March 2025).
- [15] *** Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management, *Regulation on the Requirements for Classification and Determining the Quality of Plant Nutrition Products*, Official Gazette of the

- Republic of Serbia, No. 30/2017 and 31/2018, 2018. Available online: http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2017_04/t04_0006.htm (accessed on 14 March 2025).
- [16] **Paleckienė, R., A. Sviklas, R. Šlinkšienė, V. Štreimikis**, Complex fertilizers produced from sunflower husk ash, *Polish Journal of Environmental Studies*, 19 (2010), pp. 973–979.
- [17] **Quaranta, N., M. Unsen, H. López, C. Giansiracusa, J. A. Roether, A. R. Boccaccini**, Ash from sunflower husk as raw material for ceramic products, *Ceramics International*, 37 (2011), pp. 377–385.
- [18] **Maj, G., P. Krzaczek, A. Kuranc, W. Piekarski**, Energy properties of sunflower seed husk as industrial extrusion residue, *Agricultural Engineering*, 21 (2017), pp. 77–84.
- [19] **Isemin, R., F. Tabet, A. Nebyvaev, V. Kokh-Tatarenko, S. Kuzmin, O. Milovanov, D. Klimov, A. Mikhalev, S. Dobkin, Y. Zhulaev**, Prediction of the behavior of sunflower husk ash after its processing by various torrefaction methods, *Energies*, 15 (2022), 7483.
- [20] **Akca, M. O., P. A. Bozkurt, F. Gokmen, H. Akca, K. D. Yagcioglu, V. Uygur**, Engineering the biochar surfaces through feedstock variations and pyrolysis temperatures, *Industrial Crops and Products*, 218 (2024), pp. 118819.
- [21] **Somba, B. E., M. Napitupulu, D. K. Walanda, A. Anshary, W. S. Talo**, Optimizing the performance of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seed shell-derived biochar for lead ion adsorption, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19 (2024), pp. 259–265.
- [22] **Zhu, Z., C. Zhang, R. Liu, S. Li, M. Wang**, Sunflower straw ash as an alternative activator in alkali-activated grouts: A new 100% waste-based material, *Ceramics International*, 49 (2023), pp. 32308–32312.
- [23] **Dahunsi, S. O., O. J. Ogunwole**, Biofertilizer production systems: Industrial insights, In *Biofertilizers*, Publisher Unknown, 2021, pp. 21–30.
- [24] **Romanowska-Duda, Z., R. Janas, M. Grzesik**, Increasing fertilization efficiency of biomass ash by the synergistically acting digestate and extract from water plants sequestering CO₂ in sorghum crops, *Molecules*, 29 (2024), 4397.
- [25] **Rushan, G., V. Sotnikov**, Characteristics of granulated activated carbon from a mixture of plant raw material waste, *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 335 (2024), pp. 196–205.
- [26] **Mirparsa, T., H. R. Ganjali, M. Dahmardehe**, The effect of bio fertilizers on yield and yield components of sunflower oil seed and nut, *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 5 (2016), pp. 46–49.
- [27] **Yelatontsev, D., A. Mukhachev**, Utilizing of sunflower ash in the wet conversion of phosphogypsum—A comparative study, *Environmental Challenges*, 5 (2021), 100241.
- [28] **Serbănoiu, A. A., C. M. Gradinaru, N. Cimpoesu, D. Filipeanu, B. V. Serbanoiu, C. C. Chereches**, Study of an ecological cement-based composite with a sustainable raw material, sunflower stalk ash, *Materials*, 14 (2021), 7177.
- [29] **Ninkov, J., S. Jakšić, P. Nenin, M. Gvozdenović, B. Mijić, B. Radović, S. Milić**, Waste ashes from burned sunflower hulls as new fertilising materials, *Environmental Engineering – Inženjerstvo okoliša*, 10 (2023), pp. 19–23.
- [30] **Zgureva-Filipova, D., V. Nikolova, L. Krasteva, K. Filipov**, Self-sustaining double-stage circularity through utilization of sunflower agriculture’s waste in bio-fertilizers: Commissioning of a full-scale facility, *Applied Sciences*, 15 (2025), 2203.
- [31] ***** CPCE Scope of Accreditation**. Available online: <https://cpce.rs/> (accessed on 14 March 2026).

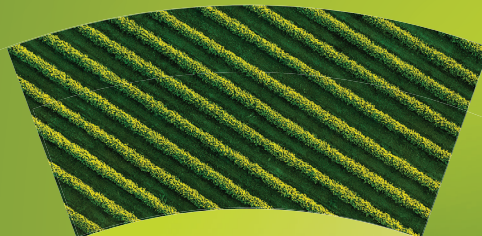
OGLASNI DEO



Elixir Prahovo

Inovacijama do održive industrije.

Stvaramo nasleđe kroz održivi razvoj.



elixirgroup.rs

Pioneering for You

wilo

Wilo pumpe i pumpni sistemi za otpadnu vodu

Efikasno. Pouzdano. Kvalitetno.

Primena u industriji, komunalnim preduzećima, PPOV

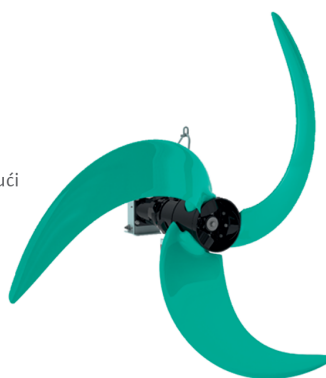


Wilo pumpe i sistemi za otpadne vode i mehanizmi za mešanje sa uronjivim motorom. Savladavaju velike izazove i dugoročno obezbeđuju vrhunski kvalitet u tretmanu otpadnih voda.



Wilo-EMU FA:

- Pumpanje otpadne vode sa ili bez čvrstih materija
- Mogućnost suve i mokre ugradnje
- Veliki, slobodni sferni prolaz
- Visoka efikasnost i kvalitet zahvaljujući motorima IE3 generacije



Wilo-EMU TR:

- Energetski optimizovano mešanje i obrtanje aktivnog mulja
- Stvaranje brzine protoka u kanalima za kružnu cirkulaciju
- Visoka efikasnost i kvalitet zahvaljujući motorima IE3/IE4 generacije

***više informacija o proizvodima kompanije Wilo na www.wilo.rs**

Wilo Beograd d.o.o. · Tetovska 72, 11000 Beograd Srbija · T/F +381 11 2853 258, 2853 259, 4043 820, 4043 821, 4043 822 · office@wilo.rs · www.wilo.rs

Bosch industrijski kotlovi i postrojenja

Kompetencija i poverenje



Bosch Industriegessel je u svetskim razmerama renomirani proizvođač toplotnih i vrelovodnih kotlova, parnih kotlova, kotlovskih sistema i opreme za kotlarnice.

Počevši od našeg osnivanja 1865. godine, specijalizovani smo za industrijsku kotlogradnju, te našim klijentima možemo ponuditi sveobuhvatni specijalizovani Know-how. Merila našeg proizvodnog programa i naših servisnih usluga su snaga inovacija, svest o kvalitetu proizvoda i efikasnost.

Više od 100.000 isporučenih kotlovskih sistema u više od 140 zemalja, dokaz su visoke pouzdanosti naših industrijskih kotlova. Naša kotlovska postrojenja možete naći gotovo u svakoj grani industrije - između ostalog i u industriji pića, prehrambenoj industriji, industriji građevinskog materijala, hemijskoj industriji, tekstilnoj industriji i industriji papira i td. Globalne kompanije kao što su Coca Cola, BASF, Siemens, Ytong, Michelin, Heineken, Carlsberg, Nestle ili Esso, poklonile su poverenje našim inovativnim parnim i vrelovodnim kotlovskim postrojenjima.



Kazantrade Solution d.o.o.
Kneza Višeslava 61A
11090 Beograd
www.kazantrade.rs
Mail: dejan.dotlic@kazantrade.rs

<https://www.bosch-thermotechnology.com/global/en/commercial-industrial/home/>



BOSCH
Tehnologija za život

DDA: Nova generacija – jednostavna i precizna

- * Brzo i lako puštanje u rad
- * Unapređena povezanost i nadzor
- * Laka i jednostavna popravka, servis i održavanje

Hoćete li nam se pridružiti u misiji da svaka kap bude važna?

Skenirajte QR kod i saznajte više o novoj generaciji dozir pumpi



reddot winner 2024

Grundfos Srbija d.o.o.
Omladinskih brigada 90v
RS-11070 Novi Beograd Serbia
Phone: (+381) 11 2258 740
www.grundfos.rs

GRUNDFOS

Possibility in every drop

NUMIKON PRO - Vaš partner u inženjerskim izazovima.

NUMIKON PRO pomaže vam u odabiru optimalnih softverskih rešenja, procesa nabavke, do brze i kvalitetne obuke zaposlenika te stalne tehničke podrške.

- Vodeći svetski softveri za projektovanje, konstruisanje, te proračune procesnih i energetskih postrojenja
- Implementacija rešenja kroz jasno definisane faze
- Profesionalna tehnička podrška i obuka

Naša misija je da obezbedimo kvalitetna i prilagođena softverska rešenja koja povećavaju produktivnost i efikasnost naših klijenata. Djelujući kao višegodišnji regionalni zastupnik tvrtke Hexagon, razvili smo specijalizovane usluge za sve korisnike Hexagon softverskih rešenja.

CADWorx Suite

Paket snažnih i prilagodljivih alata koji omogućuju jednostavnu izradu potpuno inteligentnih 2D i 3D modela energetskih i procesnih postrojenja, uključujući modele cevovoda, opreme cevovoda, HVAC, čelične i betonske konstrukcije.

- CADWorx Plant
- CADWorx P&ID
- CADWorx Structure
- CADWorx Specification Editor
- Isogen za CADWorx
- Orthogen za CADWorx
- CADWorx Design Review

Analysis Suite

- **CAESAR II**
Softver za analizu naprezanja i elastičnosti, te dinamike cevovoda.
- **PV Elite**
Kompletno rešenje za projektovanje i proračun posuda pod pritiskom i izmenjivača.
- **TANK**
Sveobuhvatan programski paket za projektovanje, analizu i procenu naftnih spremnika.
- **PIPESTRESS**
Kompletni sustav izračuna za nuklearne i nenuklearne sustave.
- **GT STRUDL**
Softver za strukturne analize visoke kvalitete za sveobuhvatnu analizu metodom konačnih elemenata čeličnih i betonskih konstrukcija.

NUMIKON PRO TIPS

Training - Započinjemo obukom Vašeg tima
Implementation - Implementiramo softverska rešenja
Project - Projektna i tehnička podrška
Support - Podrška tokom celog projektnog procesa



scan
me

Ogranak NUMIKON
programska rešenja i oprema d.o.o.

Subotička 94, 21000 Novi Sad
E-mail: info@numikon-pro.rs
M: +381 62 55 1656





BC

Beo Čista
Energija d.o.o.



ZELENA ENERGIJA DANAS ČUVA NAŠE SUTRA

www.bcenergy.rs

**Smanji
rizik.**

**Povećaj
kontrolu.**

Bespilotne letelice, lasersko skeniranje i specijalizovani senzori za monitoring i inspekciju procesnih postrojenja. Od isporuke opreme, implementacije sistema, obuke osoblja, merenja i obrade, do finalnih izveštaja –
Geotaur d.o.o.

+381 65 835 22 15

GEOTUR.COM



Procesing '26

39. Međunarodni kongres
o procesnoj industriji

Negotin
3. i 4. jun 2026.

Organizator

Društvo za procesnu tehniku
Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije
(SMEITS)



Suorganizator

Katedra za procesnu tehniku
Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd



Generalni pokrovitelj



Elixir Prahovo

Sponzori

