



Tehnološko-metalurški fakultet
Univerziteta u Beogradu
Faculty of Technology and Metallurgy
University of Belgrade



Centar celuložno-papirne, ambalažne i
grafičke industrije Srbije
Center for Pulp, Paper, Packaging and
Graphics in Serbia

XXVII MEĐUNARODNI SIMPOZIJUM IZ OBLASTI CELULOZE, PAPIRA, AMBALAŽE I GRAFIKE

XXVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN THE FIELD OF PULP, PAPER, PACKAGING AND GRAPHICS

Zbornik radova Proceedings

Beograd, 17-18. jun 2026.
Belgrade, June 17th-18th 2026

Izdavač – Publisher

Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu
Centar celuložno-papirne, ambalažne i grafičke industrije Srbije

Za izdavača – In charge of Publishing

Prof. dr Mirjana Kijevčanin, dekanka

Glavni i odgovorni urednik – Editor-in-chief

Prof. dr Dušan Mijin, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Recenzenti – Reviewers

Dr Milorad Krgović, redovni profesor u penziji, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Nenad Milosavljević, Adj. Prof., Abo Akademi University, Faculty of Science and Engineering, Laboratory of Process and Systems Engineering, Turku, Finland

Dr Đorđe Janačković, redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

(<https://orcid.org/0000-0002-8291-4345>)

Dr Mirjana Kostić, redovni profesor Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

(<https://orcid.org/0000-0001-9925-4884>)

Dr Predrag Živković, vanredni profesor Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

(<https://orcid.org/0000-0002-9268-9495>)

Priprema za štampu – Prepress

Predrag Živković

Tiraž – Impression

100 primeraka

Godina izdavanja – Year of publication

2026.

Štampa – Printed by

TMF, Beograd, RIC grafičkog inženjerstva, Karnegijeva 4, 11000 Beograd

ISBN 978-86-7401-402-8

Svi radovi u ovom Zborniku su licencirani pod – All papers in this Proceedings are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. (CC BY 4.0)



CIP – Каталогизacija y публикацији
Народна библиотека Србије

CIP

676(082)

621.798.14(082)

655(082)

МЕЂУНАРОДНИ СИМПОЗИЈУМ ИЗ ОБЛАСТИ ЦЕЛУЛОЗЕ, ПАПИРА, АМБАЛАЖЕ И ГРАФИКЕ (27 ; 2026 ; БЕОГРАД)

Zbornik radova = Proceedings / XXVII međunarodni simpozijum iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike, Beograd, 17-18. jun 2026. = XXVII International Symposium in the Field of Pulp, Paper, Packaging and Graphics, Belgrade, June 17th-18th 2026 ; [glavni i odgovorni urednik, editor-in-chief Dušan Mijin]. - Beograd : Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta, Centar celuložno - papirne, ambalažne i grafičke industrije Srbije, 2026 (Beograd : TMF, RIC grafičkog inženjerstva). - 173 str. : ilustr. ; 30 cm
Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 100. - Bibliografija uz svaki rad.

ISBN 978-86-7401-402-8

a) Индустија хартије и целулозе -- Зборници b) Индустија амбалаже -- Зборници v) Графичка индустрија -- Зборници
COBISS.SR-ID 195811849

XXVII MEĐUNARODNI SIMPOZIJUM IZ OBLASTI CELULOZE, PAPIRA, AMBALAŽE I GRAFIKE
XXVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN THE FIELD OF PULP, PAPER, PACKING AND GRAPHICS

NAUČNI ODBOR SIMPOZIJUMA – SCIENTIFIC BOARD:

- Prof. Djordje Janackovic, Ph. D., Faculty of Technology and Metallurgy, (TMF) Belgrade, Serbia, chairman
- Prof. Mirjana Kijevcanin, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Predrag Zivkovic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Petar Uskokovic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Nenad Milosavljevic, Ph. D., Faculty of Science and Engineering, Turku, Finland
- Prof. Juha Leimu, Ph. D., Turku University of Applied Sciences, Turku, Finland
- Prof. Paul H. Wilson, Ph. D., TAPPI Pulp & Paper Safety Committee, Norcross, Georgia, USA
- Prof. Valentin I. Popa, Ph. D., Faculty of Chemical Industry, Iasi, Romania
- Prof. Patrick Gane, Ph. D., Chemical Engineering, Aalto University, Aalto, Finland
- Prof. Stanka Nedeva, Ph. D., Pulp and Paper Institute, Sofia, Bulgaria
- Prof. Krasimir Savov, Ph. D., Pulp and Paper Institute, Sofia, Bulgaria
- Daven Chamberlain, Ph. D., Paper Industry Technical Association – PITA, Lancashire, United Kingdom
- Prof. Vilko Ziljak, Ph. D., Faculty of Graphic Arts of the University of Zagreb, Zagreb, Croatia
- Prof. Ivana Ziljak Stanimirovic, Ph. D., Faculty of Graphic Arts of the University of Zagreb, Zagreb, Croatia
- Prof. Anastasios E. Politis, Ph. D., University of West Attica and Hellenic Open University, Athens, Greece
- Prof. Melina Kalagasidis Krusic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Mirjana Kostic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Ivanka Popovic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Zorica Knezevic-Jugovic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Sanja Jevtic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Milos Petrovic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia
- Prof. Goran Jankes, Ph. D., Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia
- Prof. Milan Betic, Ph. D., Faculty of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia
- Prof. Milos Djukic, Ph. D., Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia
- Petronela Nechita, Ph. D., Dunarea de Jos University of Galati, Galati, Romania
- Marko Jagodic, BSc, DITP-Pulp and Paper Engineers and Technicians Association, Ljubljana, Slovenia
- Prof. Urska Vrabec Brodnjak, Ph. D., Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, Slovenia
- Prof. Klemen Mozina, Ph. D., Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, Slovenia
- Gregor Lavrič, Ph. D., ICP - Pulp and Paper Institute, Ljubljana, Slovenia
- Prof. Hrustem Smilhodzic, Ph. D., Faculty of Technical Studies, Travnik, Bosnia & Herzegovina
- Prof. Sefkija Botonjic, Ph. D., Faculty of Metallurgy and Technology, Zenica, Bosnia & Herzegovina
- Prof. Milorad Krgovic, Ph. D., TMF, Belgrade, Serbia

ORGANIZACIONI ODBOR – ORGANIZATIONAL BOARD:

- Milorad Krgovic, Faculty of Technology and Metallurgy (TMF), Belgrade, chairman
- Predrag Zivkovic, TMF, Belgrade
- Marina Krsikapa, Center CPA&G, TMF, Belgrade
- Natasa Govedarica, Chamber of commerce and industry of Serbia, Belgrade
- Ninkola Pejovic, UMKA, Umka
- Sasa Dobric, UMKA, Umka
- Bojan Bilal, SMURFIT WESTROCK BELGRADE, Belgrade
- Ivan Stefanov, SMURFIT WESTROCK BELGRADE, Belgrade
- Djurdja Radivojevic, SMURFIT WESTROCK AVALA ADA, Belgrade
- Nikola Marinkovic, SMURFIT WESTROCK AVALA ADA, Belgrade
- Mirko Stanic, NATRON HAYAT, Maglaj, Bosnia & Herzegovina
- Armina Camic, NATRON HAYAT, Maglaj, Bosnia & Herzegovina
- Edina Husic, NATRON HAYAT, Maglaj, Bosnia & Herzegovina
- Dragana Obradovic, SHP CELEX, Banja Luka, Bosnia & Herzegovina
- Zoran Petkovic, KARTONVAL, Belgrade
- Zoran Devic, PROGRES, Belgrade
- Vladan Ignjatijevic, KOTEX VISCOFAN, Novi Sad

- **Svetlana Savic**, KOTEX VISCOFAN, Novi Sad
- **Biljana Lazarevic**, CASA FORTE, Belgrade
- **Tibor Kiss**, HUNTHAI LOGISTICS, Budapest, Hungary
- **Nenad Milosavljevic**, Faculty of Science and Engineering, Turku, Finland
- **Aldin Obucina**, Faculty of Technical Studies, Travnik, Bosnia & Herzegovina
- **Danijela Osap**, Center CPA&G, TMF, Belgrade
- **Milos Petrovic**, TMF, Belgrade
- **Darko Radosavljevic**, TMF, Belgrade
- **Djordje Janackovic**, TMF, Belgrade, Belgrade

CONTRIBUTORS – POKROVITELJI

- **MINISTARSTVO NAUKE, TEHNOLOŠKOG RAZVOJA I INOVACIJA REPUBLIKE SRBIJE, Beograd, Srbija**
- **UDRUŽENJE ZA ŠUMARSTVO, PRERADU DRVETA, INDUSTRIJU NAMEŠTAJA I PAPIRA PRIVREDNE KOMORE SRBIJE, Beograd, Srbija**
- **BTG Instruments GmbH, Wessling, Germany**
- **ERGA d.o.o, Vrpolje, Republika Hrvatska**
- **HONEYWELL d.o.o. Beograd, Srbija**
- **INNOMOTICS d.o.o. Beograd, Srbija**
- **NATRON HAYAT D.D, Maglaj, Bosna i Hercegovina**
- **NOVOS d.o.o, Beograd, Srbija**
- **OMYA International AG, Oftringen, Switzerland**
- **OMYA VENČAC d.o.o, Banja-Arandjelovac, Srbija**
- **ProJet B.V., Meerssen, The Netherlands**
- **SKF Commerce d.o.o, Beograd, Srbija**
- **SMURFIT WESTROCK AVALA ADA d.o.o, Beograd, Srbija**
- **SMURFIT WESTROCK BEOGRAD d.o.o., Beograd, Srbija**
- **SUNNEA OY, CONSULTING &ENGINEERING, Jyskä, Finland**
- **UMKA d.o.o, Umka, Srbija**
- **VALMET Technologies Inc.**

SPONSORS – SPONZORI

- **BVG Bauer-Verfahrenstechnik-GmbH, Gewerbering, Germany**
- **DETO d.o.o, Pančevo, Srbija**
- **FASIL A.D, Arilje, Srbija**
- **GRAFOTEX d.o.o, Banja Luka, Bosna i Hercegovina**
- **KEMIRA CHEMIE GesmbH, Krems, Austria**
- **KEMIRA KTM d.o.o, Ljubljana, Slovenia**
- **O2 PROCESS SOLUTIONS d.o.o, Beograd, Srbija**
- **SHP Celex, a.d, Banja Luka, Bosna i Hercegovina**

**PROGRAM OF THE
XXVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN THE FIELD OF PULP,
PAPER, PACKAGING AND GRAPHICS**

Belgrade, PKS, June, 17th-18th, 2026

**PROGRAM
XXVII MEĐUNARODNOG SIMPOZIJUMA IZ OBLASTI CELULOZE,
PAPIRA, AMBALAŽE I GRAFIKE**

Beograd, PKS, 17-18. jun, 2026.



*Faculty of Technology and
Metallurgy
University of Belgrade*

*Tehnološko-metalurški
fakultet
Univerzitet u Beogradu*



*Center for Pulp, Paper,
Packaging and Graphics
in Serbia*

*Centar celulozno-papirne,
ambalažne i grafičke
industrije Srbije*

Official languages: English and Serbian
Službeni jezici: engleski i srpski

WEDNESDAY, June 17th
SREDA, 17.06.2026.
09:00-10:00

Notification of participants and distribution of materials (PKS, Belgrade, Resavska 13-15)
Prijava učesnika i podela materijala (PKS, Beograd, Resavska 13-15)

10:00-10:15

OPENING OF THE XXVII SYMPOSIUM
OTVARANJE XXVII SIMPOZIJUMA

10:15-11:45

PULP, PAPER PRODUCTION AND ADVANCED MATERIALS – PROIZVODNJA CELULOZE, PAPIRA I NAPREDNI MATERIJALI

Chairman – Predsedavaju:

Petar Uskoković, Saša Dobrić, Matea Korica

10:15-10:30
Lecture 1 – Predavanje 1

NEW RAW MATERIALS FOR BLEACHING AND SUPERIOR UTILISATION IN PAPER PRODUCTION

NOVE SIROVINE ZA IZBELJIVANJE I BOLJE ISKORIŠĆENJE U PROIZVODNJI PAPIRA

Grigore Crăciun, Gheorghe Duțuc, Alexandru Botar, Bogdan Botar, Sergiu Crăciun, Cornelia Duțuc

SC L&G Consulting SRL, Dej, Romania

10:30-10:45
Lecture 2 – Predavanje 2

CELLULASE ENZYMES IN THE PAPER INDUSTRY: CURRENT APPLICATION AND SUSTAINABLE POTENTIAL

ENZIMI CELULAZE U INDUSTRIJI PAPIRA: TRENUTNA PRIMENA I ODRŽIVE MOGUĆNOSTI

Dorđe Jevtović

University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

10:45-11:00
Lecture 3 – Predavanje 3

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF POLYMERS ON GREEN AND WHITE LIQUOR QUALITY DURING UNBLEACHED SOFTWOOD PULP PRODUCTION
 ISTRAŽIVANJE UTICAJA POLIMERA NA KVALITET ZELENOG I BIJELOG LUGA U PROCESU PROIZVODNJE NEBJELJENE ČETINARSKE CELULOZE

Armina Čamić¹, Edin Poljić², Dorđe Jevtović³, Mirko Stanić², Šefkija Botonjić¹, Nevres Hajdić⁴

¹Univerzitet u Zenici, Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka; BiH, ²Natron-Hayat d.o.o. Maglaj, BiH, ³Univerzitet u Beogradu, Tehnološko metalurški fakultet; Beograd, Srbija, ⁴Univerzitet u Zenici, Politehnički fakultet, BiH

11:00-11:15
Lecture 4 – Predavanje 4 (on-line)

INCREASING THE FUNCTIONALITY OF CORRUGATED CARDBOARD BOXES BY SURFACE LINER TREATING WITH FLAME RETARDANTS
 POVEĆANJE FUNKCIONALNOSTI KUTIJA OD TALASASTOG KARTONA POVRŠINSKIM TRETIRANJEM LAJNERA USPORIVAČIMA GORENJA

Yakov Kazakov¹, Konstantin I. Balyberdin¹, Maxim E. Romanov²

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; ²BKT-Service LLC, Saint Petersburg, Russia

11:15-11:30
Lecture 5 – Predavanje 5

AGGLOMERATION OF CALCIUM CARBONATE PARTICLES IN PAPER COATING MIXTURE

AGLOMERACIJA ČESTICA KALCIJUM-KARBONATA U SMEŠI ZA PREMAZIVANJE PAPIRA

Nika Gregorka, Klemen Možina

University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, Slovenia

11:30-11:45
DISKUSIJA – DISCUSSION
11:45-12:15
PAUZA ZA KAFU – COFFEE BREAK
12:15-13:15

PPWR, CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABLE PACKAGING PPWR, CIRKULARNA EKONOMIJA I ODRŽIVA AMBALAŽA

Chairman – Predsedavaju:

Nenad Milosavljević, Nataša Govedarica, Danijela Ošap

12:15-12:30
Lecture 6 – Predavanje 6 (on-line)

OPTIMIZING PAPER-BASED PACKAGING STRUCTURES UNDER GLOBAL ECO-MODULATED EPR FRAMEWORKS

OPTIMIZACIJA STRUKTURE PAPIRNE AMBALAŽE U OKVIRIMA GLOBALNIH EKO-MODULIRANIH POP (PROŠIRENE ODGOVORNOSTI PROIZVOĐAČA) OKVIRA

Igor Karlovits

Pulp and Paper Institute, Ljubljana, Slovenia

12:30-12:45
Invited lecture 7 – Predavanje 7 po pozivu (on-line)

DESIGN FOR RECYCLING AND PPWR: HARMONISATION OF STANDARDS AND INDUSTRIAL PRACTICE

DIZAJN ZA RECIKLAŽU I PPWR: HARMONIZACIJA STANDARDA I INDUSTRIJSKE PRAKSE

Tanja Radusin

Norner Research AS, Porsgrunn, Norway

12:45-13:00
Lecture 8 – Predavanje 8

CARDBOARD IN ARCHITECTURAL EDUCATION AND DESIGN: FROM EXPERIMENTATION TO SUSTAINABLE PRACTICE

KARTON U ARHITEKTONSKOJ EDUKACIJI I PROJEKTOVANJU: OD EKSPERIMENTA DO ODRŽIVE PRAKSE

Verica Krstić

University of Belgrade, Faculty of Architecture, Belgrade, Serbia

13:00-13:15
DISKUSIJA – DISCUSSION
13:15-14:15
PAUZA ZA RUČAK – LUNCH BREAK

14:15-16:05**PPWR, CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABLE PACKAGING PPWR, CIRKULARNA EKONOMIJA I ODRŽIVA AMBALAŽA****Chairman – Predsedavaju:****Mirjana Kostić, Nataša Govedarica, Armina Čamić****14:15-14:35 Invited lecture 9 – Predavanje po pozivu 9**

LEAD OR BE LED: INNOVATION STRATEGY IN THE AGE OF AI PREDVODITI ILI BITI VOĐEN: STRATEGIJA INOVACIJA U ERI VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Gjoko Muratovski Australian Institute of Advanced Technologies, Melbourne, Australia

14:35-14:50 Lecture 10 – Predavanje 10DATA ACQUISITION AND ANALYSIS SYSTEM FOR HIGH-FREQUENCY MANUFACTURING PROCESSES
SISTEM ZA AKVIZICIJU I ANALIZU PODATAKA IZ PROIZVODNIH PROCESA SA VELIKOM UČESTANOŠĆU ODABIRANJA¹Milan Bebić, ¹Neša Rašić, ²Aleksandra Grujić¹Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade;²School of Electrical and Computer Engineering (VIŠER), Belgrade, Serbia**14:50-15:05 Lecture 11 – Predavanje 11**

APPLICATION OF ADVANCED SOLUTIONS IN CONNECTING OPC SERVERS AND SQL DATABASES – ERGA QCREPORT AND ERGA RECIPE MANAGEMENT

PRIMJENA NAPREDNIH RIJEŠENJA U POVEZIVANJU OPC SERVERA I SQL BAZE PODATAKA – ERGA QCREPORT I ERGA RECIPE MANAGEMENT

Antun Rukavina, Ivan Ratkovčić

ERGA, Osijek, Croatia

15:05-15:20 Lecture 12 – Predavanje 12GRAPHIC MANUFACTURING IN THE AGE OF DIGITALIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE
GRAFIČKA MANUFAKTURA U VREMENU DIGITALIZACIJE I VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Miodrag Ristić, Emilija Ristić, Nenad Orlić

DETO d.o.o., Pančevo, Serbia

15:20-15:35 Lecture 13 – Predavanje 13OPTIMIZATION OF A MODERN PULP AND PAPER MILL USING ADVANCED PROCESS CONTROL (APC) METHODS AND VIRTUAL/SMART SENSORS
OPTIMIZACIJA MODERNE FABRIKE CELULOZE I PAPIRA PRIMENOM METODA NAPREDNOG UPRAVLJANJA PROCESOM (APC) I VIRTUELNIH/SMART SENZORA

Dušan Otašević

Honeywell d.o.o., Belgrade, Serbia

15:35-15:50 Lecture 14 – Predavanje 14APPLICATION OF SMART PROCESS MEASUREMENTS IN THE PAPER INDUSTRY
PRIMENA „PAMETNIH“ PROCESNIH MERENJA U PAPIRNOJ INDUSTRIJI

Dejan Otašević

O2 Process Solutions d.o.o., Belgrade, Serbia

15:50-16:05**DISKUSIJA – DISCUSSION****16:05-17:20****ESG, SUSTAINABILITY, HUMAN RESOURCES AND INDUSTRIAL CASE STUDIES ESG, ODRŽIVOST, LJUDSKI RESURSI I INDUSTRIJSKE STUDIJE SLUČAJA****Chairman - Predsedavaju:****Milan Bebić, Mirjana Stamenić, Nikola Marinković****16:05-16:20 Lecture 15 – Predavanje 15**

INTEGRATION OF ESG INDICATORS AND FINANCIAL PERFORMANCE IN THE DATA CENTER INDUSTRY: A CASE STUDY OF DCT KRAGUJEVAC

INTEGRACIJA ESG POKAZATELJA I FINANSIJSKIH PERFORMANSI U INDUSTRIJI DATA CENTARA: EMPIRIJSKA STUDIJA SLUČAJA DCT KRAGUJEVAC
Danilo Savić¹, Kosana Vićentijević², Veljko Davidović³, Biljana Lazarević³¹Data Cloud Technology d.o.o., Kragujevac; ²Academy of Applied Studies Western Serbia; ³Casa Forte, Belgrade, Serbia**16:20-16:35 Lecture 16 – Predavanje 16**SYNERGY BETWEEN PAPER PRODUCTION AND WASTEWATER TREATMENT – A PATH TOWARDS MORE EFFICIENT BIOLOGICAL TREATMENT
SINERGIJA PROIZVODNJE PAPIRA I PRERADE OTPADNIH VODA – PUT KA EFIKASNIJEM BIOLOŠKOM TRETMANU

Marko Anđelković

Smurfit Westrock Beograd d.o.o., Belgrade, Serbia

16:35-16:50 Lecture 17 – Predavanje 17

FINANCIAL WELLNESS STRATEGY AS A KEY TO RETAINING ENGINEERING TALENT IN THE CPAG INDUSTRY

STRATEGIJA FINANCIJSKOG BLAGOSTANJA KAO KLJUČ ZA ZADRŽAVANJE INŽENJERSKIH TALENATA U CPAG INDUSTRIJI

Željka Šeler

Aplanium, Stari Brod, Croatia

16:50-17:05 Lecture 18 – Predavanje 18

EFFECT OF ESSENTIAL OIL ON SURVIVAL OF SALMONELLA SPP. IN SJENICA SHEEP HAM IN MODIFIED ATMOSPHERE

EFEKAT ESENCIJALNOG ULJA NA RAST SALMONELLA SPP. U SJENIČKOJ OVČIJOJ STELJI PAKOVANOJ U MODIFIKOVANOJ ATMOSFERI

Tanja Žugić Petrović¹, Vladimir Tomović²¹Bio-Food Viking, Sokobanja; ²Faculty of Technology, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia**17:05-17:20****DISKUSIJA – DISCUSSION****20:00-****CEREMONIAL DINNER – SVEČANA VEČERA;**

Thursday, June 18th
Četvrtak, 18. jun 2026.

09:30-11:15

ENERGY EFFICIENCY AND DECARBONIZATION
ENERGETSKA EFIKASNOST I DEKARBONIZACIJA

Chairman - Predsedavaju:

Gjoko Muratovski, Armina Čamić, Đorđe Janačković

09:30-09:45 Lecture 19 – Predavanje 19

RESULTS OF THE RECONSTRUCTION OF THE FIRST-STAGE ECONOMIZER OF THE BOILER SYSTEM AT THE UMKA CARDBOARD MILL
 REZULTATI REKONSTRUKCIJE EKONOMAJZERA PRVOG STEPENA KOTLOVSKOG SISTEMA U FABRICI KARTONA UMKA

Milan Mitić, Pavle Milošević

Fabrika kartona Umka, Umka, Serbia

09:45-10:00 Lecture 20 – Predavanje 20

INFLUENCE OF DRYER FABRIC CONTAMINATION ON DRYING PERFORMANCE: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND PRACTICAL CLEANING SOLUTIONS

UTJECAJ KONTAMINACIJE SUŠNOG SITA NA EFIKASNOST SUŠENJA PAPIRA: EKSPERIMENTALNA ANALIZA I PRAKTIČNA RJEŠENJA ČIŠĆENJA

Nenad Milosavljević¹, Claus Roberts²

¹Sunnea Oy, Consulting & Engineering, Air Systems, Drying & Runnability of Paper, Board and Tissue Machines, Jyskä, Finland; ²Projet B.V., Meerssen, The Netherlands

10:00-10:15 Lecture 21 – Predavanje 21

RECOMMENDATIONS FOR ENERGY-EFFICIENT DESIGN OF PAPER MACHINE ROOM VENTILATION SYSTEM

PREPORUKE ZA PROJEKTOVANJE ENERGETSKI EFIKASNOG SISTEMA VENTILACIJE MAŠINSKE HALE U PAPIRNOJ INDUSTRIJI

Nikola Tanasić¹, Mirjana Stamenić², Goran Jankeš²

¹Academy of Applied Studies Polytechnic, Belgrade;

²University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia

10:15-10:30 Lecture 22 – Predavanje 22

MANDATORY ENERGY AUDITS FOR ENTITIES SUBJECT TO THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM IN THE REPUBLIC OF SERBIA: ROLE AND COMPETENCIES OF LICENSED ENERGY ADVISORS
 OBAVEZNI ENERGETSKI PREGLEDI KOD OBVEZNIKA SISTEMA ENERGETSKOG MENADŽMENTA U REPUBLICI SRBIJI: ULOGA I KOMPETENCIJE LICENCIIRANIH ENERGETSKIH SAVETNIKA

Mirjana Stamenić¹, Nikola Tanasić²

¹University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering;

²Academy of Applied Studies Polytechnic Belgrade, Serbia

10:30-10:45 Lecture 23 – Predavanje 23

REGULATION OF AIR HUMIDITY IN THE PAPER AND CARDBOARD INDUSTRY

REGULACIJA VLAŽNOSTI VAZDUHA U INDUSTRIJI PAPIRA I KARTONA

Milan Travica

Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

10:45-11:00 Lecture 24 – Predavanje 24

ENERGY-EFFICIENT PAPER PRODUCTION AND CO₂ REDUCTION IN ELECTRIC MOTOR DRIVES IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

ENERGETSKI EFIKASNA PROIZVODNJA PAPIRA I SMANJENJE CO₂ U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA U PAPIRNOJ INDUSTRIJI

Ivan Deletić

INNOMOTICS d.o.o., Belgrade, Serbia

11:00-11:15

DISKUSIJA – DISCUSSION

11:15-11:45

PAUZA ZA KAFU – COFFEE BREAK

11:45-12:30

DIGITAL GRAPHICS, INTELLIGENT PACKAGING AND PRODUCT SECURITY
DIGITALNA GRAFIKA, INTELIGENTNA AMBALAŽA I SIGURNOST PROIZVODA

Chairman - Predsedavaju:

Predrag Živković, Miodrag Ristić, Biljana Lazarević

11:45-12:00 Lecture 25 – Predavanje 25

DESIGNING TOMORROW – THE IMPACT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON PACKAGING DESIGN
 DIZAJN SUTRA – UTICAJ VEŠTAČKE INTELIGENCIJE NA DIZAJN AMBALAŽE

Nikola Marinković

Smurfit Westrock Avala Ada, Belgrade, Serbia

12:00-12:20 Invited lecture 26 – Predavanje po pozivu 26 (on-line)

THE FUTURE OF GRAPHIC TECHNOLOGY: THE IMPACT OF INTELLIGENT PACKAGING AND INFRADESIGN TYPOGRAPHY ON PRODUCT SECURITY

BUDUĆNOST GRAFIČKE TEHNOLOGIJE: UTJECAJ INTELIGENTNE AMBALAŽE I INFRADESIGN TIPOGRAFIJE NA SIGURNOST PROIZVODA

Ivana Žiljak Stanimirović

University of Zagreb Faculty of Graphic Arts; University North, Zagreb, Croatia

12:20-12:30

DISKUSIJA – DISCUSSION

12:30-13:30

PAUZA ZA RUČAK – LUNCH BREAK

13:30-14:30

ROUND TABLE – OKRUGLI STO

Moderators: M. Krgović, P. Uskoković, Đ. Janačković, N. Govedarica, G. Muratovski, N. Milosavljević

TOPICS – TEME:

1. PPWR AND THE FUTURE OF PAPER PACKAGING / PPWR I BUDUĆNOST PAPIRNE AMBALAŽE
2. ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE CPAG INDUSTRY / VEŠTAČKA INTELIGENCIJA U CPAG INDUSTRIJI

- 3. DECARBONIZATION AND ENERGY TRANSITION /
DEKARBONIZACIJA I ENERGETSKA TRANZICIJA
- 4. RETAINING ENGINEERING TALENT /
ZADRŽAVANJE INŽENJERSKIH TALENATA
- 5. COOPERATION BETWEEN INDUSTRY AND
ACADEMIA / SARADNJA INDUSTRIJE I AKADEMSKOG
SEKTORA

14:30-14:45

**CLOSING CEREMONY – ZATVARANJE
SIMPOZIJUMA**

18:45-21:00

**EXCURSION – CRUISE ON THE SHIP SIRENA /
IZLET – KRSTARENJE BRODOM „SIRENA“**

SADRŽAJ – CONTENT

NEW RAW MATERIALS FOR BLEACHING AND ADVANCED UTILISATION IN PAPER PRODUCTION	13
NOVE SIROVINE ZA BELJENJE I UNAPREĐENU PRIMENU U PROIZVODNJI PAPIRA	13
GRIGORE CRĂCIUN ¹ , GHEORGHE DUȚUC ¹ , ALEXANDRU BOTAR ¹ , BOGDAN BOTAR ¹ , SERGIU CRĂCIUN ² , CORNELIA DUȚUC ²	13
¹ Institute of Chemistry Cluj; ² SC L&G Consulting SRL, Dej city, Romania	13
ENZIMI CELULAZE U INDUSTRIJI PAPIRA: TRENUTNA PRIMENA I ODRŽIVE MOGUĆNOSTI	21
CELLULASE ENZYMES IN THE PAPER INDUSTRY: CURRENT APPLICATION AND SUSTAINABLE POTENTIAL	21
ĐORĐE JEVTIČIĆ	21
Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija	21
ISPITIVANJE UTICAJA POLIMERA NA KVALITET ZELENOG I BIJELOG LUGA U PROCESU PROIZVODNJE NEBJELJENE ČETINARSKÉ CELULOZE 27	27
INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POLYMERS ON THE QUALITY OF GREEN AND WHITE LIQUORS IN THE PRODUCTION OF UNBLEACHED SOFTWOOD PULP	27
ARMINA ČAMIĆ ¹ , EDIN POLJIĆ ² , MIRKO STANIĆ ² , ŠEFKIJA BOTONJIĆ ¹ , ĐORĐE JEVTIČIĆ ³ , NEVRES HAJDIĆ ⁴	27
¹ Univerzitet u Zenici, Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka; BiH; ² Natron-Hayat d.o.o. Maglaj; Bosna i Hercegovina; ³ Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet; Srbija; ⁴ Univerzitet u Zenici, Politehnički fakultet; BiH	27
INCREASING THE FUNCTIONALITY OF CORRUGATED CARDBOARD BOXES BY SURFACE LINER TREATING WITH FLAME RETARDANTS	35
UNAPREĐENJE FUNKCIONALNOSTI KUTIJA OD TALASASTOG KARTONA TRETIRANJEM POVRŠINE LAJNERA USPORIVAČIMA GORENJA ...	35
YAKOV V. KAZAKOV ¹ , KONSTANTIN I. BALLYBERDIN ¹ , MAXIM E. ROMANOV ²	35
¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V.Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; ² BKT-Service LLC, Saint Petersburg, Russia	35
AGLOMERATION OF CALCIUM CARBONATE PARTICLES IN PAPER COATING MIXTURE	41
AGLOMERACIJA ČESTICA KALCIJUM-KARBONATA U SMEŠI ZA PREMAZIVANJE PAPIRA	41
NIKA GREGORKA, KLEMEN MOŽINA	41
University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, Slovenia	41
OPTIMIZACIJA STRUKTURE PAPIRNE AMBALAŽE U OKVIRIMA GLOBALNIH EKO MODULIRANIH POP (PROŠIRENE ODGOVORNOSTI PROIZVOĐAČA) OKVIRA	51
OPTIMIZING PAPER-BASED PACKAGING STRUCTURES UNDER GLOBAL ECO-MODULATED EPR (EXTENDED PRODUCER RESPONSIBILITY) FRAMEWORKS	51
IGOR KARLOVITS	51
Pulp and Paper Institute, Ljubljana, Slovenia	51
DIZAJN ZA RECIKLAŽU I PPWR: HARMONIZACIJA STANDARDA I INDUSTRIJSKE PRAKSE	59
DESIGN FOR RECYCLING AND PPWR: HARMONISATION OF STANDARDS AND INDUSTRIAL PRACTICE	59
TANJA RADUSIN	59
Norner Research AS, Porsgrunn, Norway	59
KARTON U ARHITEKTONSKOJ EDUKACIJI I PROJEKTOVANJU: OD EKSPERIMENTA DO ODRŽIVE PRAKSE	61
CARDBOARD IN ARCHITECTURAL EDUCATION AND DESIGN: FROM EXPERIMENTATION TO SUSTAINABLE PRACTICE	61
VERICA KRSTIĆ	61
University of Belgrade – Faculty of Architecture, Belgrade, Serbia	61
LEAD OR BE LED: INNOVATION STRATEGY IN THE AGE OF AI	63
PREDVODITI ILI BITI VOĐEN: STRATEGIJA INOVACIJA U ERI VEŠTAČKE INTELIGENCIJE	63
GJOKO MURATOVSKI	63
Australian Institute of Advanced Technologies, Melbourne, Australia	63
SISTEM ZA AKVIZICIJU I ANALIZU PODATAKA IZ PROIZVODNIH PROCESA SA VELIKOM UČESTANOŠĆU ODABIRANJA	65
SYSTEM FOR HIGH-FREQUENCY DATA ACQUISITION AND ANALYSIS IN PRODUCTION PROCESSES	65
MILAN BEBIĆ ¹ , NEŠA RAŠIĆ ² , ALEKSANDRA GRUJIĆ ²	65
¹ ETF Beograd; ² VIŠER Beograd, Srbija	65
PRIMJENA NAPREDNIH RIJEŠENJA U POVEZIVANJU OPC SERVERA I SQL BAZE PODATAKA - ERGA QCREPORT I ERGA RECIEPT MANAGEMENT	67
APPLICATION OF ADVANCED SOLUTIONS IN CONNECTING OPC SERVERS AND SQL DATABASE - ERGA QCREPORT AND ERGA RECIPE MANAGEMENT	67
ANTUN RUKAVINA, IVAN RATKOVIĆ	67
Erga d.o.o., Bana Jelacica 197, 35210 Vrpolje, Croatia	67
GRAFIČKA MANUFAKTURA U VREMENU DIGITALIZACIJE I VEŠTAČKE INTELIGENCIJE	75
GRAPHIC ARTS MANUFACTURING IN THE ERA OF DIGITALIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE	75
MIODRAG RISTIĆ, EMILIJA RISTIĆ, NENAD ORLIĆ	75
Deto, Pančevo, Srbija	75
OPTIMIZACIJA MODERNE FABRIKE CELULOZE I PAPIRA PRIMENOM METODA NAPREDNOG UPRAVLJANJA PROCESOM - APC („ADVANCED PROCESS CONTROL“) I VIRTUELNIH/SOFT SENZORA	77
OPTIMIZATION OF A MODERN PULP AND PAPER MILL USING ADVANCED PROCESS CONTROL – APC METHODS AND VIRTUAL/SOFT SENSORS	77
DUŠAN OTAŠEVIĆ	77
Honeywell d.o.o., Beograd, Srbija	77

PRIMENA „PAMETNIH“ PROCESNIH MERENJA U PAPIRNOJ INDUSTRIJI	79
APPLICATION OF "SMART" PROCESS MEASUREMENTS IN THE PAPER INDUSTRY	79
DEJAN OTAŠEVIĆ	79
O2 Process Solutions d.o.o., Beograd, Srbija	79
INTEGRACIJA ESG POKAZATELJA I FINANSIJSKIH PERFORMANSI U INDUSTRIJI DATA CENTARA: EMPIRIJSKA STUDIJA SLUČAJA DCT KRAJUJEVAC	81
INTEGRATION OF ESG INDICATORS AND FINANCIAL PERFORMANCE IN THE DATA CENTRE INDUSTRY: AN EMPIRICAL CASE STUDY OF DCT KRAJUJEVAC.....	81
DANILO SAVIĆ ¹ , KOSANA VIĆENTIJEVIĆ ² , VELJKO DAVIDOVIĆ ³ , BILJANA LAZAREVIĆ ³	81
¹ Data Cloud Technology d.o.o., Kragujevac; ² Academy of Applied Studies Western Serbia; ³ Casa Forte, Belgrade, Serbia	81
SINERGIJA PROIZVODNJE PAPIRA I PRERADE OTPADNE VODE I PUT KA EFIKASNIJEM BIOLOŠKOM TRETMANU	97
THE SYNERGY OF PAPER PRODUCTION AND WASTEWATER TREATMENT AND THE PATH TO MORE EFFICIENT BIOLOGICAL TREATMENT	97
MARKO ANĐELKOVIĆ.....	97
Smurfit Westrock d.o.o, Beograd, Srbija	97
STRATEGIJA FINACIJSKOG BLAGOSTANJA KAO KLJUČ ZA ZADRŽAVANJE INŽENJERSKIH TALENATA U CPAG INDUSTRIJI.....	107
FINANCIAL WELLNESS STRATEGY AS A KEY TO RETAINING ENGINEERING TALENT IN THE CPAG INDUSTRY	107
ŽELJKA ŠELER MAG OEC	107
Aplanium vl Željka Šeler, Stari Brod, Hrvatska	107
EFEKAT ESENCIJALNOG ULJA NA RAST SALMONELLA SPP. U SJENIČKOJ OVČIJOJ STELI PAKOVANOJ U MODIFIKOVANOJ ATMOSFERI ...	113
EFFECT OF ESSENTIAL OIL ON SURVIVAL OF SALMONELLA. SPP IN SIENICA SHEEP S HAM IN MODIFIED ATMOSPHERE	113
TANJA ŽUGIĆ PETROVIĆ ¹ , VLADIMIR TOMOVIĆ ²	113
¹ Bio-Food Viking, Sokobanja, Serbia; ² Faculty of Technology, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia	113
REZULTATI REKONSTRUKCIJE EKONOMAJZERA PRVOG STEPENA KOTLOVSKOG SISTEMA U FABRICI KARTONA UMKA	121
RESULTS OF THE RECONSTRUCTION OF THE FIRST-STAGE ECONOMIZER OF THE BOILER SYSTEM AT THE UMKA CARDBOARD MILL	121
MILAN MITIĆ, PAVLE MILOŠEVIĆ	121
Fabrika kartona Umka, Umka, Srbija	121
INFLUENCE OF DRYER FABRIC CONTAMINATION ON DRYING PERFORMANCE: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND PRACTICAL CLEANING SOLUTIONS	127
UTJECAJ KONTAMINACIJE SUŠNOG SITA NA EFIKASNOST SUŠENJA PAPIRA: EKSPERIMENTALNA ANALIZA I PRAKTIČNA RJEŠENJA ČIŠĆENJA	127
NENAD MILOSAVLJEVIĆ ^{1,3} , CLAUS ROBERTS ² , MARIO MILOSAVLJEVIĆ ³	127
¹ Abo Akademi University, Faculty of Science and Engineering, Laboratory of Process and Systems Engineering, Turku, Finland; ² ProJet b.v., President ProJet b.v., Meerssen, The Netherlands; ³ Sunnea Oy, Consulting & Engineering, Air Systems, Drying & Runnability of Paper, Board and Tissue Machines, Jyskä, Finland	127
PREPORUKE ZA PROJEKTOVANJE ENERGETSKI EFIKASNOG SISTEMA VENTILACIJE MAŠINSKE HALE U PAPIRNOJ INDUSTRIJI	139
RECOMMENDATIONS FOR ENERGY-EFFICIENT DESIGN OF PAPER MACHINE ROOM VENTILATION SYSTEM	139
NIKOLA TANASIĆ ¹ , MIRJANA STAMENIĆ ² , GORAN JANKES ²	139
¹ Akademija strukovnih studija Politehnika, Beograd; ² Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija	139
ULOGA I KOMPETENCIJE LICENCIIRANIH ENERGETSKIH SAVETNIKA U SISTEMU ENERGETSKOG MENADŽMENTA REPUBLIKE SRBIJE SA OSVRTOM NA ENERGETSKI PREGLED OBVEZNIKA SISTEMA	149
MANDATORY ENERGY AUDITS FOR ENTITIES SUBJECT TO THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM IN THE REPUBLIC OF SERBIA: ROLE AND COMPETENCIES OF LICENSED ENERGY ADVISORS	149
MIRJANA STAMENIĆ ¹ , NIKOLA TANASIĆ ²	149
¹ University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering; ² Academy of Applied Studies Polytechnic Belgrade, Serbia	149
REGULACIJA VLAŽNOSTI VAZDUHA U INDUSTRIJI PAPIRA I KARTONA I ENERGETSKA EFIKASNOST	157
REGULATION OF AIR HUMIDITY IN THE PAPER AND CARDBOARD INDUSTRY AND ENERGY EFFICIENCY	157
TRAVICA MILAN.....	157
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija	157
ENERGETSKI EFIKASNA PROIZVODNJA PAPIRA I SMANJENJE CO₂ U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA U PAPIRNOJ INDUSTRIJI	165
ENERGY-EFFICIENT PAPER PRODUCTION AND CO₂ REDUCTION IN ELECTRIC MOTOR IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY.....	165
IVAN DELETIĆ	165
INNOMOTICS doo, Beograd, Srbija	165
DIZAJN SUTRA – UTICAJ AI NA DIZAJN AMBALAŽE:	167
DESIGN TOMORROW – AI IN PACKAGING	167
NIKOLA MARINKOVIĆ	167
Smurfit Westrock Avala Ada, Beograd, Srbija	167
BUĐUĆNOST GRAFIČKE TEHNOLOGIJE: UTJECAJ INTELIGENTNE AMBALAŽE I INFRAREDESIGN TIPOGRAFIJE NA SIGURNOST PROIZVODA	169
THE FUTURE OF GRAPHIC TECHNOLOGY: THE IMPACT OF INTELLIGENT PACKAGING AND INFRAREDESIGN TYPOGRAPHY ON PRODUCT SECURITY	169
IVANA ŽILJAK STANIMIROVIĆ ^{1, 2}	169
¹ University of Zagreb Faculty of Graphic Arts, Croatia< ² University North, Croatia	169

NEW RAW MATERIALS FOR BLEACHING AND ADVANCED UTILISATION IN PAPER PRODUCTION

NOVE SIROVINE ZA BELJENJE I UNAPREĐENU PRIMENU U PROIZVODNJI PAPIRA

Grigore Crăciun¹, Gheorghe Duțuc¹, Alexandru Botar¹, Bogdan Botar^{1a}, Sergiu Crăciun^{2b}, Cornelia Duțuc²

¹Institute of Chemistry Cluj; ²SC L&G Consulting SRL, Dej city, Romania

^a(<https://orcid.org/0000-0002-6204-336X>)

^b(<https://orcid.org/0009-0004-3975-9417>)

Abstract

This study investigates the bleaching potential of date palm leaves and TMP Eucalyptus pulp, using polyoxometalate POM catalysts. Several classes of POM catalysts were evaluated in hydrogen peroxide-mediated systems. Analyses confirmed the efficiency of POM catalysts showing superior bleaching performance, compared to the classical bleaching sequences. The method demonstrates high potential for sustainable biomass processing and reusing of waste and creating added value. The advanced use of wastes such as brewing malt for bleaching demonstrates new possibilities for sustainable and environmentally friendly development.

Keywords: Palm leaves, Eucalyptus thermomechanical pulp, brewing malt bleaching, Polyoxometalates, Catalysis, Bleaching, Biomass valorization

Izvod

Ova studija ispituje potencijal beljenja listova datuline palme i TMP pulpe eukaliptusa, uz primenu polioksometalatih POM katalizatora. Nekoliko klasa POM katalizatora ispitano je u sistemima na bazi vodonik-peroksida. Analize su potvrdile efikasnost POM katalizatora, koji su pokazali superiorne performanse beljenja u poređenju sa klasičnim sekvencama beljenja. Metoda pokazuje visok potencijal za održivu preradu biomase, ponovnu upotrebu otpada i stvaranje dodatne vrednosti. Napredna upotreba otpadnih materijala, kao što je pivski slad, za beljenje pokazuje nove mogućnosti za održiv i ekološki prihvatljiv razvoj.

Ključne reči: listovi palme, termomehanička pulpa eukaliptusa, beljenje pivskim sladom, polioksometalati, kataliza, beljenje, valorizacija biomase

1 INTRODUCTION

Date palm leaves, a lignocellulosic waste product in tropical regions, represent a valuable raw material for bio-based industries. However, their natural coloration due to lignin content limits their direct application.

Polyoxometalates are metal-oxygen clusters with strong redox properties, making them suitable candidates for oxidative delignification in green chemistry contexts.

Eucalyptus thermomechanical pulp is also difficult to bleach and requires large amounts of chemicals and harsh reaction conditions.

Intensive research was carried out on the high-value valorization of date palm leaves, eucalyptus thermomechanical pulp, and other cellulosic materials, with the aim of obtaining cellulose suitable for use in the paper and composites industries [1–11].

The specialized literature reports research aimed at developing environmentally friendly methods is known and carried out in order to find environmentally friendly methods for bleaching cellulose from different cellulosic materials and natural fibers [12 - 24].

The disadvantages of these methods consist in the fact that the oxidation reaction of lignin and hemicelluloses is difficult to control, requiring high temperatures, large amounts of chemicals, many treatment steps, conditions at which the cellulose fiber degrades.

An environmentally friendly, efficient process for the extraction and bleaching of cellulose from the above-mentioned raw materials is proposed, which uses peroxo-polyoxometalate catalysts of Mo (VI) and W(VI) for the selective oxidation of lignin, hemicelluloses, polyphenols and other organic compounds. These catalysts are easily

synthesized in aqueous solution, are stable in the range of pH = 3-11, are used in small quantities and are easily regenerated.

The technical problem addressed by this research is the development of a new environmentally friendly technology for the extraction and bleaching of cellulose from waste resulting from the processing industry, for the paper industry and some special composites, using catalysts from the class of peroxo-polyoxometalates of Mo (VI) and W(VI) for the oxidation of lignin, hemicelluloses and other organic compounds present in the system, thus removing the previously mentioned disadvantages.

Usually, in the process of bleaching the cellulose from such waste, treatments with alkalis, hydrogen peroxide, organic solvents, phosphoric acid, acetic acid, NaOCl, or their combinations are used.

Polyoxometalates synthesized for this application are a new class of environmentally friendly and highly efficient catalysts.

2 OBJECTIVES

- To evaluate the bleaching effectiveness of POM catalysts.
- To determine optimal reaction conditions.
- To propose a mechanism for lignin oxidation.
- To obtain new paper products.

3 EXPERIMENTAL SECTION

3.1 Process description

The general process of extracting and bleaching cellulose by treating with peroxo-polyoxometalate catalysts of Mo (VI) and W(VI) was done in two stages:

- In the first stage, the date palm leaves are finely chopped, and Eucalyptus thermomechanical pulp repulped, then suspended in the aqueous solution containing the peroxo-metalate Mo (VI) or W(VI) catalyst, 0.01 - 0.03 g/mL, anionic surfactant 0.01 - 0.2% and hydrogen peroxide 1-5%, the suspension was heated with stirring at 40-60 °C for one hour and atmospheric pressure, the solid part was filtered under vacuum and washed with small portions of water.
- In the second stage, the cellulose obtained in the first stage was suspended in an aqueous 0.1-2.0 N NaOH solution, which contains 2-6% hydrogen peroxide and 0.2-3% sodium silicate, the suspension was heated under stirring for 40 minutes at 45 - 50 °C, the suspension was cooled, the cellulose was filtered under vacuum, washed with water and air-dried.

This process of isolation and bleaching of cellulose from date palm leaves and Eucalyptus thermomechanical pulp introduces the following economic and environmentally friendly advantages:

- the isolation and bleaching of cellulose was carried out in only two stages;
- a bleached cellulose with a brightness between 45-59 % was obtained, after the first stage. The brightness increases up to 75 – 80% ISO after the second bleaching stage.
- cellulose bleaching was carried out without using chlorine compounds, without the release of toxic substances;
- small amounts of catalysts are used which are recovered and reused;

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Bleaching of cellulose from date palm leaves

100 g. sample of dry, fine chopped date palm leaves was suspended in a liter of aqueous solution containing 0.02 g catalyst, 2-6 g hydrogen peroxide and 0.2 g. anionic surfactant, the suspension was heated with stirring at 45 °C for 40 minutes. The suspension was cooled, the cellulose was filtered under vacuum, washed with small portions of water. The filtrate containing the catalyst was kept, regenerated and reused. The resulting cellulose was suspended in a liter of aqueous solution containing 8-14 g NaOH, 2.6 – 4 g sodium silicate and 2.5 - 12 g hydrogen peroxide. The

suspension was heated with stirring at 45-60 °C for one hour, then cooled, the bleached cellulose was filtered under vacuum, washed with water until pH = 6.5 - 7.5 and air dried. The obtained experimental results are presented in table 1 and figure 1.

Table 1 Bleaching of cellulose from date palm leaves, compared to the brightness of unbleached one
Table 1 Bleaching of cellulose from date palm leaves, compared to the brightness of unbleached one

Catalyst	Brightness (%), bleached cellulose from date palm leaves
Unbleached sample	23
First stage catalyst A	51
Second stage catalyst A	62
First stage catalyst B	55
Second stage catalyst B	66
Catalyst C, after extraction stage (mesh)	82
Catalyst C, after extraction stage (chopped)	76



Fig 1 Date palm leaves bleached with various POM catalysts

Fig 1 Date palm leaves bleached with various POM catalysts



Date palm (mesh) after MSG treatment and alkaline extraction



Crushed date palm leaves after MSG treatment and alkaline extraction



Mesh date palm leaves bleached



Crushed date palm leaves bleached

Fig. 2 Mesh date palm leaves and crushed date palm leaves bleached with POM catalyst
Slika 2. Mleveni i usitnjeni listovi urmine palme beljeni POM katalizatorom

4.2 Bleaching of cellulose from Eucalyptus thermomechanical pulp

100 g sample of dry-crushed Eucalyptus thermomechanical pulp was suspended in a liter of aqueous solution containing 0.02 g catalyst, 2-6 g hydrogen peroxide (H_2O_2) and 0.2 g anionic surfactant, the suspension was heated with stirring at 45 °C for 40 minutes. The suspension was cooled, the cellulose was filtered under vacuum, washed with small portions of water. The filtrate containing the catalyst was kept, regenerated and reused.

The resulting cellulose was suspended in a liter of aqueous solution containing 8-14 g NaOH, 2.6 – 4 g sodium silicate and 2.5 - 12 g hydrogen peroxide. The suspension was heated with stirring at 45-60 °C for one hour, then cooled, the bleached cellulose was filtered under vacuum, washed with water until pH = 6.5 - 7.5 and dried in air. The obtained experimental results are presented in table 2 and figure 3.

Table 2 Bleaching of cellulose from Eucalyptus thermomechanical pulp, compared to the brightness of unbleached one.

Tabela 2. Efekat beljenja celuloze iz termomehaničke pulpe eukaliptusa u poređenju sa belinom nebeljenog uzorka

Catalyst	Brightness (%), bleached cellulose from Eucalyptus thermomechanical pulp
Unbleached sample	23.3
A 50 I	41.9
A 50 II	53.5
M 50 I	48.1
M 50 II	57.2



Fig. 3 Eucalyptus thermomechanical pulp bleached with POM catalyst

Slika 3. Uzorak termomehaničke pulpe eukaliptusa posle beljenja POM katalizatorom

4.3 Bleaching of coffee grounds

The possibility of bleaching coffee grounds was analyzed using peroxo-polyoxometalate catalysts, obtaining brightness levels of over 70% ISO. The results are shown in figure 4 and table 3, compared to other results obtained from hemp and flax.

Table 3 Bleaching of cellulose from coffee grounds, compared to the brightness of cellulose from natural fibers bleached under the same conditions.

Tabela 3. Efekat beljenja celuloze iz taloga kafe u poređenju sa belinom celuloze iz prirodnih vlakana beljene pod istim uslovima

Catalyst	Brightness (%), bleached cellulose from:			
	hemp	flax	SCG	CS
$(\text{NH}_4)_8\text{Mo}_{10}\text{O}_{22}(\text{O}_2)_{12}$	84.2	85.3	79.2	73.4
$\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_3(\text{O}_2)_4$	80.2	81.4	75.5	68.8
$\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_3(\text{O}_2)_4$	80.7	80.9	74.1	65.4



Fig. 4 Bleaching of coffee grounds

Slika 4. Beljenje taloga kafe

4.4 Using the bleached coffee grounds to produce paper

Next, was intended to make a better use of this semi-finished product obtained from waste (spent coffee grounds and coffee silverskin) to obtain paper.

Will use the bleached coffee grounds as a filler material to obtain paper in the laboratory.

We present the sheets obtained in figure 2:



Paper sheet with 30% coffee grounds as a filler

Paper sheet with 40% coffee grounds as a filler

Paper with bleached coffee grounds as a filler

Slika 4. Papir sa beljenim talogom kafe kao puniocem

It was observed that the sheet of paper obtained had high roughness, because the coffee grounds were used without refining.

The next objectives are to determine the physical and mechanical characteristics of the papers thus obtained, compared to other paper types and to optimize its characteristics.

4.5 Separating and bleaching cellulose from malt resulting from the brewing process.

The present invention relates to an environmentally friendly process for separating and bleaching cellulose from malt resulting from the brewing process, by selective catalytic oxidation of lignin and hemicelluloses with metal-oxide cluster catalysts (polyoxometalates).

Malt is a by-product resulting from the beer production process, which contains 16 – 23 % cellulose, 24 – 26 % hemicelluloses, 28 – 30 % lignin and 4 – 5 % ash. Malt is a promising material for various applications, it is inexpensive and available throughout the year.

Due to its chemical composition, malt is used in the food industry, energy production, and in various chemical and biological processes. Malt is also, along with other cellulosic materials, a potential source of cellulose for paper production.

The process of separating and bleaching cellulose from malt by selective catalytic oxidation of lignin and hemicelluloses with peroxometalates of Mo(VI) and W(VI) is characterized by the fact that the separation and bleaching of cellulose was done in two stages.

The separation and bleaching in two stages was done as follows:

- in the first stage, the malt was suspended in the aqueous solution containing the peroxo-metalate catalyst Mo(VI) or W(VI), 0.01 - 0.03 g/mL, anionic surfactant 0.01 - 0.2 % and hydrogen peroxide 1-5 %, the suspension was heated under stirring at 80 - 90 °C for one hour, the solid part was filtered under vacuum and washed with small portions of water.
- in the second stage, the cellulose resulting from the first stage was suspended in an aqueous solution of 0.1 – 2.0 N NaOH, containing 2 – 6 % hydrogen peroxide and 0.2 – 3 % sodium silicate, the suspension was heated under stirring for one hour at 70 – 80 °C, the suspension was cooled, filtered under vacuum, washed with water and dried in air.

Experimental stages:

Stage 1: 100 g dry malt was suspended in one liter of aqueous solution containing 0.02 g peroxo - polyoxometalate catalyst of Mo(VI) or W(VI), 2-6 g hydrogen peroxide and 0.2 g anionic surfactant, the suspension

was heated under stirring at 80 – 90 °C for one hour. The suspension was cooled, the cellulose was filtered under vacuum, washed with small portions of water. The filtrate containing the catalyst was kept, regenerated and reused.

Stage 2: the cellulose resulting from the first stage was suspended in one liter of aqueous solution containing 8 – 24 g NaOH, 2.6 – 4 g sodium silicate and 2.5 – 12 g hydrogen peroxide. The suspension was heated under stirring at 70 – 80 °C for one hour, then cooled, filtered under vacuum, washed with water until pH = 6.5 – 7.0 and air-dried was carried out in only two stages. The experimental results obtained are presented in Table 4.

Table 4 Brightness of cellulose obtained from brewing malt compared with cellulose from natural fibers bleached under the same conditions.

Tabela 4. Belina celuloze dobijene iz pivskog slada u poređenju sa belinom celuloze iz prirodnih vlakana beljene pod istim uslovima

Catalyst	Brightness (% ISO) bleached pulp of		
	Malt	Hemp	Flax
$(\text{NH}_4)_8\text{Mo}_{10}\text{O}_{22}(\text{O}_2)_{12}$	77.1	84.2	85.3
$\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_3(\text{O}_2)_4$	72.8	80.2	81.4
$\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_3(\text{O}_2)_4$	71.0	80.7	80.9
$\text{K}_5\text{H}_4\text{PMo}_6\text{V}_6\text{O}_{40}$	59.2	70.1	69.5
$\text{H}_4\text{SiMo}_{12}\text{O}_{40}$	66.1	76.4	78.1



Fig. 6 Cellulose from brewing malt bleached with polyoxometalate catalysts.

Slika 6. Celuloza iz pivskog slada beljena POM katalizatorima.

This process of isolating and bleaching cellulose from malt, as can be seen from its description, introduces the following economic and environmentally friendly advantages:

- the isolation and bleaching of cellulose from malt was carried out in two stages;
- a bleached cellulose with a whiteness degree of over 75% was obtained;
- the bleaching of cellulose was carried out without using chlorine compounds, without releasing harmful substances;
- small quantities of catalysts are used that are fully recovered and reused;
- lignin and hemicelluloses are finally oxidized to CO₂ and water, which justifies the environmentally friendly character of the process proposed by this invention.

CONCLUSIONS

- POM catalysts bleaching of date palm leaves, Eucalyptus thermomechanical pulp, coffee grounds, and brewing malt is a sustainable and effective process.
- POM catalysts outperformed conventional bleaching systems, indicating strong oxidative activity and good catalyst stability.

- The process is promising for eco-friendly biomass valorization.
- Using coffee grounds as a filler, we managed to obtain sheets of paper with high opacity in the laboratory.
- Waste materials such as date palm leaves, coffee grounds, and brewing malt can be effectively used for bleaching and paper production.
- The next objectives of the research are the qualitative analysis of the obtained paper, comparing it with other types of paper and optimizing its quality characteristics.

REFERENCES

- [1] Pope, M. T., Müller, A. (1991). Polyoxometalate Chemistry. Angew. Chem. Int. Ed. Hill, C. L. (1998). Polyoxometalates in Catalysis. Chem. Rev.
- [2] Sharma, R. K., et al. (2018). Sustainable bleaching of lignocellulosic biomass. Green Chem.
- [3] S.I. Mussatto, E.M.S. Machado, S. Martins and J.A. Teixeira, Food and Bioprocess Technology, 2011, 4, 661-672.
- [4] Hejna, Waste Management, 2011, 121, 296-330.
- [5] P.S. Murthy and M.M. Naidu, Resources, Conservation and Recycling, 2012, 66, 45-58.
- [6] R.C. Vega, G.L. Piria, H.A. Vergara-Castarieda and B.D. Oomah, Trend in Food Science and Technology, 2015, 45, 24-38.
- [7] L. Cruz-Lopes, I. Domingos, J. Ferreira and B. Esteves, Agriculture and Food, 2117, 5, 85-92.
- [8] Patent WO 2018,136763 A1.
- [9] L.D. Tolesa, B.S. Gupta and M.J. Lee, ACS Omega 2018, 3, 10806 – 10876.
- [10] B.A. Frost and E.J. Foster, Journal of Renewable Materials, 2019, 7, 187 – 203.
- [11] N. Kanai, H. Takumi, Y. Naoki, O. Toshiyuki, N. Akora, K. Kazuyoshi and K. Izuru, Cellulose, 2020, 27, 5017–5028.
- [12] Y. Leov, P.Y.M. Yew, P.L. Chee, X.J. Loh and D. Kai, RSC Adv., 2021, 11, 2682 – 2692.
- [13] M. Pettinato, E. Drago, R. Campardelli and P. Perago, Chemical Engineering Transaction, 2021, 87, 583–588.
- [14] Wood and Cellulose, ed. D.N.S. Hon and N. Shiraishi, Marcel Dekker, New York and Basel, 1991.
- [15] Pulp Bleaching: Principles and Practice, ed. C. W. Dence and D.W. Reeve, Tappi Press, Atlanta, 1996.
- [16] W. Strunk, Pulp and Paper, 1990, October, 112-116.
- [17] G. Gellertstedt, K. Gastavson and E. L. Linford, Nordic Pulp Pap. Res. J. 1986, 36, 55-64.
- [18] Brolin, J. Geierer and Y. Zhang, Wood Sci. Technol., 1993, 27, 115-129.
- [19] J.A. Weinstock, R. H. Attala, R. S. Reiner, M. A. Moen and K. E. Hammel, New J. Chem. 1996, 20, 269-275.
- [20] D. V. Evtuguin and C. Netto-Pascual, Holzforschung, 1997, 51, 313-318.
- [21] C. Sirghie, **A. Botar**, N. Dinca, G. Craciun and M. Dochia, Patent RO 122728/2007.
- [22] C. Sirghie, **B. Botar**, **A. Botar** and N. Dinca, Patent RO 122817/2007.
- [23] C. Sirghie, **A. Botar**, A.M. Bodescu and M. Dochia, Patent EP 2703553A1/2012.
- [24] C. Sirghie and **A. Botar**, Patent RO 128764/2014.
- [25] C. Sirghie, A.M. Bodescu, **A. Botar**, A. Carvaco-Paulo and F.D. Munteanu, Carbohydrate Polymers, 2013, 98, 490-494.
- [26] S. W. Kook and **A. Botar** Patent Appl., 20140227920
- [27] **Gr. Craciun, A. Botar, Ghe. Dutuc**, Patent „Special papers from annual plant fibers, bleached with P.O.M.”, Registered No. by OSIM București: A/00345 from 13-04-2011
- [28] **Gr. Craciun** 2009, Doctoral thesis, Research on the use of polyoxometallates in the delignification of vegetable fibrous materials
- [29] **Ghe. Dutuc** 2011, Doctoral thesis, Researches regarding obtaining and characterization of high yield pulps
- [30] Peter Anca, Nicula Camelia, Mihaly Cozmuta Anca, Mihaly Cozmuta Leonard, Danciu Virginia, Baia Gheorghe Lucian, Kovacs Gabor, Ciric Alexandru, Begea Mihaela, Craciun Liliana, **Craciun Grigore, Dutuc Gheorghe**, Falup Anca, Ziemkowska Wanda, Jastrzebska Agnieszka, Kurtycz Patrycja, Karwowska Ewa, Miaskiewicz Peska Ewa, Zaleska Radziwill Monica, Olszyna Andrej, Kunicki Antoni, Sitarz Karolina, Roslon Magdalena – „**Processes for obtaining smart food packages**”, European patent nr. 80298/28.04.2016 Munich Germany, ROA 201500256. **With this patent we obtained 4 gold medals and 2 silver medals** to the internal and international fairs.

Corresponding Author:

dr. eng. Gheorghe Duțuc

SC L&G Consulting SRL, Dej, Romania

Email: dutucgheorghe@yahoo.com

Tel: +40 744 646 838

ENZIMI CELULAZE U INDUSTRIJI PAPIRA: TRENUTNA PRIMENA I ODRŽIVE MOGUĆNOSTI

CELLULASE ENZYMES IN THE PAPER INDUSTRY: CURRENT APPLICATION AND SUSTAINABLE POTENTIAL

Đorđe Jevtović

Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Srbija

Abstract

This paper provides an overview of the use of cellulase enzymes and their application on paper machines as sustainable and “green” technologies, in line with the European Union’s zero-emissions policy. In addition to current applications of enzymes as additives for improving the mechanical properties of paper in the dry state, the paper also highlights other innovative possibilities for the use of cellulases, depending on their activity, as well as the location and method of dosing.

Keywords: enzymes, cellulase, paper machine, sustainability

Izvod

U ovom radu napravljen je pregled korišćenja enzima celulaze i primena na papir mašinama kao održive i “zelene” tehnologije u skladu sa nula emisija politikom evropske unije. Pored trenutne primene i korišćenja enzima, kao aditiva za postizanje većih mehaničkih osobina papira u suvom stanju, rad ukazuje i na druge, inovativne mogućnosti primene celulaza u zavisnosti od njihove aktivnosti, mesta i načina doziranja na papir mašini.

Ključne reči: enzimi, celulaze, papir mašina, održivost

1 UVOD

Intenzivnija upotreba enzima u industriji prerade celuloze i proizvodnje papira započela je tokom druge polovine osamdesetih godina prošlog veka i od tada se kontinuirano razvija (1). U savremenim procesima proizvodnje papira enzimi su postali sastavni deo standardnih tehnoloških rešenja: hemicelulaze i ksilanaze se koriste u procesima izbeljivanja celuloze, lipaze u kontroli smolastih nečistoća (*pitch control*), dok se amilaze primenjuju za podešavanje reoloških osobina skrobova namenjenih size/film presi i pigmentnim premazima. Detaljan pregled funkcionalnosti i potencijala ovih enzimskih tretmana u papirnoj industriji dao je Bajpai (2).

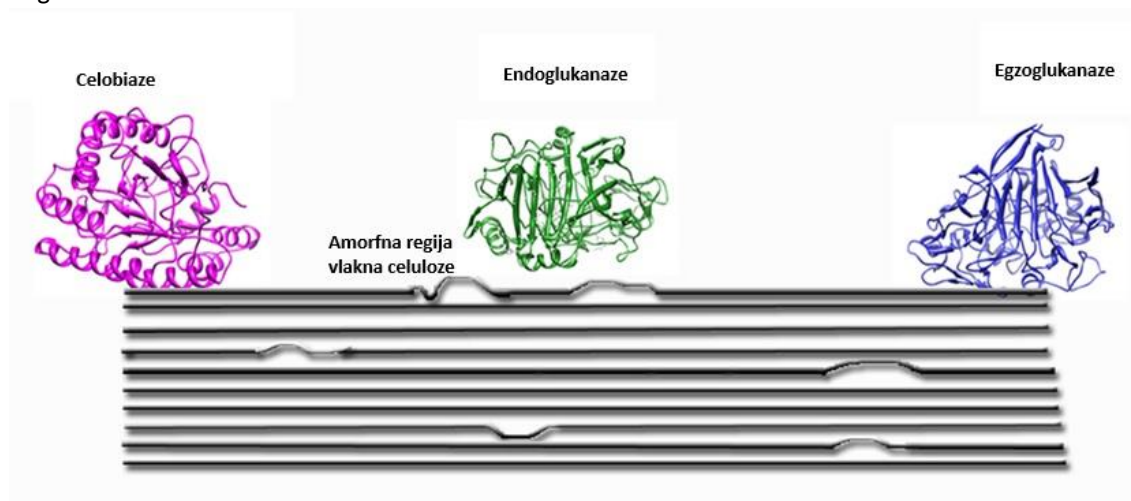
Pored klasične primene u vlaknastoj fazi, u literaturi su opisani i alternativni pristupi koji podrazumevaju upotrebu enzima, pre svega lipaza i esteraza, direktno u procesnim ili otpadnim vodama sistema termomehaničke celuloze (TMP) i reciklirane celuloze. Ova istraživanja su pokazala značajan potencijal enzima u smanjenju koloidnog i smolastog opterećenja procesne vode (3,4,5). Dalja istraživanja bila su usmerena ka produženju efekta enzima putem njihove imobilizacije na površinama vlakana, čime se omogućava produžena katalitička aktivnost i smanjena potrošnja enzima (6). Takođe je utvrđeno da katjonski polimeri mogu imati sinergistički efekat, jer unapređuju enzimski izazvanu hidrolizu celuloze u recikliranim vlaknima (7).

Ukoliko se enzimi doziraju direktno u vlaknastu suspenziju, dolazi do njihove vrlo brze adsorpcije na površinu vlakana, pri čemu se gotovo u potpunosti gubi mogućnost njihove ponovne katalitičke upotrebe (8). Iz tog razloga, u industrijskim uslovima neophodno je kontinuirano ili ponovljeno doziranje enzima kako bi se obezbedio stabilan nivo njihove aktivnosti tokom procesa.

Mehanizam delovanja celulaza zasniva se na hidrolizi 1,4-β-glikozidnih veza u lancima celuloze, pri čemu nastaju rastvorljivi proizvodi u obliku redukujućih šećera, uključujući mono-, di- i oligosaharide. U zavisnosti od izvora i tipa enzima, celulaze se mogu pojaviti kao složeni multienzimski sistemi ili kao pojedinačne enzimске komponente, koje ciljano reaguju sa različitim delovima celuloznog makromolekula (Slika 1).

Celulaze su multienzimski kompleks koji se sastoji od tri različita enzima i to(9):

1. Endoglukanaze.
2. Egzoglukanaze.
3. B-glukozidaze ili celobiazze.



Slika 1. Različite aktivnosti celulaza koje reaguju sa različitim delovima celuloznog vlakna (10)
Figure 1. Different cellulase activities acting on different parts of the cellulose fiber (10).

U dosadašnjim industrijskim i laboratorijskim istraživanjima, primena celulaznih enzima bila je dominantno usmerena ka postizanju pozitivnih efekata na mehanička svojstva papira u suvom stanju uz smanjenje energije mlinova. Tu posebno značajnu ulogu ima aktivnost endoglukanaza, koje omogućavaju delimičnu razgradnju amorfne i kristalne regije celuloze, čime se smanjuje potreba za intenzivnom mehaničkom rafinacijom (11). Pokazano je da komercijalne celulaze dobijene iz *Trichoderma reesei* plesni, sa izraženom endoglukanaznom komponentom, značajno smanjuju potrošnju energije tokom mlevenja izbeljene kraft pulpe. Ove nalaze potvrđuju i drugi akademski rezultati koji su analizirali uticaj različitih enzimskih aktivnosti na sitne čestice vlakna (*fines*) i njihovu korelaciju sa odvodnjavanjem, zateznom čvrstoćom i površinskom glatkoćom papira.

Reakcijom celulaza sa celuloznim vlaknima dobijaju se fibrile na površini vlakna koje doprinose mehaničkim osobinama papira tako što formiraju veći broj vodoničnih veza između vlakana celuloze nakon sušenja papira. Ovo prirodno mlevenje celuloznog vlakna oponaša rad mlinova u procesu, stoga se korišćenjem celulaza štedi energija mlevenja na održiv način.

Analiza velikog broja studija sprovedenih tokom desetogodišnjeg perioda ukazuje da su efekti celulaza i hemicelulaza u beljenoj celulozi najizraženiji u kiselom pH području, pri temperaturama iznad 50 °C i vremenu kontakta sa vlaknom od približno 30 minuta.

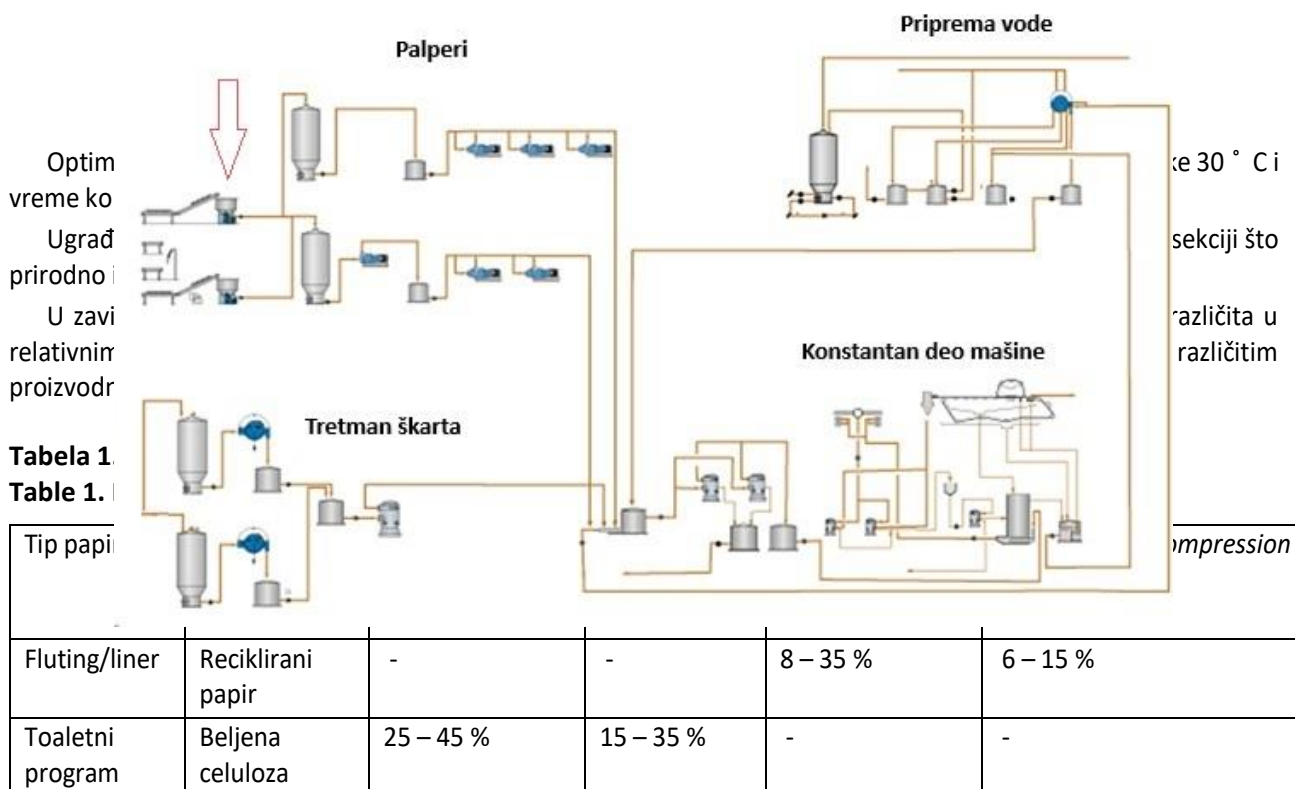
Alternativni pravac istraživanja predstavili su autori (12), koji su ispitivali upotrebu celulaznih enzima za konverziju *fines* čestica iz otpada recikliranog papira u fermentabilne šećere, namenjene proizvodnji biogoriva i bioplastike. Tokom tih ispitivanja uočeno je da prisustvo kalcijum-karbonata može negativno uticati na efikasnost enzimske hidrolize, delujući kao inhibitor reakcije. Drugi poznati inhibitori za pomenutu katalizu su jaka oksidaciona sredstva poput natrijum-hipoplorita koja dovode do deaktivacije celulaza.

2. PREGLED PRIMENE CELULAZA

2.1 Pобољшanje mehaničkih osobina papira u suvom stanju

Ujedno i najšira primena celulaza u industriji papira i celuloze. Uglavnom se koristi u proizvodnjama koje koriste beljenu nekorišćenu (*virgin*) celulozu. Razlog za to je nizak udeo lignina i drugih primesa koje mogu inhibirati reakciju hidrolize. U zavisnosti od birane aktivnosti i ostalih parametara procesa, celulaze se mogu efikasno koristiti i kod recikliranih vlakana. Primer za to je intenzivno korišćenje celulaza u industriji recikliranog papira u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) čiji se kvalitet reciklirane sirovine bitno razlikuje od evropskog kvaliteta usled nižeg broja recikliranih ciklusa.

Zajedničko za ovu primenu jeste kontinualni dodatak celulaza u palper dugog i/ili kratkog vlakna u zavisnosti od aktivnosti koja se koristi (Slika 2). Efikasnost tretmana zavisi od PH vrednosti, retencionog vremena koje enzim provede sa vlaknom, temperaturom procesa kao i dodatkom drugih aditiva.



2.2 Održivo smanjenje energije mlevenja

Prethodno opisan proces kreiranja fibrila na vlaknima celuloze korišćenjem celulaza obezbeđuje smanjenje energije mehaničkog mlevenja u procesu. Ove uštede energije smanjuju emisije ugljen-dioksida usled smanjenja utroška električne energije koje se u Republici Srbiji većinski dobija sagorevanjem uglja u termoelektranama.

U tabeli 2 je pokazan uticaj dodatka celulaza u palper i smanjenje energije mlevenja u različitim proizvodnjama papira uz povećanje fibrilacije vlakna.

Tabela 2. Održivo smanjenje energije mlevenja izraženo u relativnim vrednostima

Tip papira	Korišćena sirovina	Smanjenje energije mlevenja, kW/h	Fibrilacija, %
Toaletni program	Beljena celuloza	30 %	-
Karton	Beljena celuloza i drvenjača	13 %	30 %
Kraft proizvodnja	Nebeljena celuloza	20 %	-

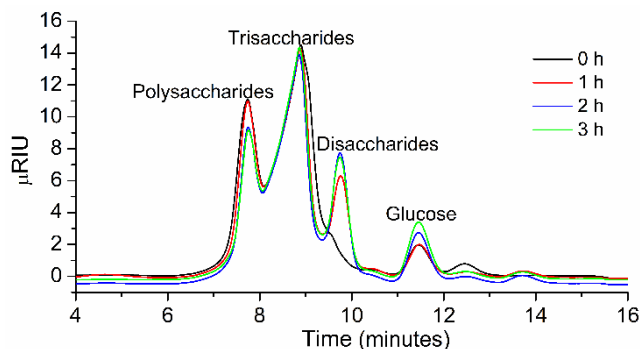
2.3 Sredstvo za poboljšanje odvodnjavanja i smanjenje sitnih vlakana u sitovoj vodi

Korišćenje celulaza prema prethodno opisanim poglavljima 2.1 i 2.2 predstavlja tradicionalni način primene ovih enzima u industriji papira. Primena enzima na papir mašini i dalje je nedovoljno istražena oblast što je pokazala i grupa autora sa Tehnološko-metalurškog fakulteta u saradnji sa firmom *Solenis Technologies Germany GmbH* koja je pratila uticaj enzima na *fines* i primenu u sitovoj vodi recikliranog papirnog programa(13).

Sitne čestice vlakna ili *fines* predstavljaju celulozni materijal po definiciji ispod 76 µm sa velikom specifičnom površinom koja je veća od vlakna celuloze za 5 do 10 puta. Sa ovakvim karakteristikama, *fines* se ponašaju kao punila koja vezuju veliku količinu vode i nose negativno naelektrisanje što ima za posledicu nepovoljan uticaj na proces proizvodnje. Pored usporenog odvodnjavanja na situ i nižih vrednosti retencije, sa velikim udelom *fines* u sitovoj

vodi može doći i do prašenja papira/kartona unitar sušne sekcije, aglomeracije i kreiranja depozita u kombinaciji sa drugim nečistoćama ili probleme u konfekcijama koje prerađuju papir.

Stoga je kontrola *fines* od izuzetne važnosti za proces proizvodnje. Dodatkom celulaza u konstantni deo mašine, *fines* se mogu efikasno napasti i hidrolizovati do di- i oligo- saharida uz propratne pozitivne efekte za proces. Na slici 3 (HPLC hromatografija) se vidi promena koncentracije šećera u zavisnosti od vremena dodatkom celulaza u sitovu vodu recikliranog proizvodnog programa koja je prethodno filtrirana sitom od 76 μm .



Slika 3. Promena koncentracije šećera u sitovoj vodi dodatkom celulaza (13)

Figure 3. Change in sugar concentration in white water upon the addition of cellulases (13).

Pored promene koncentracije šećera (di- i oligosaharidi), prijavljena je i niža zamućenost sitove vode od približno 10 %, kao i smanjenje naboja od preko 25 % nakon 3 sata reakcije u zatvorenom sistemu.

2.4 Imobilizacija celulaza

Kao biokatalizatori, celulaze nakon završetka reakcije hidrolize celuloznih vlakana ostaju strukturno i funkcionalno neizmenjene. Iz tog razloga, njihovo kontinuirano doziranje u industriji celuloze i papira, uprkos brojnim pozitivnim efektima, ne predstavlja optimalan pristup, budući da se katalitički potencijal enzima koristi samo delimično i ne u potpunosti.

Logičan pravac daljih istraživanja usmeren je ka imobilizaciji celulaza, odnosno njihovom fiksiranju na definisanu površinu (nosač) putem jakih kovalentnih veza, čime se obezbeđuje efikasnije iskorišćenje enzima u ulozi biokatalizatora. Ovakav pristup ima potencijal da značajno smanji upotrebu hemikalija na papir mašini, uz istovremeno unapređenje održivosti procesa sa ekološkog aspekta.

Izazov pomenute tehnologije jeste kreiranje adekvatnog nosača kompatibilnog za kovalentno vezivanje enzima na svoju površinu. Grupa autora sa Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu radi na dizajnu nosača koristeći 3D štampu kao alat za modelovanje i izradu (Slika 4). Pomenuti nosač se može u velikoj meri reciklirati nakon korišćenja i ponovo koristiti za izradu nosača što doprinosi ukupnoj održivosti koncepta.



Slika 4. Nosač za imobilizaciju enzima dobijen 3D štampom

Figure 4. 3D-printed carrier for enzyme immobilization.

Primena imobilisanih celulaza moguća je u procesnoj vodi papir mašine, pri čemu bi se nosači unosili u sistem po principu „kesica za čaj“. Očekivani efekat ovakvog pristupa ogleda se u dugotrajnom prečišćavanju procesnih voda kroz smanjenje udela fines materijala, što bi dalje rezultovalo unapređenjem odvodnjavanja i retencije, smanjenjem potrebe za dodatnim polimernim aditivima, kao i ukupnim povećanjem produktivnosti proizvodnog procesa.

3. ODRŽIVOST

U uvodnom poglavlju je pomenuto da se enzimi celulaza dobijaju iz plesni. U poređenju sa polimernim aditivima koji se uglavnom dobijaju iz nafte, uticaj na životnu sredinu korišćenjem enzima u proizvodnji je zanemarljiv u poređenju sa sintetskim polimerima, stoga se enzimi i nazivaju „zelenom“ hemijom.

Potencijal imobilizacije enzima i korišćenje na papir mašini se ogleda i u smanjenju emisija ugljendioksida. Uzmimo za primer papir mašina kapaciteta 20 t/h koja koristi recikliranu sirovinu. Ukoliko se usvoji standardna specifična potrošnja sveže vode od približno 4,5 t vode po toni proizvedenog papira, tada se pri kapacitetu od 20 t/h u sistem uvodi oko 90 m³/h „nove“ vode.

U istim uslovima rada, mašina ove klase tipično troši 200–500 g/t retenciono/odvodnjavajućeg polimera i 200–300 g/t celulaznog enzima. Preračunato na dnevni učinak (≈480 t/dan), to odgovara približnoj potrošnji od 96–240 kg/dan polimera i 96–144 kg/dan enzima.

Smanjenjem specifične potrošnje energije u fazi mehaničkog mlevenja (poglavlje 2.1) postižu se značajne uštede emisija CO₂; na osnovu pretpostavljene uštede od 100 kWh/t papira i ugljeničnog intenziteta električne energije u Srbiji od približno 600–700 g CO₂/kWh, procenjena dnevna redukcija emisija iznosi između 28,8 i 33,6 t CO₂.

Primena nosača sa imobilisanom celulazom, u skladu sa konceptom u podnaslovu 2.4 razmatranim u radu, potencijalno bi mogla da zameni kontinuiranu dozu slobodnog enzima i istovremeno doprinese smanjenju utroška retenciono/odvodnjavajućih polimera, usled redukcije koloidnog naelektrisanja i zamućenja (turbiditeta) u procesnoj vodi. Time bi se ostvarile održive uštede kroz smanjenje: (i) upotrebe sintetičkih polimera, (ii) transporta i (iii) internog rukovanja i skladištenja hemikalija.

Efekti smanjenja potrošnje aditiva mogu se izraziti kroz ekvivalentne emisije CO₂. U delu koji se odnosi na transport, metodologije za obračun emisija često koriste faktore izražene u g CO₂ po tkm; na primer, za drumski transport se kao prosečna vrednost navodi oko 62 g CO₂/tkm, pri definisanim pretpostavkama o opterećenju i praznom hodu. Shodno tome, transport 1 t materijala na rastojanju od 800 km odgovara emisiji reda ~50 kg CO₂. Svako smanjenje doziranja polimera, samim tim, može doprineti godišnjim uštedama emisija koje su merljive na nivou više tona CO₂, zavisno od realnog smanjenja potrošnje i logističkih parametara.

Opisani korak zamene slobodnog enzima imobilisanim sistemom uz istovremeno smanjenje polimernih aditiva u skladu sa savremenim industrijskim trendovima dekarbonizacije i cirkularne ekonomije, jer ciljaju smanjenje potrošnje hemikalija, logističkih aktivnosti i emisija gasova sa efektom staklene bašte.

4. ZAKLJUČAK

Celulazni enzimi predstavljaju dobro etabliranu tehnologiju u industriji proizvodnje papira, sa primarnom primenom u unapređenju mehaničkih svojstava papira u suvom stanju, naročito kod beljene celuloze, kao i u smanjenju specifične potrošnje energije tokom mehaničkog mlevenja vlakana. Međutim, identifikacijom alternativnih tačaka doziranja i kombinovanjem različitih enzimskih aktivnosti otvara se mogućnost ostvarivanja dodatnih funkcionalnih efekata, uključujući smanjenje udela fines materijala u sitovoj vodi.

Dalji razvoj ove tehnologije treba usmeriti ka optimizaciji aplikacije zasnovane na principima biokatalize, kao osnovnog mehanizma delovanja enzima, uz istovremenu primenu adekvatnih nosača za njihovu imobilizaciju. Na taj način omogućava se stabilnija i dugotrajnija primena enzima, čime se otvara potencijal za njihovu upotrebu u kontinuiranom prečišćavanju procesnih voda u industriji papira. Ovakav pristup doprinosi unapređenju održivosti proizvodnog procesa kroz smanjenje upotrebe hemikalija, energetske potrebe i ukupnog opterećenja životne sredine.

Acknowledgements:

This work was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (contact number 451-03-34/2026-03/200135)

References

- [1] Bajpai P (1999), Application of enzymes in the pulp and paper industry. *Biotechnol. Prog.* 15:147-157. <https://doi.org/10.1021/bp990013k>
- [2] Bajpai P, (2011) Enzymatic Modification of Starch for Surface Sizing. In: Bajpai P. *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*, 1st edn. Springer, New York. 317–326. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7853-8>
- [3] Zhang X, Stebbing DW, Saddler JN, Beatson RP, Kruus K (2000) Enzyme treatments of the dissolved and colloidal substances present in mill white water and the effects on the resulting paper properties. *J. of wood chem. and technol.* 20:321-335. <http://dx.doi.org/10.1080/02773810009349639>
- [4] Xiao Z, Stebbing DW, Saddler JN, Beatson RP, Kruus K (2000) Enzyme Treatments of the Dissolved and Colloidal Substances Present in Mill White-water and the Effects on the Resulting Paper Properties. *J. of Wood Chem. and Technol.* 20:321-335, <https://doi.org/10.1080/02773810009349639>
- [5] Dube E., Shareck F, Hurtubise Y, Beaugregard M., Daneault, C (2008) Enzyme-based approaches for pitch control in thermomechanical pulping of softwood and pitch removal in process water. *J. of Chem. Techn. & Biotech.* 83:1261-1266 <https://doi.org/10.1002/jctb.1939>
- [6] Zhang A, Wang G, Gong G, Shen J (2017) Immobilization of white rot fungi to carbohydrate-rich corn cob as a basis for tertiary treatment of secondarily treated pulp and paper mill wastewater. *Ind. Crops and Prod.* 109:538-541. <https://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.006>
- [7] Yu H, Xu Y, Ni Y, Wu Q, Liu S, Li L, Yu S, Ji Z (2018) Enhanced enzymatic hydrolysis of cellulose from wastepaper fibers by cationic polymers addition. *Carbohydr. Polym.* 200: 248-254 <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.079>
- [8] Fischer K, Messner K (1992) Adsorption of lipase on pulp fibers during biological pitch control in paper industry. *Enzym. Microb. Technol.* 14:470-473
- [9] Zorica D Knažević-Jugović, Enzimsko Inženjerstvo, Tehnološko-metalurški fakultet, 2008 (Beograd : Razvojno-istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF) | 491 str.
- [10] Solenis Austria GmbH, interna dokumentacija
- [11] Nagl M, Haske-Cornelius O, Skopek L, Bausch F, Pellis A, Bauer W, Guebitz GM (2022) Mechanistic investigation of the effect of endoglucanases related to pulp refining. *Cellul.* 29:2579-2598 <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04386-5>
- [12] Min BC, Bhayani BV, Jampana VS, Ramarao BV (2015) Enhancement of the enzymatic hydrolysis of fines from recycled paper mill waste rejects. *Bioresour. and bioprocess.* 2:1-10 <https://doi.org/10.1186/s40643-015-0068-2>
- [13] Jevtović, Đorđe, Predrag Zivković, Ana Milivojević, Dejan Bezbradica, and Luc Van Der Auwera. "Reduction of Fines in Recycled Paper White Water via Cellulase Enzymes." *BioResources* 19, no. 1 (2024). <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.635-655>

Corresponding author:

Đorđe Jevtović

Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Karnegijeva 4, Belgrade, Serbia

20194009@estudent.tmf.bg.ac.rs

ISPITIVANJE UTICAJA POLIMERA NA KVALITET ZELENOG I BIJELOG LUGA U PROCESU PROIZVODNJE NEBJELJENE ČETINARSKJE CELULOZE

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POLYMERS ON THE QUALITY OF GREEN AND WHITE LIQUORS IN THE PRODUCTION OF UNBLEACHED SOFTWOOD PULP

Armina Čamić¹, Edin Poljić², Mirko Stanić², Šefkija Bottonjić¹, Đorđe Jevtović³, Nevres Hajdić⁴

¹Univerzitet u Zenici, Fakultet inženjerstva i prirodnih nauka; BiH; ² Natron-Hayat d.o.o. Maglaj; Bosna i Hercegovina;

³Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet; Srbija; ⁴Univerzitet u Zenici, Politehnički fakultet; BiH

Abstract

In the process of alkali regeneration, as one of the key stages in the kraft pulp production process, white and green liquors are generated containing suspended particles. These particles can negatively affect process efficiency, equipment operation, and the quality of the produced pulp. This study investigates the influence of polymers on the sedimentation of suspended particles in white and green liquors within the production process of unbleached softwood pulp. Different types of polymer flocculants were analyzed in order to determine their effectiveness in improving sedimentation rate, reducing turbidity, and enhancing liquor clarification. Proper selection and dosing of polymers lead to a more stable process, reduced operational problems, and improved efficiency of the chemical recovery system. Research has confirmed that the application of appropriate polymers can significantly reduce the amount of suspended particles, which directly contributes to improving the quality of process streams and the stability of the production system. The obtained results provide a useful basis for a better understanding of the mechanisms of polymer action in alkaline process environments characteristic of the pulp and paper industry. Polymers with high molecular weights and low to medium charges produced the best results during laboratory testing at Natron-Hayat.

Key words: alkali regeneration, kraft process, white liquor, green liquor, polymers, flocculation, sedimentation, pulp production

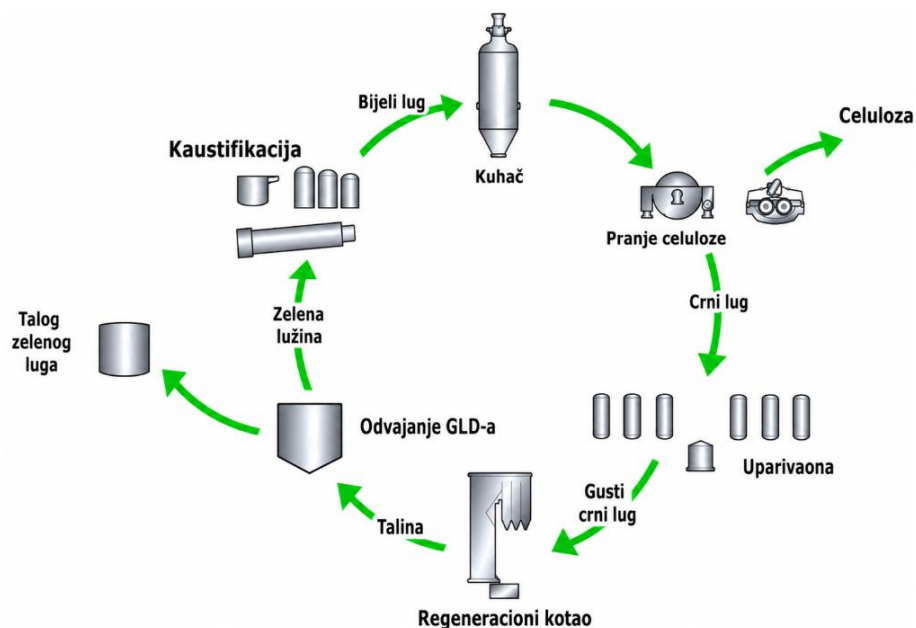
Izvod

U procesu regeneracije alkalija, kao jednoj od ključnih faza u proizvodnji celuloze po sulfatnom postupku, nastaju bijeli i zeleni lug koji sadrže suspendirane čestice. Ove čestice mogu negativno uticati na efikasnost procesa, rad opreme i kvalitet proizvedene celuloze. U ovom radu ispituje se uticaj polimera na sedimentaciju suspendiranih čestica u bijelom i zelenom lugu u okviru procesa proizvodnje nebjeljene četinarske celuloze. Analizirane su različite vrste polimernih flokulanta s ciljem određivanja njihove efikasnosti u poboljšanju brzine sedimentacije, smanjenju mutnoće i unapređenju bistrenja luga. Pravilnim odabirom i doziranjem polimera postiže se stabilniji proces, smanjuju operativni problemi i poboljšava efikasnost sistema regeneracije hemikalija. Istraživanjem je potvrđeno da primjena odgovarajućih polimera može značajno uticati na smanjenje količine suspendiranih čestica, što direktno doprinosi poboljšanju kvaliteta procesnih tokova i stabilnosti proizvodnog sistema. Dobijeni rezultati predstavljaju korisnu osnovu za bolje razumijevanje mehanizama djelovanja polimera u alkalnim procesnim sredinama karakterističnim za celuloznu industriju. Polimeri sa velikim molekulskim masama i nižim do srednjim nabojima dali su najbolje rezultate tokom laboratorijskog testiranja u Natron-Hayat Maglaj.

Ključne riječi: regeneracija alkalija, kraft postupak, bijeli lug, zeleni lug, polimeri, flokulacija, sedimentacija, proizvodnja celuloze.

1. UVOD

Proces proizvodnje celuloze se dijeli na tri koraka: (1) obrada drveta, (2) kuhanje, (3) regeneracija hemikalija. Kuhanje, regeneracija hemikalija i vrsta drveta su tri glavna faktora koja utiču na svojstva lugova. Međutim, iz hemijske perspektive (tj. iz perspektive lugova), hemijska regeneracija i kaustifikacija predstavljaju manje-više jedan zatvoren kontinuirani ciklus, gdje se kuhanje (uključujući pranje celuloze) i kaustifikacija mogu posmatrati kao početni i završni koraci procesa hemijske regeneracije, kao što je prikazano na slici 1. [1]



Slika 1 Shema proizvodnje celuloze i regeneracije luga

Figure 1. Schematic representation of cellulose production and liquor regeneration.

Slika 1. Shematski prikaz proizvodnje celuloze i regeneracije lugova u fabrici celuloze. Kuhanje i pranje celuloze smatraju se dijelom procesa kuhanja, dok su uparavanje i spaljivanje crnog luga glavni koraci procesa hemijske regeneracije. Na kraju slijedi kaustifikacija prije nego što proces kuhanja ponovo započne.

1.1 Kuhanje

Kuhanje se izvodi ili u šaržnim kuhačima ili u kontinuiranim kuhačima. Drvo se kuha u alkalnoj otopini koja se naziva bijeli lug. Bijeli lug u sulfatnim fabrikama celuloze predstavlja mješavinu natrijevog hidroksida (NaOH) i natrijevog sulfida (Na_2S) [2].

Nakon završetka kuhanja, celuloza se odvaja, pere i šalje prema procesima specifičnim za proizvod. Preostala otopina naziva se razrijeđeni crni lug i sastoji se od reagovanog bijelog luga i ostataka drveta nakon uklanjanja vlakana. Razrijeđeni crni lug se šalje u proces regeneracije radi povrata hemikalija [3].

1.2 Regeneracija hemikalija

U procesu regeneracije, rijetki crni lug se uparava u gusti crni lug, a zatim sagorijeva na temperaturama do 1200°C u regeneracionom kotlu [3].

Tokom sagorijevanja, crni lug formira talinu koja se potom rastvara razrijeđenim bijelim lugom. Dobijena tečnost naziva se zeleni lug zbog svoje zelenkaste boje koja potiče od rastvorenog natrijum-hidrosulfida [4].

Suspendovane čestice u zelenom lugu izdvajaju se postupcima bistrjenja, sedimentacije ili filtracije, a talog se naziva talog zelenog luga (dregs). Filtrirani zeleni lug se zatim šalje na kaustifikaciju [4].

Nakon odvajanja zelenog luga i taloga, talog često još uvijek sadrži određenu količinu zelenog luga. Kako bi se povratila preostali zeleni lug, neka postrojenja ispiraju talog vodom. Sadržaj suhe materije povećava se odvodnjavanjem pomoću filtera (rotacioni bubanj ili PDF filter), presa ili centrifugiranja [4].

1.3 Kaustifikacija

Cilj kaustifikacije je pretvaranje Na_2CO_3 nazad u NaOH kako bi se ponovo koristio kao hemikalija za kuhanje u bijelom lugu. Bistri zeleni lug se miješa s krečom radi proizvodnje bijelog luga (NaOH), koji se zatim odvaja u dekanteru bijelog luga i ponovo koristi kao hemikalija za kuhanje. Preostali ostatak naziva se krečni mulj (CaCO_3) koji se ponovo peče u kreč u krečnoj peći [4].

Postrojenja za kaustifikaciju proizvodi visokokvalitetni bijeli lug ($\text{Na}_2\text{S} + \text{NaOH}$) u dovoljnim količinama kako bi se osigurala stabilne operacije proizvodnje celuloze i održala profitabilna proizvodnja u skladu s ekološkim i državnim propisima.

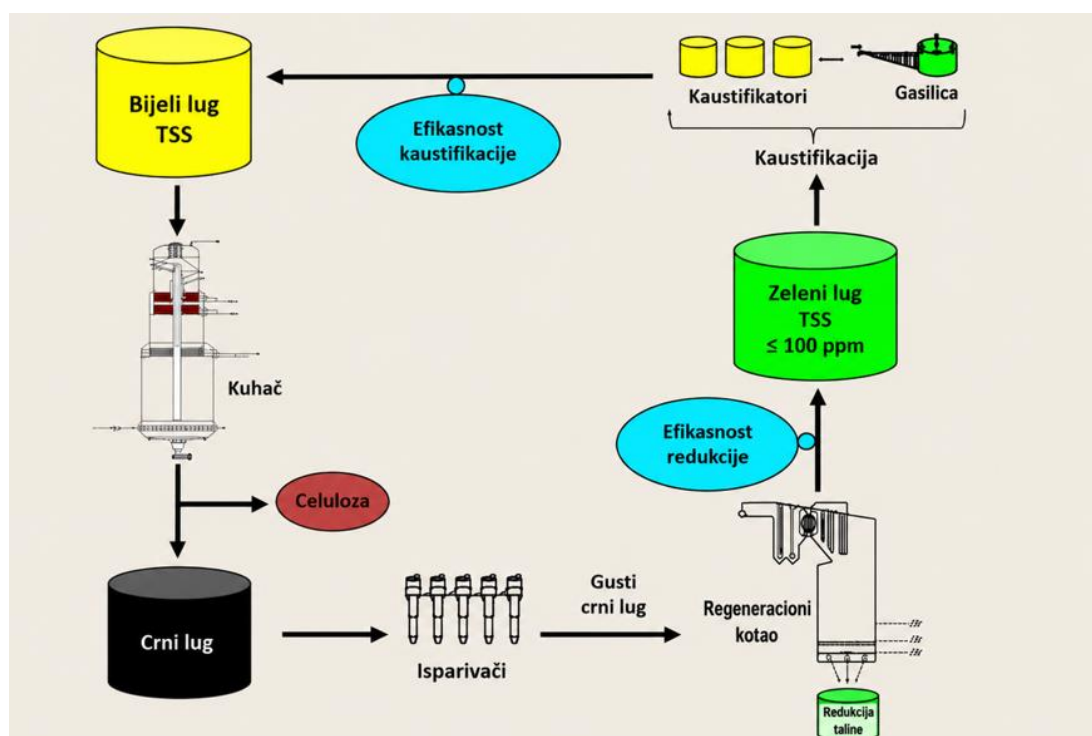
Neke fabrike smatraju postrojenja za kaustifikaciju “odlagalištem otpada” i zanemaruju njihovo tehničko unaprijeđenje. Srećom, dekanteri zelenog luga mogu služiti kao “bubrezi” sistema, jer uklanjaju nečistoće i neprocesne elemente, ali i one imaju ograničenja. Loš kvalitet zelenog luga negativno utiče na sve naredne procese: kaustifikaciju, kvalitet bijelog luga, kvalitet krečnog mulja i rad peći za kreč. Tipičan sadržaj mulja u zelenom lugu je 700–1500 mg/L. Ako se mulj ne ukloni pravilno, dolazi do problema sa taloženjem i filtracijom.

1.4 Varijable procesa kaustifikacije

Proizvodnja visokokvalitetnog bijelog luga je složen proces zbog velikog broja varijabli koje počinju u kotlu za regeneraciju i nastavljaju kroz cijeli sistem. Ključne operacije uključuju separaciju tečnosti i čvrstih materija.

Važne faze za separaciju su: dekantacija zelenog luga, gasilica, kaustifikatori, bistrenje bijelog luga i peć za kreč. Proces uključuje tri ciklusa: kalcij, natrij i sumpor. Kvalitet celuloze zavisi od kvaliteta bijelog luga, a kvalitet bijelog luga direktno zavisi od zelenog luga iz kojeg nastaje. Stabilan i visokokvalitetan bijeli lug je ključan za stabilan rad kuhača i kvalitetnu proizvodnju celuloze.

U ciklusu regeneracije u fabrikama za proizvodnju celuloze, dodatak sintetičkih ili prirodnih polimera značajno utiče na sedimentaciono ponašanje čestica u zelenom i bijelom lugu. Polimeri djeluju kao flokulanti, mijenjajući hidrodinamičke sile, površinski naboj (zeta potencijal) i karakteristike agregacije suspendovanih čvrstih materija, kao što su kalcijum-karbonat (krečni mulj) i talog zelene luga (dregs) [1, 2, 3, 4, 5].



Slika 2. Shema regeneracije luga sa parametrima [5]

Figure 2. Schematic representation of liquor regeneration with parameters [5].

Dozvoljeni sadržaj čvrstih čestica u lugovima iznosi:

- suspendovane čvrste materije u zelenom lugu ≤ 100 ppm
- suspendovane čvrste materije u bijelom lugu ≤ 20 ppm

Zbog toga se u industrijskoj praksi primjenjuju različiti hemijski i mehanički postupci za poboljšanje bistrenja luga. Posebno važnu ulogu imaju polimeri koji omogućavaju agregaciju finih čestica i njihovo efikasnije taloženje. Njihova primjena doprinosi poboljšanju rada sistema, smanjenju operativnih problema i stabilizaciji procesa regeneracije.

Tabela 1. Pregled polimera u industriji papira [6]**Table 1. Overview of polymers used in the paper industry [6].**

Prirodne neorganske supstance	Prirodne i modifikovane prirodne organske supstance	Sintetski polimeri
Aluminijum sulfat	Nativni škrob	Poliakrilamid, PAM
Polialuminijum-hlorid PAC	Modifikovani škrob	Politilenimin, PEI
Betonit	Galatktoman	Poli-amidoamin, PAAM
Koloidna silicijumova kiselina	Karboksilmetil celuloza, CMC	Poli-DADMAC
		Polivinilamin, PVam
		Polietilenoksid, PEO

U ovim visoko alkalnim i koncentrisanim suspenzijama djelovanje polimera zasniva se na ravnoteži specifičnih interakcija:

- Sterička stabilizacija i flokulacija: Premala količina polimera može otežati taloženje i smanjiti međusobne interakcije čestica održavajući ih dispergovanim. Postizanjem optimalne koncentracije polimera dolazi do efikasne mostne flokulacije.
- Viskoznost sistema: Visoke koncentracije polimera povećavaju viskoznost tečne faze, što može usporiti brzinu sedimentacije. Zbog toga je potrebno pažljivo optimizirati doziranje kako bi se postigla ravnoteža između povećane veličine flokula i povećanog otpora usljed veće viskoznosti sistema.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

Cilj ovog rada je ispitati uticaj različitih polimera na brzinu taloženja suspendiranih čestica u bijelom i zelenom lugu, te odrediti njihovu efikasnost u optimizaciji procesa bistrenja u proizvodnji nebijeljene četinarske celuloze.

- Kako bi eksperimentalni dio dao što pouzdanije rezultate, izvršena su sljedeća istraživanja:
- odabrane su lokacije uzorkovanja;
- istraživanje je sprovedeno u industrijski stabilnim uslovima pripreme lugova za proces proizvodnje nebijeljene četinarske celuloze u Natron-Hayat;

2.1. Metodologija određivanja kvaliteta lugova

Uzorci zelenog i bijelog luga uzimani su u pogonu Kaustike u industrijski stabilnim uslovima proizvodnje lugova u Natron-Hayat. Uzorkovanje je vršeno prije dekantera zelenog i bijelog luga.

Dio uzoraka ostavljen je kao referentni uzorak bez dodatka polimera, dok su u ostale uzorke dodavani različiti tipovi polimera u različitim koncentracijama.

Nakon dodavanja polimera praćeni su slijedeći parametri:

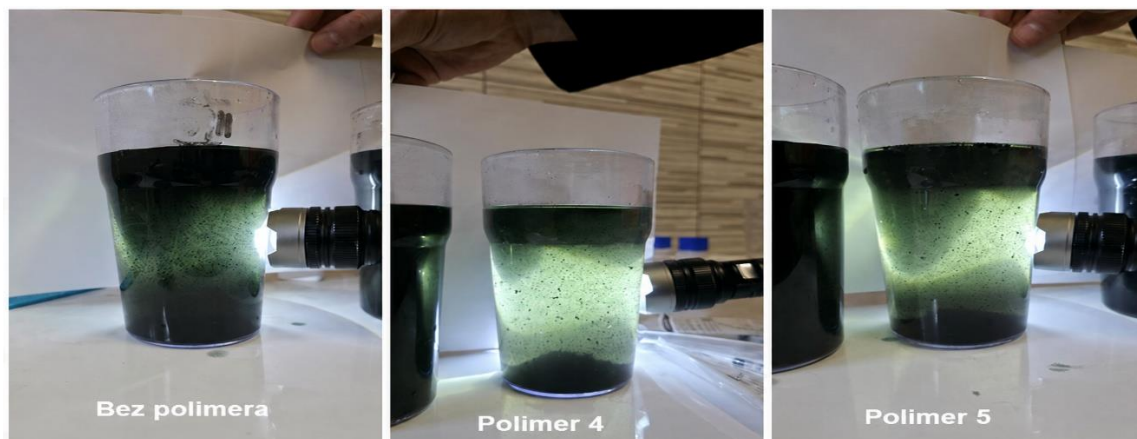
- brzinu sedimentacije,
 - formiranje flokula,
 - bistrina luga,
 - količina taloga,
 - stabilnost suspenzije,
 - mjerenje sadržaja suspendovanih čestica u laboratoriji metodom TAPPI 692-OM-00.
- U istraživanju su korišteni sintetički polimeri velike molekulske mase na bazi poliakrilamida.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati istraživanja pokazali su da primjena polimera značajno utiče na poboljšanje sedimentacije suspendiranih čestica u zelenom i bijelom lugu.

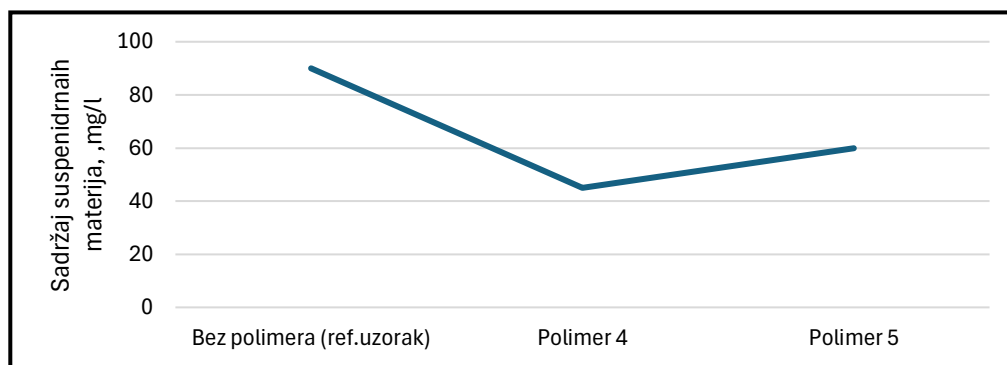
Zeleni lug sadrži nerastvorene alkalne anorganske čestice poznate kao dregs (npr. neizgoreni ugljik i metalni sulfidi). Zbog visoke pH vrijednosti (obično 11–12) i velike jonske jačine, elektrostatičko odbijanje uzrokuje formiranje sporotaloživih i voluminoznih suspenzija koje mogu otežati filtraciju i rad dekantera zelenog luga.

Sintetički polimeri velike molekulske mase na bazi poliakrilamida (najčešće anjonski ili neionski) dodaju se u dekanter zelenog luga. Oni izazivaju mostnu flokulaciju (bridging flocculation), pri čemu se polimerni lanci vezuju za više čestica istovremeno i povezuju ih u veće i gušće flokule koje se brže talože. Za laboratorijsko testiranje korišteni su vodorastvorni anjonski poliakrilamidi, molekulske mase između 10^5 i 10^7 g/mol; linearni sa -COO^- anjonskim grupama i različitom gustinom naelektrisanja.



Slika 3. Doziranje polimera u zeleni lug
Figure 3. Polymer dosing into green liquor.

Vidljivo je da Polimer 4 pokazuje veću efikasnost uklanjanja suspendiranih materija u odnosu na Polimer 5, jer je sadržaj suspendiranih materija smanjen za približno 50 %, dok je kod Polimera 5 smanjenje oko 33 % (Slika 4.)



Slika 4. Rezultati mjerenja sadržaja suspendiranih materija u zelenom lugu po metodi TAPPI 692-OM-00
Figure 4. Results of suspended solids content measurement in green liquor according to TAPPI 692-OM-00 method.

Utvrđeno je da dodatak anjonskih poliakrilamidnih flokulanata dovodi do formiranja većih i gušćih flokula, čime se povećava brzina taloženja i poboljšava bistenje luga. Suspendirane čestice, poput neizgorenog ugljika i metalnih sulfida, uspješnije su uklonjene iz sistema, što je pozitivno uticalo na proces kaustifikacije i rad dekantera bijelog luga.

Primjena optimalne količine polimera omogućila je:

- smanjenje sadržaja suspendiranih čestica,
- bržu sedimentaciju,
- poboljšanje filtracije taloga,
- smanjenje opterećenja procesne opreme.

Bijeli lug predstavlja aktivni lug za proces kuhanja sječke (natrijum-hidroksid i natrijum-sulfid) koji nastaje reakcijom zelenog luga sa pečenim krečom. Pri tome nastaju velike količine mulja kalcijum-karbonata (CaCO_3), poznatog kao krečni mulj. Ovaj mulj mora biti efikasno izdvojen kako bi se bistri bijeli lug mogao koristiti u kuhaču.

Kod bijelog luga zabilježeno je poboljšanje izdvajanja krečnog mulja (CaCO_3) nakon dodavanja flokulanata. Formirani flokuli bili su kompaktniji i stabilniji, što je omogućilo efikasnije odvajanje čvrste i tečne faze.

U tabeli 1 je prikaz polimera (tip, karakter i osobine) korištenih za laboratorijsko ispitivanje uticaja na kvalitet zelenog i bijelog luga.

Tabela 1. Polimeri korišteni za ispitivanje, tip, karakter i osobine

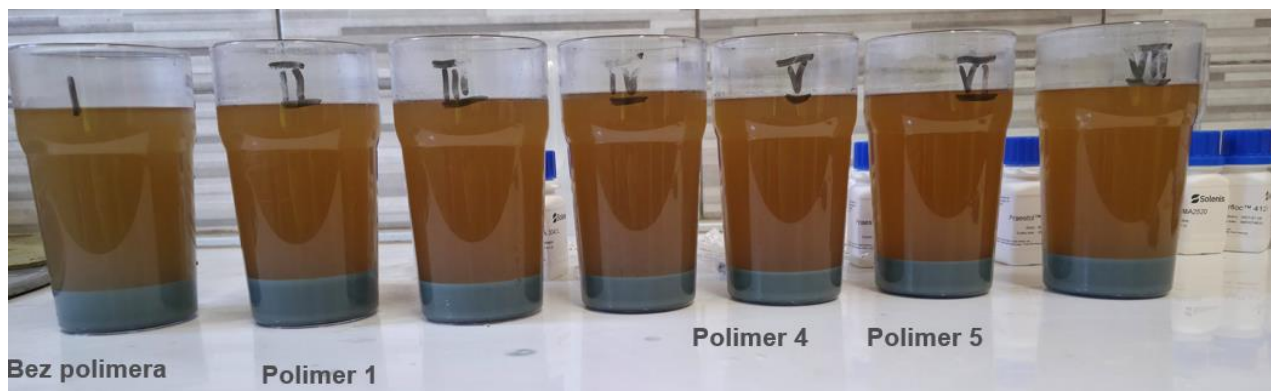
Table 1. Polymers used in the study: type, character, and properties.

Broj polimera	1	2	3	4	5	6
Anjonski poliakrilamid	da	da	da	da	da	da
Molekulska masa	srednja	srednja	srednja	velika	velika	velika
Naboj	+	++	+++	+	++	+++



Slika 5. Rezultati doziranja različitih polimera u prvoj minuti (čaha I bez polimera, čaše II, III, IV, V, VI, VII sa polimerima u količini 4 ppm)

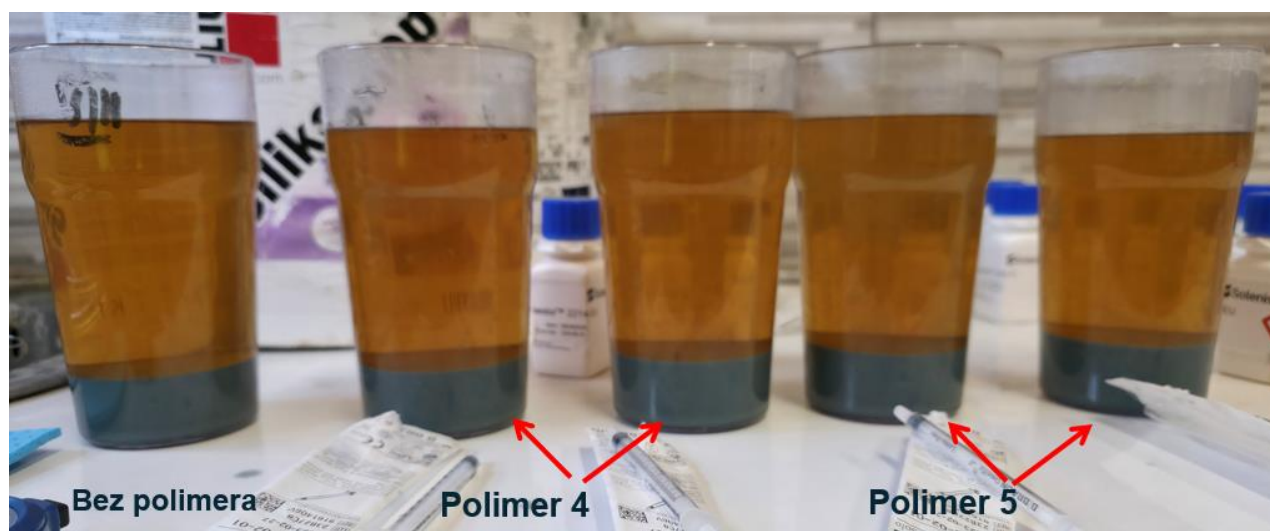
Figure 5. Results of dosing different polymers in the first minute (beaker I without polymer; beakers II, III, IV, V, VI, and VII with polymers at a dosage of 4 ppm).



Slika 6. Rezultati nakon 10 minuta od doziranja polimera u količini 4 ppm

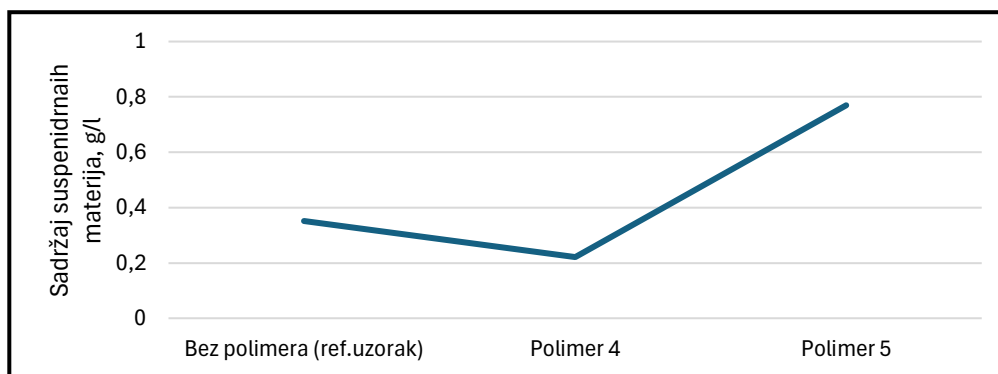
Figure 6. Results after 10 minutes of polymer dosing at 4 ppm.

Polielektroliti (koagulanti i flokulanti) koriste se za postizanje potrebne kritične koncentracije koagulacije (CCC). Katjonski polimeri se povremeno koriste za neutralizaciju negativnog površinskog naboja čestica mulja, dok su anjonski poliakrilamidi velike molekulske mase najčešći primarni flokulanti. Oni omogućavaju aglomeraciju finih čestica u teške i kompaktne flokule.



Slika 7. Povećanje doze najefikasnijih polimera sa 4 ppm na 8 ppm
Figure 7. Increase in the dosage of the most effective polymers from 4 ppm to 8 ppm.

Polimer 4 je pokazao pozitivan efekat jer je smanjio sadržaj suspendiranih materija za približno 36,9 %. Nasuprot tome, Polimer 5 je doveo do značajnog povećanja sadržaja suspendiranih materija ($\approx 119,6\%$), što ukazuje na slab ili nepovoljan efekat u odnosu na referentni uzorak prikazano (Slika 7.) Polimeri sa velikim molekulskim masama i nižim do srednjim nabojima pokazuju najbolje rezultate tokom laboratorijskog testiranja u Natron-Hayat Maglaj.



Slika 8. Rezultati mjerenja sadržaja suspendiranih materija u krečnom mlijeku po metodi TAPPI 692-OM-00
Figure 8. Results of suspended solids content measurement in lime milk according to TAPPI 692-OM-00 method.

Rezultati su pokazali da previsoke koncentracije polimera mogu povećati viskoznost sistema i negativno uticati na sedimentaciju, zbog čega je pravilno doziranje od ključnog značaja za postizanje optimalnih rezultata. Istraživanje potvrđuje da pravilnim izborom tipa i koncentracije polimera dolazi do značajnog poboljšanja kvaliteta zelenog i bijelog luga, stabilizacije procesa regeneracije hemikalija i povećanja efikasnosti proizvodnje nebjeljene četinarske celuloze. Pravilan izbor polimera ubrzava brzinu sedimentacije i poboljšava bistrenje zelenog luga, čime se osigurava čistiji lug za naredni proces kaustifikacije, uz stvaranje kompaktnog taloga pogodnog za filtraciju.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenog istraživanja može se zaključiti da primjena polimera ima značajan uticaj na poboljšanje kvaliteta zelenog i bijelog luga u procesu proizvodnje nebjeljene četinarske celuloze po sulfatnom postupku. Rezultati ispitivanja pokazali su da polimeri efikasno utiču na flokulaciju i sedimentaciju suspendiranih čestica, čime se poboljšava bistrenje luga i povećava efikasnost separacije čvrste i tečne faze.

Posebno je utvrđeno da anjonski poliakrilamidni flokulanti omogućavaju formiranje većih i kompaktnijih flokula, što doprinosi bržem taloženju čestica i efikasnijoj filtraciji taloga. Kod zelenog luga primjena polimera doprinosi efikasnijem uklanjanju dregs čestica, smanjenju opterećenja dekantera zelenog luga i poboljšanju kvaliteta bistrog

zelenog luga koji se dalje koristi u procesu kaustifikacije. Kod bijelog luga ostvareno je bolje izdvajanje taloga, čime se omogućava stabilniji rad procesa kuhanja i poboljšava kvalitet proizvedene celuloze.

Poseban naučni značaj ovog rada ogleda se u poređenju efikasnosti različitih tipova polimera i utvrđivanju njihove selektivnosti u odnosu na sastav i karakteristike zelenog i bijelog luga. Dobijeni rezultati potvrđuju da pojedini polimeri imaju izražen pozitivan efekat na smanjenje sadržaja suspendiranih materija, dok drugi mogu izazvati suprotan efekat i povećati opterećenje sistema. Time je potvrđena potreba za pažljivim izborom i optimizacijom hemijskih dodataka u procesu proizvodnje celuloze. Istraživanje je također pokazalo da je pravilno doziranje polimera od ključnog značaja za postizanje optimalnih rezultata.

Nedovoljna količina polimera ne omogućava efikasnu flokulaciju, dok prekomjerne količine mogu povećati viskoznost sistema i negativno uticati na brzinu sedimentacije i filtracije.

Primjena odgovarajućih polimera i optimizacija njihovog doziranja omogućavaju:

- smanjenje sadržaja suspendiranih čvrstih materija u lugovima,
- poboljšanje procesa sedimentacije i filtracije,
- stabilniji rad sistema regeneracije hemikalija,
- smanjenje operativnih problema i taloženja u procesnoj opremi,
- povećanje efikasnosti proizvodnje celuloze,
- smanjenje potrošnje energije i troškova održavanja.

Praktična vrijednost rada posebno se ogleda u mogućnosti optimizacije postojećih tehnoloških procesa u fabrikama celuloze kroz pravilan izbor polimera koji daju najbolje rezultate u uklanjanju suspendiranih materija. Na taj način doprinosi se ekonomičnijem, stabilnijem i ekološki prihvatljivijem procesu proizvodnje nebijeljene četinarske celuloze. Polimeri sa velikim molekulskim masama i nižim do srednjim nabojima pokazuju najbolje rezultate tokom laboratorijskog testiranja u Natron-Hayat Maglaj.

Dobijeni rezultati predstavljaju korisnu osnovu za bolje razumijevanje mehanizama djelovanja polimera u alkalnim procesnim sredinama karakterističnim za industriju celuloze i papira, te mogu poslužiti kao smjernica za dalja istraživanja i industrijsku primjenu savremenih flokulanata u procesima regeneracije hemikalija.

References

- [1] Čamić A., Botonjić Š., The Effect of main parameters on Brown Stock Pulp Washing at Natron-Hayat Maglaj, JST&M 1-2,2021.
- [2] Stenmarck L., Sundqvist H., Kraft Pulping Chemistry and Technology, Swedish Forest Industry Federation, Stockholm, 2006.
- [3] Golmaei S., Novel treatment methods for green liquor dregs and enhancing circular economy in kraft pulp mills, Doctoral thesis, Lappeenranta University of Technology, 2018.
- [4] Mäskinen K., Nurmesniemi H., Pöykiö R., Total and extractable non-process elements in green liquor dregs from the chemical recovery circuit of a semi-chemical pulp mill, Chem Eng J 166:954–961, 2011.
- [5] Quinde, A. (2022), White liquor quality during kraft pulping, Pulp & Paper Canada, 2022.
- [6] Jovanović S., Kvirgović M., Pomoćna sredstva u proizvodnji papira, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2010.

Corresponding author:

Armina Čamić

Natron-Hayat, Liješnica bb 74250 Maglaj Bosna i Hercegovina

armina.camic@natron-hayat.ba

INCREASING THE FUNCTIONALITY OF CORRUGATED CARDBOARD BOXES BY SURFACE LINER TREATING WITH FLAME RETARDANTS

UNAPREĐENJE FUNKCIONALNOSTI KUTIJA OD TALASASTOG KARTONA TRETIRANJEM POVRŠINE LAJNERA USPORIVAČIMA GORENJA

Yakov V. Kazakov^{1a}, Konstantin I. Balyberdin¹, Maxim E. Romanov²

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V.Lomonosov, Arkhangelsk, Russia; ²BKT-Service LLC, Saint Petersburg, Russia

^a(<https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>)

Abstract

The article shows that the final surface treatment of the outer cardboard liner with a 30% ammonium polyphosphate-based flame retardant solution ensures the best integrity and preservation of consumer properties of the packaging after direct contact with an open flame source. At the same time, modified cardboard provides a significant reduction in flammability and changes the nature of combustion. The findings highlight the need to consider the fire resistance of materials when designing packaging for environments where there is a risk of localized heating or fire.

Keywords: Fire retardants, kraftliner, fire resistance, deformation properties, packaging

Izvod

U radu je pokazano da završna površinska obrada spoljašnjeg lajnera kartona 30% rastvorom usporivača gorenja na bazi amonijum-polifosfata obezbeđuje najbolji integritet i očuvanje upotrebnih svojstava ambalaže nakon direktnog kontakta sa izvorom otvorenog plamena. Istovremeno, modifikovani karton omogućava značajno smanjenje zapaljivosti i menja prirodu procesa sagorevanja. Dobijeni rezultati ukazuju na potrebu da se pri projektovanju ambalaže uzme u obzir otpornost materijala na dejstvo vatre, posebno u uslovima u kojima postoji rizik od lokalizovanog zagrevanja ili požara.

Ključne reči: usporivači gorenja, kraftlajner, otpornost na dejstvo vatre, deformaciona svojstva, ambalaža

1. INTRODUCTION

Corrugated cardboard and boxes made from it are among the most common packaging materials in the world. It has a three-dimensional multi-layer structure consisting of cardboard for flat layers (liner) and paper for corrugation (fluting). This structure allows for a combination of high rigidity and strength of corrugated cardboard with relatively low density and weight. Corrugated cardboard is biodegradable and recyclable, meaning it is environmentally friendly throughout its entire life cycle and fully complies with the requirements of a circular economy. Corrugated cardboard is the ideal basis for solutions in the fields of modern technological packaging, design and construction.

However, despite all the advantages, cardboard is a highly flammable material. This cardboard defect poses a danger in conditions of storage, transportation or use of products. As fire safety requirements evolve—especially in construction, logistics, and the packaging of sensitive goods—the pulp and paper industry is increasingly challenged to improve and develop special types of fire-resistant paper and cardboard [1].

When ignited, cellulose undergoes thermal destruction, forming flammable volatile compounds that participate in ignition and facilitate the spread of flame across the surface. Fortunately, the chemical composition of cellulose allows for modification of the material through fire retardant treatment [2].

Fire retardants, chemical compounds that slow down the combustion process and flame spread, are actively used to modify cellulose materials. Their use in the pulp and paper industry will expand the scope of use of cardboard and paper due to their compliance with fire safety standards. However, the introduction of foreign chemicals, which make up the fire retardant, can initiate physicochemical changes in the fibrous structure of the cardboard, affecting the

strength of interfiber bonds, rigidity and absorbency of the material. This requires a comprehensive assessment of the reagent's compatibility with the technological process and the performance characteristics of the cardboard [3].

This article discusses the application of a technology for surface treatment of linerboard with a fire-retardant compound based on ammonium polyphosphate. Its advantage is that it meets modern trends in green chemistry while providing reliable protection for finished products [4].

When heated, phosphorus-containing compounds decompose to form phosphoric acid, which in turn can change the CO/CO₂ ratio in the direction of inhibiting the direct oxidation of carbon to CO₂, thereby reducing the exothermic effect of the reaction [5].

When using fire retardants, it is important to pay attention to the relationship between the level of fire protection achieved and the change in the mechanical strength of the material. This is critical for the practical implementation of any given type of fire retardant. The process of surface modification of cardboard, which includes the stage of surface application of a flame retardant in the form of an aqueous solution and subsequent drying, entails a "wetting-drying" type of action. This causes weakening of hydrogen bonds during repeated drying, uneven shrinkage and microcracks, which negatively affects the final mechanical properties of the material.

The aim of the work is to improve the functionality of corrugated cardboard boxes by surface treating the cardboard liner with fire retardants, with minimal degradation of the key mechanical properties of the cardboard.

2. EXPERIMENTAL

The control samples were boxes 108×60×45 mm, formed from single-wall corrugated cardboard with a *B* flute, in which liner 125 g/m² made of primary fiber, treated with a fire retardant, was used as the outer flat layer. Ammonium polyphosphate (APP) was used as a fire retardant in the form of a 15% and 30% aqueous solution with a consumption of 5% of the absolutely dry matter (a.d.s.) mass.

To obtain a uniform and predictable coating, a specified amount of aqueous fire retardant solution was applied using the K303S RK Multicoater. This device uses a variable gap roller system to produce coatings with predictable and controlled thicknesses in the range of 4–24 μm on paper or cardboard surfaces up to 0.156 m² in area. This ensures high uniformity and accuracy of film application, which is important for high repeatability of the coating application mode. Drying of samples was carried out in a laboratory dryer with controlled temperature. It uses a cloth to press the sheet being dried against a heating surface, which minimizes shrinkage and warping during the drying process.

Before testing, cardboard samples were conditioned under standard conditions: temperature (23 ± 1) °C, relative air humidity (50 ± 2)%.

Fire resistance tests were carried out in accordance with GOST R 50810-95 in the laboratory of fire-technical examination of building and finishing materials of NArFU. The essence of the method is to determine the ability of materials (fabrics, non-woven fabrics) to sustain combustion after exposure to a standard flame source under controlled conditions.

Compression tests of boxes with a modified outer liner to evaluate the load-bearing capacity were carried out on a TLS Validator 30 kN press. Test mode: compression at a constant speed of 10 mm/min with plotting diagrams "Load (N)-Displacement (mm)". The tests were conducted at the Scientific and Technical Center "Modern Technologies for Processing Northern Bioresources" of NArFU.

3. RESULTS AND DISCUSSION

At the first stage, an experiment was conducted on cardboard liner samples in order to confirm the fire-retardant properties of the fire retardant. The target fire resistance characteristics were determined for the original and treated samples.

Treatment with an aqueous solution of fire retardant significantly increased the fire resistance of the linerboard. The appearance of the liner samples during the fire resistance test is shown in Figure 1. Quantitative results are presented in Table 1.

The results showed that the fire retardant effectively reduces ignition time, promotes flame extinction, and actively prevents its spread across the surface of the material. The fire retardant localizes thermal impact and, by forming a charred layer with low thermal conductivity, protects the underlying layers of cardboard. The most

pronounced effect is observed in the material's ability to self-sustain combustion. After removing the flame source, the residual combustion time of the linerboard was reduced by 44 and 72%.

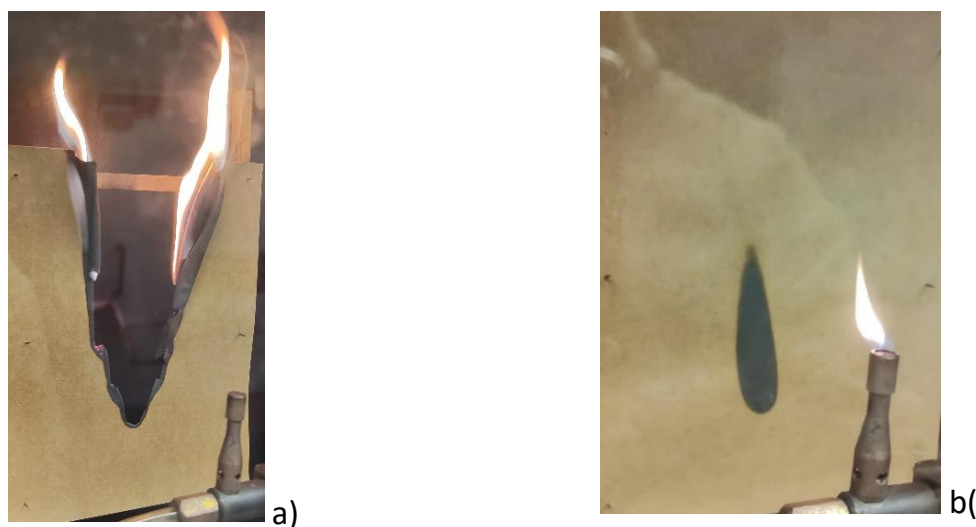


Figure 1: Test samples of kraftliner during fire resistance testing: a – untreated sample; b – sample treated with 30% fire retardant solution

Slika 1. Uzorci kraftlajnera tokom ispitivanja otpornosti na dejstvo vatre: a) netretirani uzorak; b) uzorak tretiran 30% rastvorom usporivača gorenja.

Table 1: Results of fire resistance tests of linerboard before and after treatment with a fire retardant
Tabela 1. Rezultati ispitivanja otpornosti lajner-kartona na dejstvo vatre pre i nakon tretiranja usporivačem gorenja.

Property	Before processing	After processing at a concentration of	
		15%	30%
Minimum ignition time, sek	6	8	11
Residual combustion time, s	71	40	20
Average charring length, mm	195*	60	115

* length of charring of the sample, measured after 40 seconds of residual combustion

The second stage involved assessing the load-bearing capacity of test boxes hand-made from primary fibre corrugated cardboard with a 125 g/m² outer liner surface-treated with a flame retardant. The corrugated cardboard boxes under study were exposed to a direct fire source under standardized conditions, Fig. 2.

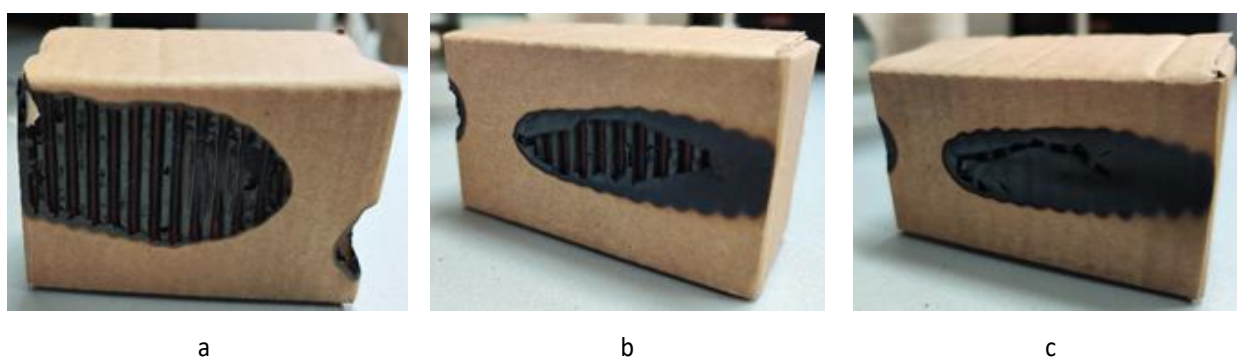


Figure 2: Test boxes after direct exposure to flame: a – untreated sample; b – sample treated with 15% fire retardant solution; c – sample treated with 30% fire retardant solution

Slika 2. Ispitne kutije nakon direktnog izlaganja plamenu: a) netretirani uzorak; b) uzorak tretiran 15% rastvorom usporivača gorenja; c) uzorak tretiran 30% rastvorom usporivača gorenja.

Visual analysis of test samples of cardboard boxes after exposure to a flame source showed the following: firstly, the fire retardant effectively prevents the spread of flame along the outer surface of the box, and secondly, an obvious correlation between the concentration of the fire retardant solution and the degree of thermal destruction of the material.

The load-displacement graphs plotted during compression tests of boxes after exposure to fire are shown in Fig. 3.

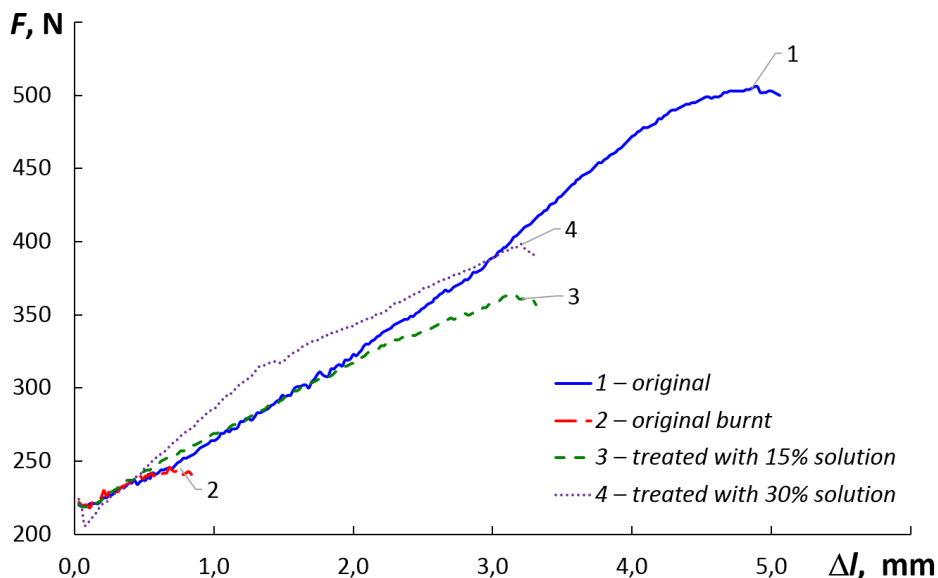


Figure 3: Load-displacement curves for box samples: 1 – original; 2 – original burnt; 3 – treated with 15% solution; 4 – treated with 30% solution

Slika 3. Krive opterećenje–pomeranje za uzorke kutija: 1) početni uzorak; 2) početni uzorak nakon izlaganja plamenu; 3) uzorak tretiran 15% rastvorom; 4) uzorak tretiran 30% rastvorom.

Analyzing the load-displacement graphs constructed from the results of compression tests of boxes after exposure to fire, it can be noted that fire exposure leads to a significant reduction in the mechanical properties of the packaging. The original samples demonstrate higher strength and rigidity (Fig. 3, curve 1), while the samples subjected to fire exposure show a significant drop in load-bearing capacity. The load that samples not treated with a fire retardant can withstand after exposure to fire is 45%, and the compression deformation before the box collapses is only 8% of the strength of the original sample.

Finishing the outer liner with a fire retardant allows the box to retain some of its operational strength. Boxes with liners treated with a fire retardant, although they lose strength after exposure to fire, this reduction is significantly less and amounts to 34% when treated with a 15% fire retardant solution, and 27% when using a 30% solution. The compressive deformation of such boxes also increases compared to untreated samples.

Thus, the obtained quantitative data and visual assessment confirm that the final surface treatment of the outer cardboard liner with a 30% concentration flame retardant solution ensures the best integrity and preservation of the consumer properties of the packaging after direct contact with an open flame source. At the same time, modified cardboard provides a significant reduction in flammability and changes the nature of combustion.

The findings highlight the need to consider the fire resistance of materials when designing packaging for environments where there is a risk of localized heating or fire.

4. CONCLUSIONS

1) A fire retardant based on polyphosphoric acid salt has shown high efficiency in increasing the fire resistance of cardboard;

2) The composition used does not cause a critical deterioration in mechanical properties – the strength of the cardboard remains sufficient for its intended use;

3) Finishing treatment with a solution with a concentration of 30% ensures the best preservation of the strength properties of containers after exposure to fire;

4) The results obtained have practical implications for packaging, construction and decorative materials, in areas where there is a risk of localized heating or fire.

Acknowledgements:

The work was carried out using the equipment of the Scientific and Technical Center "Modern Technologies for Processing Northern Bioresources" and Laboratory of fire-technical examination of building and finishing materials (Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Russia).

References

- [1] Balyberdin K.I., Romanov M.E., Kazakov Ya.V. Deformation Properties of Cardboard Treated with Fire Retardants. In: The issues in Mechanics of Pulp and Paper Materials: Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference named after Professor V.I. Komarov (Arkhangelsk, September 11–13, 2025). Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Arkhangelsk: NArFU, 2025, P. 92–97.
- [2] Fire Retardants and Their Role in Ensuring Fire Resistance of Construction Materials [Electronic resource] // Available at: <https://stroy-zashita.ru/blog/antipiren> (accessed: 03.09.2025)
- [3] Leonovich A.A., Sheloumova A.V. Comparative Analysis of the Effectiveness of Fire Retardants on the Example of Wood Materials. Izvestia of St. Petersburg Forestry Technical Academy. 2013. № 204. P. 161–171.
- [4] Visakh P. M. Flame Retardants: Polymer Blends, Composites and Nanocomposites [Electronic resource] / P. M. Visakh, Y. Arao ; под ред. P. M. Visakh, Y. Arao. – Cham: Springer International Publishing, 2015. – 314 p. – (Engineering Materials). – DOI: 10.1007/978-3-319-03467-6
- [5] Wang N., Liu Y., Liu Y., et al. Properties and mechanisms of different guanidine flame retardant wood pulp paper // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2017. Vol. 128. P. 224–231. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.10.007

Corresponding author:

Yakov Kazakov, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
17, Severnaya Dvina Emb, Arkhangelsk, Russia.
E-mail: j.kazakov@narfu.ru

AGLOMERATION OF CALCIUM CARBONATE PARTICLES IN PAPER COATING MIXTURE

AGLOMERACIJA ČESTICA KALCIJUM-KARBONATA U SMEŠI ZA PREMАЗIVANJE PAPIRA

Nika Gregorka, Klemen Možina^a

University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana, Slovenia

^a(<https://orcid.org/0000-0002-9234-7612>)

Abstract

Agglomeration of particles in paper coating mixtures adversely affects coating uniformity and print quality. Base paper has a naturally rough and uneven structure; therefore, coatings containing pigments, binders, auxiliaries, and water are applied to improve surface properties. In these mixtures, particles, especially calcium carbonate, form larger agglomerates, and their interactions with the liquid phase influence the paper microstructure. Uneven agglomeration increases surface roughness, which the coating is intended to reduce. This study examines how different CaCO₃/kaolin ratios, binders, and ultrasonic treatment affect agglomeration. Six formulations were analysed using SEM and surface property measurements. Results show higher agglomeration in CaCO₃ rich mixtures and only partial reduction through ultrasonication.

Keywords: paper, coating, calcium carbonate, kaolin, agglomeration, ultrasound

Izvod

Aglomeracija čestica u smešama za premazivanje papira nepovoljno utiče na ujednačenost premaza i kvalitet štampe. Osnovni papir ima prirodno hrapavu i neravnu strukturu; zbog toga se premazi koji sadrže pigmente, veziva, pomoćna sredstva i vodu nanose radi poboljšanja površinskih svojstava. U ovim smešama čestice, naročito kalcijum-karbonat, formiraju veće aglomerate, dok njihove interakcije sa tečnom fazom utiču na mikrostrukturu papira. Neujednačena aglomeracija povećava hrapavost površine, koju premaz upravo treba da smanji. U ovom radu ispituje se kako različiti odnosi CaCO₃/kaolin, veziva i ultrazvučni tretman utiču na aglomeraciju. Šest formulacija analizirano je primenom SEM analize i merenja površinskih svojstava. Rezultati pokazuju izraženiju aglomeraciju u smešama bogatim CaCO₃ i samo delimično smanjenje aglomeracije nakon ultrazvučnog tretmana.

Ključne reči: papir, premaz, kalcijum-karbonat, kaolin, aglomeracija, ultrazvuk

1. INTRODUCTION

Paper coating is a key process in the paper industry, as it improves the surface and optical properties of paper. The surface of base paper is naturally embossed and uneven, so it is covered with a pigment layer, most often calcium carbonate (CaCO₃) or kaolin, which is bound by a binder [1]. The purpose of coating is to improve smoothness, gloss, whiteness, opacity, surface uniformity, print quality, uniform colour uptake, and varnishing ability. Coating also prevents negative phenomena associated with uncoated papers, such as dusting, splitting, curling, and dimensional instability [2]. The coating process includes four phases: preparation of the coating mixture, application, drying, and smoothing of the coating. Various coaters are used for application (roller, scraper, stick, or airbrush), either single-sided or double-sided. The quality of coated paper is affected by the quality of the base paper, the composition of the mixture, and the selected coating system [1, 3]. The quality of the base paper determines the quality of the final coating. The coating cannot hide structural defects, so uniformity, mechanical resistance, and fibre quality must be adequate. The paper must be strong enough to pass through the coater, have optimal dimensional stability, and a uniform grammage and thickness [2, 4–8]. Woodfree, wood-based, and recycled papers are used, with grammage of 30–60 g/m². The degree of sizing depends on the coating process and the composition of the mixture. Pigments represent 80–90% of the coating mixture and have a decisive influence on surface properties. The required properties of pigments are: small particle size (< 2 μm), narrow distribution, high whiteness (> 90%), opacity (> 95%), good dispersibility, low abrasiveness, and compatibility with binders [9–12]. The

most commonly used are CaCO_3 and kaolin [1, 13]. CaCO_3 is one of the most used pigments due to its high whiteness, low price, and good optical properties. There are GCC (ground) and PCC (precipitated) calcium carbonate, which differ in method of production and particle size. GCC has particles of 0.5–10 μm , while PCC has particles of 20–300 nm, allowing better control of properties [14–17]. The advantages of CaCO_3 are whiteness, good dye absorption, and price. The disadvantages are lower gloss, higher binder consumption, and coarse particle structure (Table 1) [13–19]. Kaolin is a white silicate material with a flat morphology, which allows uniform distribution of particles and a smoother surface. The advantages are good dispersibility, low abrasiveness, improved smoothness and gloss, and favourable price. The disadvantages are lower whiteness and opacity [1, 18].

Table 1: Advantages and disadvantages of CaCO_3 and kaolin

Tabela 1. Prednosti i nedostaci CaCO_3 i kaolina

PIGMENT	ADVANTAGE	DISADVANTAGE
calcium carbonate	– whiteness – good absorption of the printing ink – good price	– low gloss – high opacity – higher binder consumption
kaolin	– good dispersion – non-abrasive – printing properties – glossy surface – low binder consumption – high smoothness – environmentally friendly – affordable	– low whiteness – low opacity

Binders attach the pigment particles and the coating to the paper. Their proportion is 5–25% relative to the pigment. Key properties include high binding capacity, good dispersibility, stability, and low foaming tendency. Currently, synthetic binders (latexes) predominate, enabling highly concentrated mixtures and enhancing smoothness, gloss, and water resistance. Natural binders (starch, CMC, casein) are used as co-binders to control rheology and water retention [18, 20–24]. Auxiliaries control viscosity, water retention, pH, smoothness, gloss, foaming, paint drying, and optical properties. These include viscosity regulators, dispersants, hardeners, antifoams, tinting agents, optical brighteners, waxes, surfactants, and pH regulators [25–28]. Coating mixtures vary according to the end use and coating system. They comprise pigments, binders, auxiliaries, and water. The basic composition is shown in Table 2 [2, 29].

Table 2: Basic composition of the coating mixture

Tabela 2. Osnovni sastav smeše za premazivanje

RAW MATERIAL	RELATIVE WEIGHT SHARE [%]
pigment	100
water	30–70
binder	5–30
auxiliary additives	< 5

The key properties of the mixture are binder requirement, rheology, viscosity, pH, water resistance, water retention, and solids concentration (30–70%) [2]. Preparation is carried out continuously or discontinuously. Pigments are dispersed in water with added dispersants, then binders and auxiliaries are added. The mixture is homogenised, air bubbles are removed, and it is filtered before application [30, 31]. The concentration determines the type of mixture (low, medium, or high concentration) and the choice of coating agent [30]. Particles can combine into agglomerates or aggregates [32]. Agglomerates are formed due to weak physical forces (Van der Waals). They are unstable and can break up or recombine. For small particles, separation is more difficult due to higher attractive forces [33–35]. Aggregates are formed due to solid bridges between particles, are stable, and have a smaller specific surface area than individual particles [33]; therefore, ultrasound (> 20 kHz) is used to deagglomerate pigments (Figure 1).

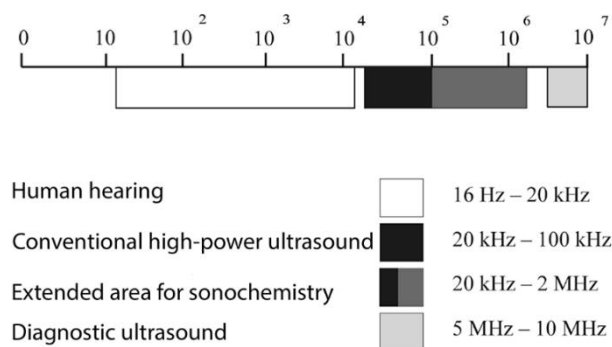


Figure 1: Ultrasound frequency range.

Slika 1. Frekvencijski opseg ultrazvuka

High-power ultrasound (20–100 kHz) induces cavitation, where the implosion of bubbles releases energy that breaks up agglomerates [36–38]. Ultrasonic grinding enables fine dispersion without grinding media. The advantages include uniform particle distribution, improved gloss and optical properties, and reduced binder consumption. Ultrasonic systems are already used in industry for pigment dispersion [39, 40].

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materials

2.1.1 Formulations of Coating Mixtures

In cooperation with Papirnica Vevče, six industrial coating mixtures were prepared with different ratios of calcium carbonate (CaCO_3) to kaolin. The recipes (Table 3) were calculated per 100 parts of absolutely dry pigment. The proportion of NaOH was determined so that the pH of the mixture was 9. The aim was to achieve approximately 65% dry matter, with the remaining proportion being water ($\approx 35\%$).

Table 3: Coating mixture from paper mill Vevče

Tabela 3. Smeša za premazivanje iz fabrike papira Vevče

Raw material	Product concentration [%]	Proportion of a.d. per 100 a.d. parts of pigment
CaCO_3 H90	78	100/80/60/40/20/0
kaolin (Amazon)	72	0/20/40/60/80/100
CMC	90	0,2
SB Lateks	54	12
UF crosslinkig (Urepret)	59	1
NaOH	/	0,1

Based on the recipes, the actual mass fractions of individual components were calculated (Table 4). The differences between the samples relate mainly to the CaCO_3 /kaolin ratio, while the proportions of binders and auxiliaries change minimally. The water content is highest in sample S1 and decreases towards S6.

Table 4: Calculated proportions of materials in coating mixtures

Tabela 4. Izračunati udeli materijala u smešama za premazivanje

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	100/0	80/20	60/40	40/60	20/80	0/100
CaCO_3 H90	128,20	102,56	76,92	49,92	25,64	0
kaolin	0	27,78	55,56	83,33	111,11	138,89
CMC	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
SB lateks	22,22	22,22	22,22	22,22	22,22	22,22

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	100/0	80/20	60/40	40/60	20/80	0/100
UF crosslinkig	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69
NaOH	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
water	14,22	12,83	11,44	10,95	8,02	7,28
TOGETHER	166,65	167,40	168,15	168,43	169,00	170,40

For further work, the composition was calculated per 100 g of coating mixture (Table 5), allowing comparability between samples. The pigment component consists of CaCO₃ H90 (90% of particles < 2 µm) and kaolin. The binders are CMC (natural) and SB latex (synthetic), and the auxiliary agents are UF crosslinker and NaOH.

Table 5: Composition of 100 g of coating mixture

Tabela 5. Sastav 100 g smeše za premazivanje

	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	100/0	80/20	60/40	40/60	20/80	0/100
CaCO ₃ H90	76,93	61,27	45,75	29,64	15,17	0
kaolin	0	16,59	33,04	49,48	65,75	81,51
CMC	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
SB lateks	13,33	13,27	13,21	13,19	13,15	13,04
UF crosslinkig	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	0,99
NaOH	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
water	8,53	7,66	6,80	6,05	4,75	4,27

Samples S1–S3 contain a higher proportion of CaCO₃ (100/0, 80/20, 60/40), while samples S4–S6 contain a higher proportion of kaolin (40/60, 20/80, 0/100). The samples were coated on Double A, A3, 80 g/m² paper.

2.2 Methods

The components of the coating mixtures were measured into plastic containers and homogenised with a Wisestir HS 30D propeller mixer (Witeg, Germany) at 1000 rpm and room temperature. This was followed by ultrasonic treatment in an Asonic PRO-100S-40 kHz ultrasonic bath. Each sample was treated for 5 minutes at a frequency of 40 kHz at two different temperatures: 35 °C and 45 °C. Three sets of samples were obtained: untreated coating mixtures, mixtures treated with ultrasound for 5 minutes at 35 °C, and mixtures treated with ultrasound for 5 minutes at 45 °C. For application to paper, 3 ml of the mixture was used, which was evenly distributed with an RK Print Coater K303S Multicoater equipped with coating bar No. 1 and a medium coating speed. The samples were air dried at room temperature. After drying, standard measurements of the basic physical, surface, optical, mechanical, and microscopic structural properties of coated papers S1–S6 were performed.

3 RESULTS WITH DISCUSSION

3.1 Microscopy and image analysis

3.1.1 Scanning electron microscopy – SEM

SEM images at 9000x were taken to examine the structure of the CaCO₃ and kaolin pigment particles before and after treatments (Table 6). This magnification provided the optimal view, ensured image clarity, and allowed approximate particle size measurement. Particles of various sizes, including agglomerates, were measured.

Table 6: Particle size of CaCO₃ and kaolina

Tabela 6. Veličina čestica CaCO₃ i kaolina

	Particle size [µm]			
	H90		KAOLIN	
1.	1,06	1,25	0,45	1
2.	1,09	0,86	0,92	0,71
3.	0,85	1,62	1	0,78
4.	1,78	0,64	0,87	0,52

5.	0,76	2,19	0,6	0,58
6.	1,99	0,57	1,2	0,27
7.	2,01	1,11	1	1,84
8.	0,86	1,33	0,91	1,72
9.	0,77	0,5	1,27	0,79
10.	2,01	0,95	0,63	1,06
$\bar{x}$	1,21		0,91	
Sx	0,54		0,39	
CV	44,4		43,2	

3.2 Calcium carbonate (CaCO_3)

CaCO_3 is the most commonly used pigment in coating mixtures due to its whiteness and durability, but it has disadvantages, such as lower gloss and higher binder consumption. The average particle size is 1.21 μm , which is approximately 0.3 μm larger than that of kaolin. The particles are distributed over the entire surface, where more free pores are observed than in the kaolin sample. This diversity also affects the standard deviation, which is high at 0.54 μm , with a coefficient of variation of 44%.

3.3 Kaolin

Kaolin improves smoothness and gloss, and reduces opacity. Its particles are hexagonal, more rounded, and on average smaller than 1 μm . The standard deviation is 0.39 μm , indicating a slightly more homogeneous distribution than CaCO_3 (Table 7). The combination of both pigments allows optimal filling of the pores between the fibres.

Table 7: Pigment particle size in the coating mixture

Tabela 7. Veličina čestica pigmenata u smeši za premazivanje

	Particle size [μm]					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
PP	1,75	1,68	1,28	1,37	1,81	1,73
PP+UZ1	1,75	1,68	1,01	1,01	1,11	0,69
PP+UZ2	1,24	0,80	1,09	0,89	1,35	0,98
PM	1,40	1,06	1,11	1,02	1,04	0,98

3.4 Coating mixture (CM)

The structure of the coating mixture was analysed before application to the paper. The largest particles were measured in S1 (1.40 μm), and the smallest in S6 (0.98 μm). The addition of kaolin reduces particle size and results in a more uniform surface. At higher kaolin contents (S4–S6), less agglomeration and greater homogeneity are observed. The pigment particles are stacked on top of each other but remain neatly and evenly distributed over the surface. Free pores also appear, allowing air to pass through and affecting the degree of porosity and roughness of the paper (Figure 2). The surface of S5, with 80% kaolin content, appears smoother. The particle size is only 0.02 μm smaller compared to S2 (Table 7). The structure of the kaolin particles and their hexagonal shape are evident. Free spaces that allow air to pass through are also visible in S5. S6 is a sample with 100% kaolin content, achieving the smallest particle size of 0.98 μm . The individual particles are evenly distributed over the surface of the coated paper, with less agglomeration observed and free spaces that allow air to pass through are noticeable (Figure 2).

3.5 Coated paper (PP)

After coating, the particle size increases in all samples. S5 has the largest average size (1.81 μm), while S3 has the smallest (1.28 μm). CaCO_3 results in a rougher surface with more pores, whereas kaolin produces a smoother structure. S3 and S4 display the most homogeneous surfaces with minimal agglomeration. At first glance, the particles on the surface of S3 are smaller (Figure 3c), and their size of 1.28 μm is quite uniform. Some accumulation is noticeable, but not significant (Figure 3c). The surface appears smoother, and air pores are also less frequent. Comparable behaviour is observed in S4, with a dominant proportion of kaolin. Here, almost no air pores are

present. The particles are neatly arranged and clearly visible (Figure 3d). In S5, the particles are evenly distributed over the surface; some accumulation is visible, but the surface remains smooth (Figure 3e). In S6, with 100% kaolin, particle agglomeration is observed, with pigment particles accumulating in layers. Larger pieces of kaolin are also visible, as the smaller particles have merged into larger ones after coating (Figure 3f).

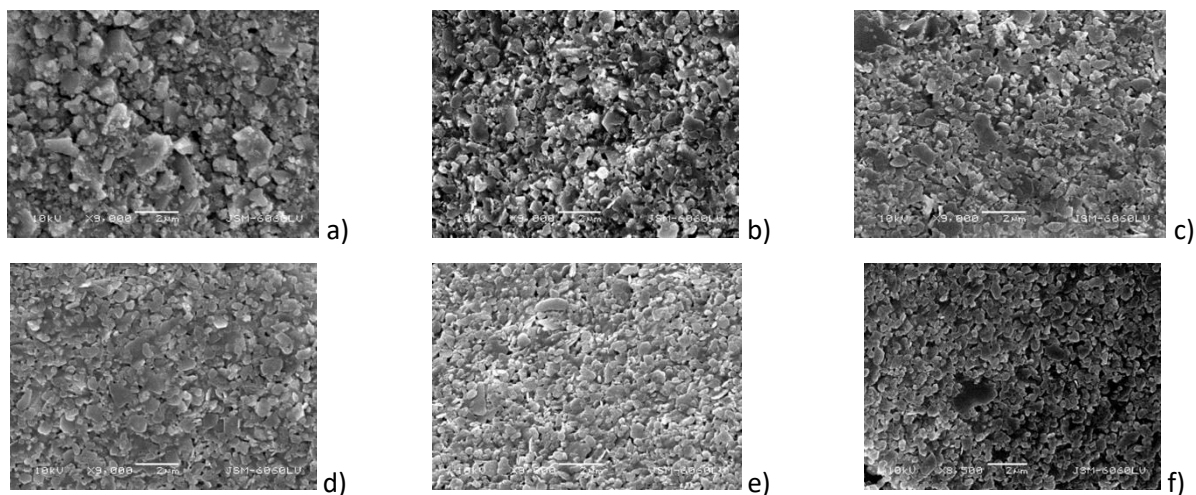


Figure 2: SEM pictures of **coating mixture** samples S1–S6 at 9000 $\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.
Slika 2: SEM snimci uzoraka smeše za premazivanje S1–S6 pri uvećanju od 9000 $\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.

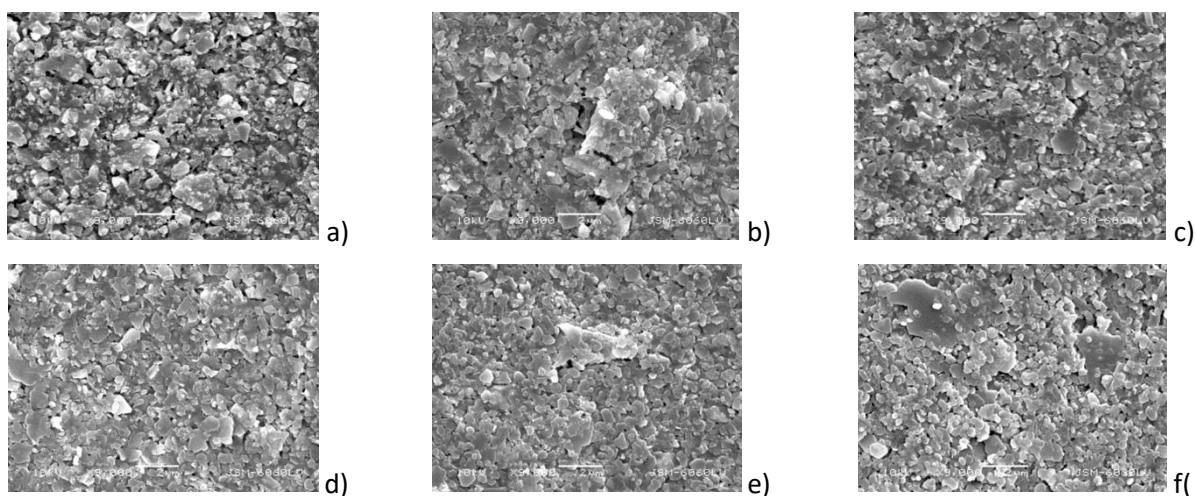


Figure 3: SEM pictures of **coated paper** samples S1–S6 at 9000 $\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.
Slika 3: SEM snimci uzoraka premazanog papira S1–S6 pri uvećanju od 9000 $\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.

3.6 Coated paper after the ultrasound 1 (PP+UZ1)

Ultrasound 1 (35 °C, 5 min) had the greatest effect on samples with a high proportion of kaolin. The largest change was observed in S6, where the particle size was reduced to 0.69 μm . In CaCO_3 samples (S1, S2), pores and agglomerates remained present. The surface appears quite “sharp”, which also makes it rougher and less uniform. Visual changes to the surface are evident in S2, although the particle size differs only minimally compared to S2 before ultrasound treatment (Figure 17b). The surface may appear softer at first glance, as the particles are connected into larger pieces and aggregation is present. S2 after ultrasound treatment appears more uniform compared to the other S2 samples (S2 PM and S2 PP) before ultrasound treatment. In S3, the pigment particles are of uniform size, distributed over the surface, with no significant aggregation observed, and compared to the coated paper, the surface is visually almost the same (Figure 4c). Figure 4d shows that the pigment particles in S4 are

smaller. The structure itself appears quite uniform, but with a greater number of smaller pores. The surface of S4 is also visually indistinguishable from the S4 coated paper (Figure 3d). For S5, a clear decrease in particle size is evident from Figure 4e. On average, S5 particles are $0.80\text{ }\mu\text{m}$ smaller after ultrasound treatment 1. The particles aggregate into larger pieces, but the surface appears more uniform. For S6, the particles reach the smallest size value of $0.69\text{ }\mu\text{m}$. The particles are evenly distributed over the surface, with no significant accumulation observed (Figure 4f).

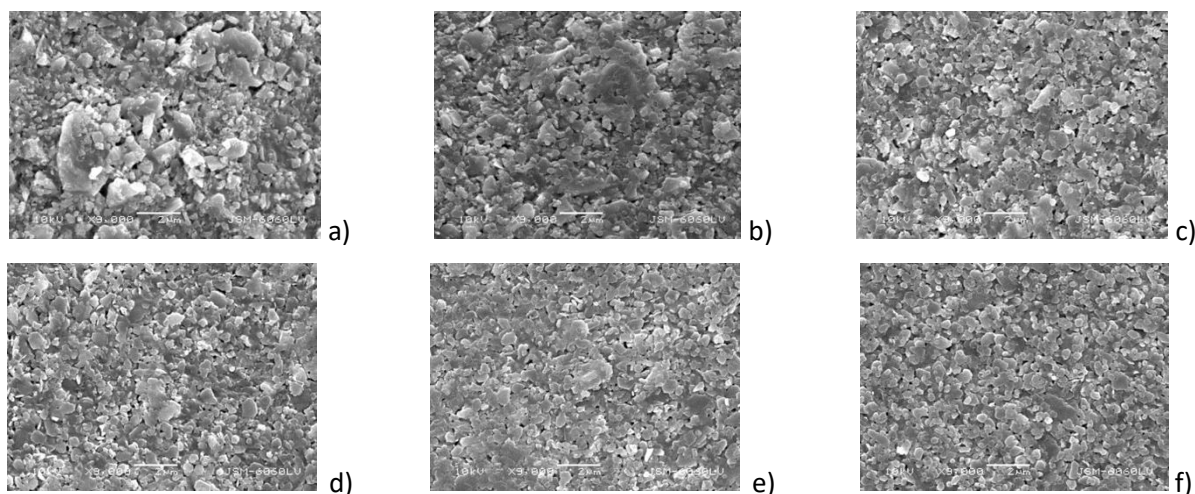


Figure 4: SEM pictures of coated paper samples after **ultrasonic treatment 1** for S1–S6 at $9000\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.

Slika 4: SEM snimci uzoraka premazanog papira S1–S6 posle ultrazvučnog tretmana 1 pri uvećanju od $9000\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.

3.7 Coated paper after the ultrasound 2 (PP+UZ2)

Ultrasound 2 ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$) more effectively disaggregated CaCO_3 particles. In S1 and S2, the particle size was reduced to $1.24\text{ }\mu\text{m}$ and $0.80\text{ }\mu\text{m}$, respectively. In kaolin, the effect is less pronounced, as it disaggregates already at lower temperatures. Higher temperatures affect the activity of pigment particles themselves, which should, in principle, lead to the breaking up of agglomerate formations. In this case as well, treatments S1 and S2 with CaCO_3 achieve the smallest particle sizes of $1.24\text{ }\mu\text{m}$ and $0.80\text{ }\mu\text{m}$. The particle size, relative to the coated sample and the sample treated with Ultrasound 2, decreased by an average of 30% (Table 6). S2 achieves the lowest pigment particle size values, averaging $0.8\text{ }\mu\text{m}$, while S5 reaches the highest value of $1.35\text{ }\mu\text{m}$, with an inversely proportional ratio of CaCO_3 to kaolin (40/60). In S1, the particles are smaller, at $1.24\text{ }\mu\text{m}$, but some agglomeration is still observed (Figure 5a). Compared to previous treatments, the particles in this case are more evenly distributed over the surface, and the surface itself appears visibly less rough. It is noticeable that the particles in S2 are smaller, at $0.80\text{ }\mu\text{m}$, with a few air pores, but are well distributed over the surface, with some agglomeration present in certain areas (Figure 5b). In S3, the particles are evenly distributed, with a much smaller proportion of air bubbles (Figure 5c). Some deviations are observed, with larger particles of both kaolin and CaCO_3 still present. No major agglomeration is noticeable. The particles in S4 are small and well distributed over the surface, and the result is perhaps slightly more even compared to the S3 sample (Figure 5d). The surface appears soft and uniform. In S5, where the particles are approximately the same size, at $1.35\text{ }\mu\text{m}$, slightly more accumulation is observed in certain areas than expected (Figure 5e). Otherwise, the surface appears soft and uniform. The structure of the S6 surface appears completely consistent (Figure 5f). The particles are evenly distributed over the surface, but a small number of air pores are still present.

4 CONCLUSIONS

Agglomeration directly affects coating performance in industrial production, as larger CaCO_3 clusters create rough, porous, and non-uniform layers, while smaller kaolin particles are more evenly distributed over the surface, resulting in a smoother and less porous structure. This irregular microstructure increases binder demand because the binder must compensate for gaps and uneven particle packing, reinforcing the well-known higher binder

consumption of CaCO_3 -rich formulations. The resulting surface defects also reduce print quality by causing non-uniform ink absorption, mottling, and lower gloss. Although ultrasound can partially break up agglomerates – enabling the fragmentation of agglomerates into smaller particles – it does not completely prevent reaggregation. Its industrial value lies in its potential integration into continuous dispersion lines as a pre-dispersion or in-line conditioning step. When properly controlled, ultrasonic processing can stabilise pigment size distribution, reduce reliance on chemical dispersants, and improve the consistency of high-solids coating colours, offering mills a complementary tool for enhancing process stability and coating uniformity.

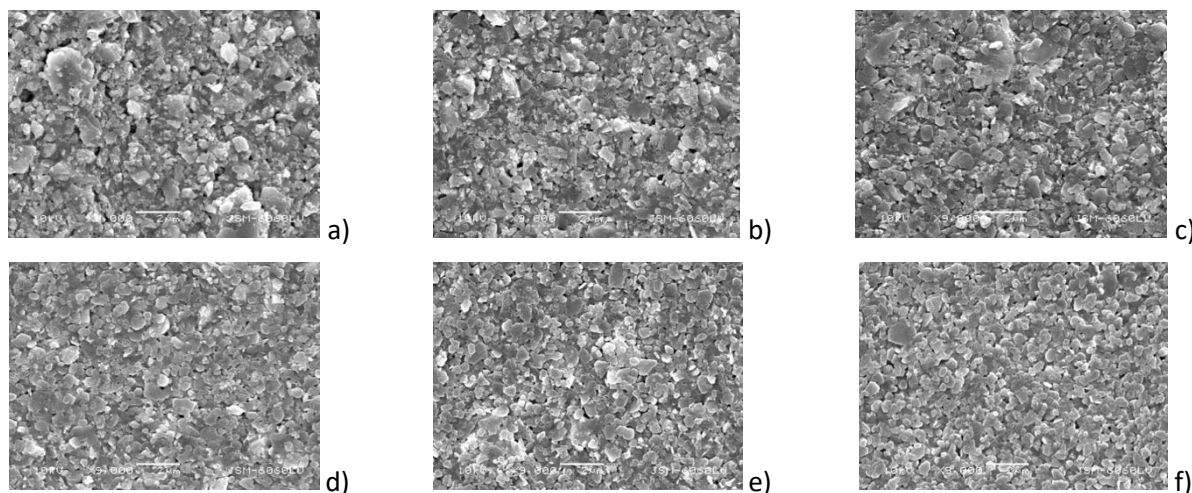


Figure 5: SEM pictures of coated paper samples after **ultrasonic treatment 2** for S1–S6 pri 9000 $\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.

Slika 5: SEM snimci uzoraka premazanog papira S1–S6 posle ultrazvučnog tretmana 2 pri uvećanju od 9000 $\times$: (a) S1, (b) S2, (c) S3, (d) S4, (e) S5, (f) S6.

References

- [1] MOŽINA, K. Viscoelastic properties of graphic papers: doctoral thesis. Ljubljana, 2017, pp. 7–22.
- [2] ČERNIČ, M. The quality of graphic papers in digital printing techniques: a review expert study. Ljubljana, 2017, pp. 4–34.
- [3] LEHTINEN, E. Introduction to pigment coating of paper. Book 11, Pigment coating and surface sizing of paper. Jyväskylä, Paper Engineers Association, 2009, pp. 12–28.
- [4] GRÖN, J. Significance of paper machine calendaring on coating coverage. Paper and Timber, 2000, Vol. 82, No. 4, pp. 245–249.
- [5] MCGGRAIN, G. and HARALA, E. Manufacturing of no. 5 lightweight coated using on-line film press coating and soft nip calendaring. V 5th Annual Technical Section meeting. Montreal, CPPA, 1997, pp. 57–61.
- [6] WANG, S., IHALAINEN, P., JÄRNSTRÖM, J. and PELTONEN, J. The effect of base paper and coating method on the surface roughness of pigment coatings. Journal of Dispersion Science and Technology, 2009, Vol. 30, No. 6, pp. 961–968.
- [7] FORSSTRÖM, U. Interactions between base paper and coating colour in metered size press coating: doctoral thesis. University of Technology, Finland, 2003.
- [8] AHLROOS, J., ALEXANDERSSON, M. and GRON, J. Influence of base-paper filler content and pre-calendaring on metered film press coating-paper and print quality. TAPPI Journal, 1999, Vol. 82, No. 5, pp. 94–100.
- [9] MURRAY, H. H. and LYONS, S. C. Correlation of paper-coating quality with degree of crystal perfection of kaolinite. Clays clay miner, 1956, Vol. 4, pp. 31–40.
- [10] GANE, P. A., KETTLE, J., MATTHEWS, G. P. and RIDGWAY, C. Void space structure of compressible polymer spheres and consolidated calcium carbonate paper-coating formulations. Industrial and engineering chemistry research, 1996, Vol. 35, No. 5, pp. 1753–1764.
- [11] ELTON, N. J. and PRESTON, J. S. Polarized light reflectometry for studies of paper coating structure. Part I. Method and instrumentation. TAPPI Journal, 2006, Vol. 5, No. 7, pp. 8–16.
- [12] ENGSTRÖM, G., MARIN, V. and BI, S. L. Analysis of porosity distribution in coating layers. TAPPI Journal, 1997, Vol. 80, No. 5, pp. 203–209.
- [13] ZADRAVEC, S. The influence of calcium carbonate particle size on the properties of injection paper: diploma thesis, Maribor, 2022, pp. 8–32.
- [14] GEYSANT, J. Calcium carbonate from the ceraceous period into the 21st century. Basel: Birkhauser Verlag, 2001.
- [15] AL OMARI, M. M. H., RASHID, I. S., QINNA, N. A., JABER, A. M. and BADWAN, A. A. Calcium carbonate. V Profiles of drug substances, excipients and related methodology, Vol. 41. Editor H. G. Brittenin, Burlington: Academic Press, 2016, pp. 4131–4132.

- [16] HAN, J. S., JUNG, S. Y., KANG, D. S. and SEO, Y. B. Development of flexible calcium carbonate for paper making filler. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, Vol. 8, No. 24, pp. 8994–9001.
- [17] MOHAMEDZADEH-SAGHAFAZ, K., RESALATI, H. and GHASEMAIN, A. Cellulose-precipitated calcium carbonate composites and their effect on paper properties, *Chemical Papers*, 2014, "Vol. 68, No. 6, pp. 774–781.
- [18] COIMBRA DE MATOS, J. M. New precipitated calcium carbonate derived structures for application in papermaking: master thesis. Coimbra, 2017.
- [19] RUTAR, V., RUTAR, R. and JUHANT-GRKMAN, J. The influence of coating pigments and smoothing on the properties of coated paper – gloss and printing gloss. *Paper*, 2011, Vol. 39, No. 5, pp. 30–33.
- [20] BLACKLEY, D. C. *Latex and paper: polymer latices*. Springer, 1997, pp. 434–473.
- [21] KUGGE, C. An AFM study of local film formation of latex in paper coatings. *Journal of pulp and paper science*, 2004, Vol. 30, No. 4, pp. 105–111.
- [22] ALINCE, B., INOUE, M. and ROBERTSON, A. A. Latex–fibre interaction and paper reinforcement. *Journal of Applied Polymer Science*, 1976, Vol. 20, No. 8, pp. 2209–2219.
- [23] HU, Z., ZEN, X., GONG, J. and DENG, Y. Water resistance improvement of paper by superhydrophobic modification with micronized CaCO_3 and fatty acid coating. *Colloids and Surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 2009, Vol. 351, No. 1, pp. 65–70.
- [24] MYERS, R. Application of adhesives. *TAPPI Journal*, 1963, Vol. 46, No. 12, pp. 745–750.
- [25] MARUYAMA, H., KAJITANI, K. and SHIRAISHI, M. Paper coating agent. United States Patent Office, US 4,617,239, 1986, 8 p.
- [26] BEHN, R., HOPPE, L. and BOHMER, B. Auxiliary for improving retention, dewatering and working up, particularly in the manufacture of paper. United States Patent Office, US4267059A, 1981, 9 p.
- [27] FALBE, J. *Surfactants in consumer products: theory, technology and application*. Editor J. Falbe. Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, pp. 275–289.
- [28] DRAVES, C. Z. and CLARKSON, R. G. A new method for the evaluation of wetting agents. *Journal Am Dye Stuff Report*, 1931, Vol. 20, pp. 201–214.
- [29] BRESKVAR K. Cracking of coatings on special graphic papers: master's thesis. Univerza v Ljubljani, 2020, pp. 3–50.
- [30] NOVAK, G. *Graphical materials*. Ljubljana: Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of textile, 2004, pp. 95–110.
- [31] FALBE, J. *Surfactants in consumer products: Theory, Technology and Application*. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012, pp. 275–289.
- [32] MOŽINA, K. and RUTAR, V. GCC modification for better quality droplet printer output. *Paper*, 2012, Vol. 8, pp. 34–37.
- [33] MANAS-ZLOCOWER, I. *Mixing and compounding of polymers. theory and practice*. 2nd edition. Munich; Cincinnati: Hanser Publishers, 2009, p. 1182.
- [34] WALTER, D. Primary particles- agglomerates-aggregates. In *Nanomaterials Weinheim: Wiley-VCH Verlag*, 2013, pp. 9–24.
- [35] GOHEL M. C., PARIKH R. K. and STAVAN A. N. *Spray drying: Pharmaceutical reviews*, 2009, Vol. 7, No. 5, p. 24.
- [36] POLLET, B. *Power ultrasound in electrochemistry*, 2012, p. 3.
- [37] Wikipedia, Ultrasound. Available on-line: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>>.
- [38] KRISTL M. and DROFENIK M. Sonochemistry – the use of ultrasound in chemical reactions. In *Chemistry in School*, 2002, pp. 24–26.
- [39] Sonochemical reaction and Synthesis. In *Hielscher ultrasound technology*. Available on-line: <https://www.hielscher.com/sonochem_01.htm>.
- [40] Ultrasonic wet-milling and micro-grinding. In *Hielscher ultrasound technology*. Available on-line: <https://www.hielscher.com/mill_01.htm>.

Authors

Corresponding author:

doc. dr. Klemen Možina

Department of Textiles, Graphic Arts and Design

Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana

Aškrčeva 12

SI-1000, Ljubljana, Slovenia

Phone: +386 1 200 23 99

E-mail: klemen.mozina@ntf.uni-lj.si

Nika Gregorka

Lek farmacevtska družba, d. d., PE Proizvodnja Mengeš

Kolodvorska cesta 27

SI-1234 Mengeš, Slovenija

OPTIMIZACIJA STRUKTURE PAPIRNE AMBALAŽE U OKVIRIMA GLOBALNIH EKO MODULIRANIH POP (PROŠIRENE ODGOVORNOSTI PROIZVOĐAČA) OKVIRA

OPTIMIZING PAPER-BASED PACKAGING STRUCTURES UNDER GLOBAL ECO-MODULATED EPR (EXTENDED PRODUCER RESPONSIBILITY) FRAMEWORKS

Igor Karlovits

Pulp and Paper Institute, Ljubljana, Slovenia

(<https://orcid.org/0000-0002-5815-8359>)

Abstract

Extended Producer Responsibility (EPR) has become the dominant policy instrument for packaging waste management in the EU and is rapidly emerging at US state level and in other parts of the world. Recent legislation – most notably the EU Waste Framework Directive, the Packaging and Packaging Waste Directive requires EPR schemes to apply eco-modulated fees that reward recyclable packaging and penalise designs that hinder circularity. Extended Producer Responsibility (EPR) policy is undergoing a structural paradigm shift from volume-based fee recovery to highly punitive, eco-modulated regulatory frameworks. For global consumer packaged goods (CPG) brands and paper conversion companies, packaging design decisions now directly impact operational margins via localized compliance tariffs. This paper provides a rigorous comparative analysis of upcoming and existing paper-packaging EPR regimes across the European Union (PPWR) and some specific cases such as Denmark, Germany and France, the United States (state-led initiatives), and the Asia-Pacific (APAC) region. The paper also models the mathematical foundations of the financial bonus-malus mechanism, provides concrete per-ton pricing matrices, and delivers an actionable engineering blueprint for minimal EPR fee structures for paper-based packaging. The simulated results show the conscious eco-modulated approach can lead to significant savings in EPR fees with bonus packaging system design choices.

Keywords: Extended Producer Responsibility, eco modulation, paper packaging

Izvod

Proširena odgovornost proizvođača (POP) postala je dominantan instrument politike za upravljanje ambalažnim otpadom u EU i brzo se pojavljuje na nivou američkih država i u drugim delovima sveta. Nedavno doneti zakoni - pre svega Okvirna direktiva EU o otpadu, Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu (PPWR) zahtevaju od POP šema da primenjuju eko-modulirane naknade koje nagrađuju ambalažu koja se može reciklirati i kažnjavaju dizajne koji ometaju kružnost materijala. Proširena odgovornost proizvođača (POP) politika prolazi kroz strukturnu promenu paradigme od povrata naknada zasnovanih na obimu i masi otpadaka na eko-modulirane regulatorne okvire sa visokim kaznama. Za globalne brendove potrošačke upakovane robe (CPG) i kompanije za preradu papira i proizvođača ambalaže, odluke o dizajnu ambalaže sada direktno utiču na operativne marže putem usklađenih lokalizovanih tarifa. Ovaj rad pruža rigoroznu komparativnu analizu postojećih i postojećih POP režima papirne ambalaže širom Evropske unije (PPWR) i nekih specifičnih slučajeva kao što su Danska, Nemačka i Francuska, Sjedinjene Države (POP inicijative na nivou pojedinačnih država) i azijsko-pacifički (APAC) region. U radu se takođe modelira matematičke osnove mehanizma finansijskog bonus-malus sistema, obezbeđuje konkretne matrice cena po toni i pruža delotvorno osnovu za izračunavanje minimalne strukture POP naknada za papirnu ambalažu. Simulirani rezultati pokazuju da svesni eko-modulirani pristup može dovesti do značajnih ušteda u POP naknadama sa izborom dizajna sistema za pakovanje bonusa.

Ključne reči: Proširena odgovornost proizvođača, eko-moduliranje, papirna ambalaža

1. INTRODUCTION (UVOD)

Extended Producer Responsibility (EPR) is a policy mechanism that shifts the financial and organisational responsibility for end-of-life management of packaging from municipalities to producers. Its purpose is to incentivise waste prevention, improve recyclability, and support the transition to a circular economy. EPR is now a mandatory requirement under EU law (, and by 2030 all packaging placed on the EU market must be recyclable, with recyclability at scale required by 2035. Recent legislative developments—including the Waste Framework Directive (2008/98/EC,

amended 2018/851), the Packaging and Packaging Waste Directive (94/62/EC), and the forthcoming Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR)— have strengthened producer obligations and introduced mandatory eco-modulation of fees. For decades, Extended Producer Responsibility (EPR) fees functioned as a predictable, linear cost of doing business, typically derived by multiplying the total gross weight of packaging waste (including paper board) put on a given market by a static national or regional flat rate. However, under pressure from climate compliance targets, global environmental bodies and legislative authorities have recognized that weight-based fees alone fail to stimulate upstream eco-design modifications. This realization has triggered the broad international adoption of eco-modulation. Eco-modulation transforms compliance from an administrative accounting exercise into a central variable of packaging engineering. Under an eco-modulated system, baseline packaging fees are modified dynamically via financial rewards (bonuses) or regulatory penalties (maluses) based on structural attributes: material homogeneity, repulpability, polymer barrier threshold percentages, chemical cross-linking of adhesives, and optical sortability. Eco-modulation is the differentiation of EPR fees according to the environmental performance of packaging, typically via giving bonuses for [1-5]:

- High recyclability
 - Reuse systems
 - Weight reduction
 - Consumer information
- and charging maluses for:

- Non-recyclable or hard-to-recycle formats
- Disruptive components (e.g., plastic windows, heavy coatings)
- Excessive material use

In premium markets, these adjustments can alter the net compliance liability per Stock Keeping Unit (SKU) by plus or minus 40% to +100% (France) while bonuses for reuse can effectively exempt packaging from fees. This is effectively deciding the commercial viability of specific packaging architectures. In the EU the concept originates in Article 8a of the EU Waste Framework Directive (2018/851), its operationalisation varies significantly across Member States. The newly amended Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) aims to harmonise these approaches by introducing EU-wide recyclability performance grades and mandatory fee modulation criteria. The PPWR tries to introduce harmonised EU-wide rules. Key provisions include:

- All packaging must be recyclable by 2030.
- Recyclability at scale required by 2035.
- Mandatory eco-modulation of EPR fees based on recyclability performance.
- Delegated Acts by 2028 defining the methodology for financial contributions.
- Producers Register and harmonise labelling requirements

Many member states already have long running EPR schemes which are more or less adjusted to the provisions outlined in the PPWR. In Table 1. We present a current overview of some European countries and their current compatibility with the future EPR requirements (especially eco modulation).

Table 1: Specific EU countries EPR scheme requirements compared to PPWR compliance
Tabela 1. Zahtevi EPR šema u pojedinim zemljama EU u poređenju sa zahtevima za usklađenost sa PPWR uredbom.

Country	EPR Authority / System	Eco-Modulation Mechanism	Key Features	Alignment With PPWR
France	CITEO (main PRO)	Highly developed bonus–malus system	• Material-specific base fees (paper ≈ €65/t) • Bonuses for eco-design, sorting instructions, recycled content, reuse • Maluses for disruptive components (PVC, carbon black, composites) • Strong design-for-recycling rules	Very high alignment • Already uses recyclability tiers • Strongest eco-modulation in EU • Minimal changes needed for PPWR

Country	EPR Authority / System	Eco-Modulation Mechanism	Key Features	Alignment With PPWR
Italy	CONAI	Contribution diversification by recyclability tier	• Three recyclability levels for paper (A/B/C) • Fees reflect sorting complexity and fibre yield • Composite packaging placed in highest tier • Strong link to material value	High alignment • Tiered recyclability fits PPWR's A–E grades • Needs harmonisation of definitions and reporting
Germany	Competitive PRO system (e.g., DSD, Interseroh)	Market-driven modulation; PRO-specific fees	• Fees vary by PRO • Bonuses for mono-material packaging • Penalties for composites and contamination • Less centralised than France/Italy	Medium alignment • Must harmonise recyclability criteria • Must adopt EU-wide performance grades • Significant structural adjustment expected
Denmark	National EPR system (transitioning from product fee)	Differentiation between generic and non-generic paper	• Generic paper = standard recyclable formats • Non-generic = coated, laminated, windowed • Composite paper in high-fee category • Strong focus on material purity	High alignment • Clear recyclability differentiation • Strong design-for-recycling emphasis • Needs adoption of PPWR's harmonised grades
United Kingdom	UK EPR for Packaging (post-Brexit)	Modulated fees based on recyclability and design	• Mandatory modulated fees from 2025 • Recyclability-by-design criteria • Penalties for composite and hard-to-sort packaging • Independent from EU but conceptually similar	Parallel alignment (non-EU) • Similar principles to PPWR • Uses its own recyclability definitions • Not bound by EU performance grades

As we can see from Table 1. France remains the most advanced example, with a long-established bonus–malus system and detailed recyclability criteria that already reflect PPWR requirements. Italy's tiered CONAI contribution structure also aligns closely with the PPWR's recyclability-grade logic, though national definitions will require harmonisation. In contrast, Germany's competitive PRO landscape results in heterogeneous fee structures and less centralised eco-modulation. As a result, Germany faces the largest adjustment under the PPWR, which mandates uniform recyclability criteria and harmonised modulation factors. Denmark's clear distinction between generic and non-generic paper packaging fits well with the PPWR's emphasis on recyclability at scale, requiring mainly technical alignment with EU-wide performance grades. Although outside the EU, the United Kingdom applies modulated fees based on recyclability and design-for-recycling principles that parallel the PPWR's intent. However, the UK will maintain its own definitions and will not adopt the PPWR's harmonised grading system. In the USA and other countries in the Asia and Pacific region the specifics also hamper some form of immediate harmonization especially for companies aiming to place products on several markets in different countries and continents. In the United States the fractured State-Led EPR wave, unlike the centralized approach of the European Union, relies on state-level legislation, creating a fragmented compliance environment. The primary vehicle driving US implementation is the Circular Action Alliance (CAA), which has been selected as the single Producer Responsibility Organization (PRO) in states like California (SB 54) and Colorado (HB 22-1355), while also managing compliance in Oregon and Maine. The mathematical approach in the US emphasizes source reduction alongside recyclability. For example, California's SB 54 requires a mandatory 25% reduction in single-use plastic packaging by weight and component count by 2032. This has led to a massive shift toward paper. However, if a brand replaces a plastic blister pack with a paperboard alternative that utilizes a poorly formulated plastic laminate coating, the CAA's eco-modulated fee structure applies a severe surcharge based on the difficulty of separating that plastic layer in standard hydropulpers. The Asia and Pacific region (APAC) region presents a highly divergent compliance landscape. In Australia, the Australian Packaging

Covenant Organisation (APCO) operates a co-regulatory framework. While historical targets were voluntary, upcoming revisions introduce mandatory eco-modulated fee structures tied directly to the Packaging Recyclability Evaluation Portal (PREP) tool, penalizing fiber products that do not pulp within a standard 10-minute cycle. In India, the Plastic Waste Management (PWM) Rules and parallel upcoming omnibus packaging guidelines implemented via the Central Pollution Control Board (CPCB) focus heavily on a rigid registration portal. The fee mechanism operates primarily as a mandatory credit purchase system (similar to Plastic Credit trading). For multi-layered paperboard composites (such as aseptic food packaging), producers must purchase high-cost recovery offsets unless they can prove a closed-loop collection mechanism that feeds industrial board mills directly [1-5].

2. ECO MODULATION STRATEGIES FOR PAPER PACKAGING

Paper based packaging has some strengths including: high collection and recycling rates in many EU countries, established fibre-recycling infrastructure and markets and overall generally lower EPR fees than plastics or composites. While this is based on a classic corrugated and cardboard packaging waste streams and products the “paperization” trend of trying to replace as much plastic packaging with fiber alternatives also opens up a lot of vulnerabilities where eco-modulation exposes several weaknesses if companies make the wrong packaging engineering decisions. These include composite structures, coatings (including PE, wax, metalization) can downgrade recyclability and windows, labels and adhesives can trigger maluses. Also food contaminations can reduce fibre yield and quality.

EPR fees typically reflect the following categories : Material type (paper, plastic, metal, glass), Weight (€/tonne). Recyclability performance and Contamination or composite complexity. So Why Does EPR Matters for Paper Packaging? Paper is generally recyclable, but as mentioned earlier:

- Additives (barriers, coatings, laminates) can reduce recyclability.
- Composite packaging may fall into “hard-to-recycle” categories.

Eco-modulation can penalise poor design choices. The primary cost determinant in fiber EPR is whether the structural substrate is classified as "Pure Paper" (low fee) or a "Composite Material" (high fee/surcharge). To systematically achieve the lowest possible EPR fee tier globally (e.g., Grade A in the EU, maximum bonus in Denmark, and baseline zero-penalty with the CAA in the United States), packaging conversion must adhere to a strict set of material engineering parameters. The main strategic shifts in the eco design of paper based packaging must include several eco-modulation compliance risks regarding bonus malus system [2-5] :

- **Maximize Mono-Materiality:** The single most effective path to minimal fees is ensuring that raw fiber constitutes 95% or more of the packaging element's total mass. Under CEPI (Confederation of European Paper Industries) and industry metrics, maintaining fiber content above 95% allows the pack to be classified as pure paperboard, eliminating plastic-tax cross-contamination metrics.
- **Transition to Aqueous Dispersion Coatings:** Traditional polyethylene (PE) and polyethylene terephthalate (PET) extrusion lamination layers create a continuous plastic film that clogs mill extraction screens. Packaging engineers should switch to water-based functional dispersion coatings (e.g., acrylic or biopolymer blends) that break down entirely during hydropulping, leaving zero microplastic residues in the mill effluent.
- **Specify Cold-Water Soluble Adhesives:** Adhesives must be carefully audited. Traditional hot-melt glues with low shear-thinning resistance form soft polymers known as "stickies" under heat, which adhere to paper machine wire meshes and cause web breaks. Utilizing alkali-soluble or highly dispersible emulsion polymers ensures the adhesives dissolve into the process water and wash clean during fiber screening.
- **Eliminate Heavy Metal and Carbon Black Inks:** Standard carbon black pigments absorb near-infrared (NIR) spectra, rendering automated optical sorting systems at material recovery facilities (MRFs) blind to the underlying fiber carrier board. Moving to vegetable- or soy-based inks that reflect NIR waves ensures the packaging is routed correctly into premium paper sorting streams.

To connect these strategies to specific EU EPR regulations we can look into Table 2. overview.

Table 2. Matrix of European Cellulose EPR Variances**Tabela 2. Matrica razlika u EPR zahtevima za celulozne materijale u Evropi.**

Metric / Requirement	Denmark Framework (2026)	Germany (VerpackG / ZSVR)	France (Citeo / AGECE)
Primary Regulatory Body	VMP / Danish Producer Responsibility (DPA)	Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR)	Citeo / French Ministry of Environment
Minimum Fiber Mass Threshold	>85% to avoid multi-layered composite classification	≥95% required to be classified as pure paper (PPK)	>50% to be processed as paper, but steep penalties apply below 95%
Treatment of Inks/Varnishes	General malus if optical sortability (NIR) is blocked	Excluded from premium fractions if carbon-black blocks sorting	Mandatory up to 50% penalty for mineral oils (MOSH/MOAH)
Treatment of Adhesives	General eco-modulation based on mill pulping duration	Must dissolve cleanly under the annual Mindeststandard guidelines	Specific 50% penalty for hot-melts that form micro-stickies
Reporting Responsibility Split	Generic Packaging: Upstream Producer/Converter Non-Generic: Downstream Brand Owner	Always Downstream: The brand owner who fills the commercial packaging first	Always Downstream: The brand owner who places the finished goods on the market

This fragmented structure confirms that mono-materiality (95%+ fiber content), water-soluble adhesives, and mineral-oil-free vegetable inks are the only engineering choices that consistently secure the lowest possible EPR tariff across all European jurisdictions simultaneously. Compared to EU in USA uses :

- State-specific recyclability lists
- PRO-developed fee schedules
- Material acceptance lists
- Recyclability assessments (Oregon)
- Penalties for hard-to-recycle formats (California)

Thus, the U.S. approach is less harmonised but conceptually similar to EU eco-modulation.

3. EPR MODELING

As EPR calculation and reporting is very fragmented and country specific state beside using the overall strategies for paper packaging already presented we can build a generic EPR fee model for paper-based packaging:

$$\text{Fee} = W \times F_{\text{base}} \times M_{\text{recycl}} \times M_{\text{LCA}} \times M_{\text{design}} \quad (1)$$

Where:

- W = annual placed weight (tonnes).
- F_{base} = base fee for the material category (€/tonne).
- M_{recycl} = recyclability modulation factor (0.7–2.0).
- M_{LCA} = LCA-based factor (0.8–1.5).
- M_{design} = design-specific factor (e.g., windows, coatings; 0.9–2.0).

Model limitation: The fee-modulation model used in this work is a simplified analytical representation of how EPR schemes apply eco-modulated fees in practice. It reflects the requirements of EU legislation (e.g. Art. 8a WFD, PPWR) and the structure of national PRO fee systems (e.g. France CITEO, Denmark's generic/non-generic paper differentiation, and emerging US state EPR schemes), but it is not an official legal formula. The numerical factors (e.g. recyclability multipliers, LCA multipliers, design factors) are constructed for scenario analysis and are calibrated to be realistic rather than to reproduce any single country's tariff table exactly. As in many USA states there are discussions and plan to integrate eco-modulation based on recyclability and, increasingly, LCA (Life Cycle Analysis) indicators (GHG, energy, water) are also included into this model. For recyclability we define a simple 0–100 recyclability score: 80–100: High recyclability (mono-material, widely collected and recycled). 50–79: Medium recyclability (minor disruptive components). 0–49: Low recyclability (composites, non-separable layers). We map

this to Mrecycl: High: Mrecycl=0.85; Medium: Mrecycl=1.00; Low: Mrecycl=1.50 As a second factor we define an LCA index combining normalised scores for: GHG emissions, Energy demand, Water use. Let the composite LCA index be ILCA (0–1). Then: $MLCA = 0.8 + 0.7 \times ILCA$ Best-in-class (low impacts): $ILCA \approx 0.2 \Rightarrow MLCA \approx 0.94$. Worst-in-class: $ILCA \approx 1.0 \Rightarrow MLCA = 1.5$. At the end we capture specific design features? No disruptive components: Mdesign=1.0; Plastic window: Mdesign=1.2.; Heavy plastic coating or laminate: Mdesign=1.5.

4. CASE STUDY MODELLING

We consider three representative paper-based packaging designs (Table 3.)

Table 3. Case study modelling of EPR fees with generalized formula

Tabela 3. Modeliranje EPR naknada u okviru studije slučaja primenom generalizovane formule.

Design and designation	Design A – Corrugated shipping box	Design B – Folding carton with plastic window	Design C – Paper-plastic composite pouch
Material structure	Mono-material corrugated board. No coatings, no windows. Recyclability score: 90 (high)	Folding boxboard + small PET window. Recyclability score: 70 (medium).	70% paper, 30% plastic laminate. Recyclability score: 40 (low).
Units/year	2,000,000	5,000,000	8,000,000
Weight per unit	0.15 kg	0.08 kg	0.05 kg
Annual weight (t)	300	400	400

For the modelling we have used the following parameters: Fbase=€65/t (generic paper, France CITEO aligned). High-recyclability paper benchmark: €55/tonne (used via modulation). So we assign:

- Design A: Recyclability: high $\rightarrow$ Mrecycl=0.85. ?LCA index: 0.3 $\rightarrow$ $MLCA = 0.8 + 0.7 \times 0.3 = 1.01$. Design factor: 1.0.
- Design B: Recyclability: medium $\rightarrow$ Mrecycl=1.00. LCA index: 0.5 $\rightarrow$ $MLCA = 1.15$. Design factor (window): 1.2.
- Design C: Recyclability: low $\rightarrow$ Mrecycl=1.50. LCA index: 0.8 $\rightarrow$ $MLCA = 1.36$. Design factor (laminate): 1.5.

For the first scenario we use the EU generic model (fees France-aligned CITEO) where the effective fee per tonne for the specific paper based design would be:

- Design A: $FA = 65 \times 0.85 \times 1.01 \times 1.0 \approx €55.8/t$ which yields the annual EPR cost of $300 \times 55.8 \approx €16,740$
- Design B: $FB = 65 \times 1.00 \times 1.15 \times 1.2 \approx €89.7/t$ which yields the annual EPR cost of $400 \times 89.7 \approx €35,880$
- Design C: $FC = 65 \times 1.50 \times 1.36 \times 1.5 \approx €198.9/t$ which yields the annual EPR cost of $400 \times 198.9 \approx €79,560$

For the second scenario we can use an USA state based system (e.g., Oregon/Colorado/California) which is also LCA weighted with the following parameters: Base fee for paper: €65/tonne (for comparability). Recyclability factors as before. LCA factor more influential: $MLCA_{US} = 0.7 + 1.0 \times ILCA$ So:

- Design A: $ILCA = 0.3 \Rightarrow MLCA_{US} = 1.0$.
- Design B: $ILCA = 0.5 \Rightarrow MLCA_{US} = 1.2$.
- Design C: $ILCA = 0.8 \Rightarrow MLCA_{US} = 1.5$.

If we use these parameters the effective fee per tonne would be:

- Design A: $FA_{US} = 65 \times 0.85 \times 1.0 \times 1.0 = €55.25/t$ which yields the annual EPR cost of $300 \times 55.25 \approx €16,575$
- Design B: $FB_{US} = 65 \times 1.00 \times 1.2 \times 1.2 = €93.6/t$ which yields the annual EPR cost of $400 \times 93.6 \approx €37,440$
- Design C: $FC_{US} = 65 \times 1.50 \times 1.5 \times 1.5 = €219.4/t$ which yields the annual EPR cost of $400 \times 219.4 \approx €87,760$

If we compare the annual cost for the simulated EPR fees for the three designs we can see that the material composition as well additional LCA factoring can significantly increase the yearly EPR fees both in EU and USA.

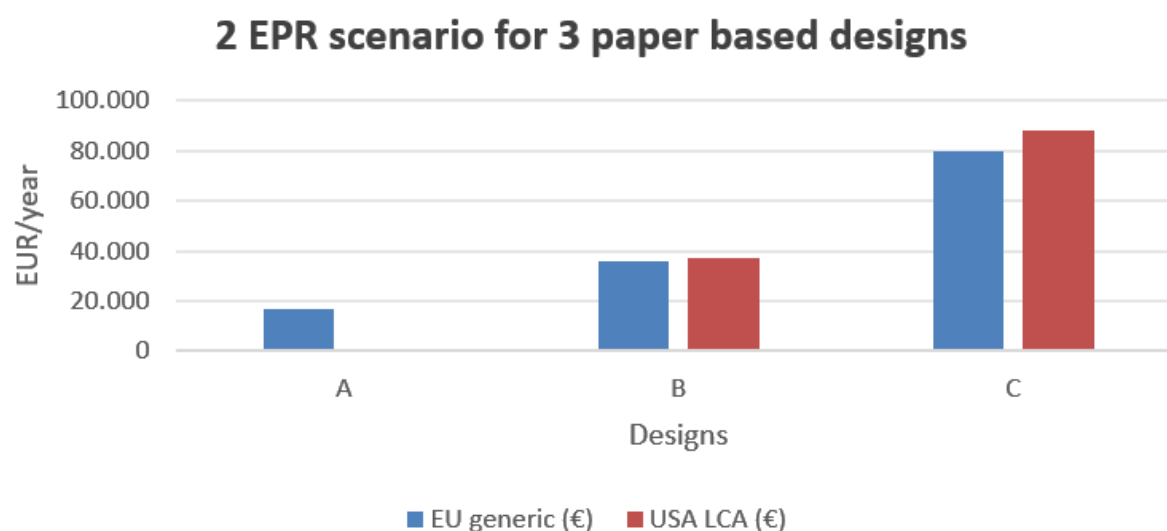


Figure 1: General EPR modelling with 3 paper based designs

Slika 1. Opšti model EPR sistema za tri dizajna ambalaže na bazi papira.

5. CONCLUSION

EPR and eco-modulation are transforming paper-based packaging from a “safe” material category into a highly differentiated cost landscape. Even within paper, design choices—windows, coatings, laminates—can multiply EPR costs by factors of 3–8 across different jurisdictions. Denmark’s generic vs non-generic differentiation, France’s mature eco-modulation, and emerging US state-level LCA-weighted schemes all point in the same direction: recyclability at scale and low life-cycle impacts are becoming non-negotiable design criteria. For producers, the implication is clear: paper packaging optimisation is no longer just about material efficiency; it is about regulatory-aligned eco-design, cross-jurisdictional fee minimisation, and data-driven scenario modelling. Those who embed these principles into their packaging strategy will not only reduce EPR costs but also position themselves as credible actors in the transition to a circular economy.

References

- [1] Ahlers, J., Hemkhaus, M., Hibler, S., & Hannak, J. (2021). Analysis of Extended Producer Responsibility Schemes. Adelphi Consult GmbH.
- [2] Karlovits I., (2025) Extended producer responsibility for packaging– industry perspective from a global company, Proceedings of the 4th International Conference on Circular Packaging, Ljubljana Slovenia, doi: 10.5281/zenodo.17295166
- [3] European Union (2024) Regulation (EU) 2024/3857 of the European Parliament and of the Council on Packaging and Packaging Waste (PPWR), amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC. Brussels: Official Journal of the European Union.
- [4] Germany (2019) Verpackungsgesetz (VerpackG): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- [5] France (2020) Code de l’environnement – Article L541-10 and L541-10-1, as amended by Loi n° 2020-105 relative à la lutte contre le gaspillage et à l’économie circulaire (AGEC). Paris: République Française.
- [6] Colorado Department of Public Health and Environment (2023) Producer Responsibility Program for Packaging and Paper Products. Denver: CDPHE.

Corresponding author:

Igor Karlovits

Pulp and Paper Institute, Bogišičeva 8, 1000 Ljubljana

igor.karlovits@icp-lj.si

DIZAJN ZA RECIKLAŽU I PPWR: HARMONIZACIJA STANDARDA I INDUSTRIJSKE PRAKSE

DESIGN FOR RECYCLING AND PPWR: HARMONISATION OF STANDARDS AND INDUSTRIAL PRACTICE

Tanja Radusin

Norner Research AS, Porsgrunn, Norway

(<https://orcid.org/0000-0001-6404-7922>)

Abstract

The transition towards a circular plastics economy in the European Union is being significantly accelerated by the proposed Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR), which introduces binding requirements for recyclability, recycled content, and waste reduction. In this context, design for recycling (DfR) has evolved from a voluntary industrial guideline into a core compliance criterion, directly influencing market access and competitiveness. The present work addresses the role of DfR as a harmonised technical foundation supporting the implementation of PPWR across the European market.

Currently, industrial practices are largely guided by non-binding methodologies such as RecyClass Design for Recycling Guidelines and associated testing protocols. However, fragmentation across national systems and certification schemes remains a barrier to a fully integrated EU market. Harmonisation, in the context of PPWR, therefore refers to the alignment of technical criteria, testing methods, and recyclability assessment frameworks to ensure consistent interpretation across Member States.

To address this need, the European Committee for Standardization (CEN) has developed the EN 18120 series of standards, providing a science-based framework for assessing the recyclability of plastic packaging. The development of this series involved collaboration among industry, research organisations, and regulatory bodies. These standards define testing procedures, evaluation criteria, and classification approaches to enable harmonised and reproducible assessments.

The main purpose of the EN 18120 series is to support regulatory implementation by providing standardised methods to demonstrate compliance with PPWR recyclability requirements. This harmonised approach is essential for ensuring fair competition, accelerating innovation, and enabling informed investment decisions across the packaging value chain.

Keywords: Design for recycling, PPWR, EN 18120, recyclability assessment, harmonisation, circular economy, plastic packaging

Izvod

Tranzicija ka cirkularnoj ekonomiji plastike u Evropskoj uniji značajno je ubrzana predloženom Uredbom o ambalaži i ambalažnom otpadu (PPWR), koja uvodi obavezujuće zahteve u pogledu reciklažabilnosti i smanjenja otpada. U tom kontekstu, dizajn za reciklažu (DfR) postaje ključni kriterijum usklađenosti koji direktno utiče na pristup tržištu i konkurentnost.

Trenutna industrijska praksa zasniva se na smernicama kao što su RecyClass, ali fragmentacija između nacionalnih sistema i šema sertifikacije predstavlja prepreku jedinstvenom tržištu. Harmonizacija u okviru PPWR-a podrazumeva usklađivanje tehničkih kriterijuma, metoda ispitivanja i okvira za ocenu reciklažabilnosti.

Evropski komitet za standardizaciju (CEN) razvio je seriju standarda EN 18120, koja predstavlja naučno utemeljen okvir za procenu reciklažabilnosti plastične ambalaže. Ovi standardi definišu metode ispitivanja i kriterijume evaluacije radi uspostavljanja harmonizovane metodologije.

Osnovna svrha serije EN 18120 je podrška implementaciji regulative kroz standardizovane metode dokazivanja usklađenosti sa zahtevima PPWR-a.

Ključne reči: dizajn za reciklažu, PPWR, EN 18120, reciklažabilnost, harmonizacija, cirkularna ekonomija, plastična ambalaža

Corresponding author:

Tanja Radusin

Norner Research AS, Dokkvegen 20, NO-3920 PORSGUNN, Norway

tanja.radusin@norner.no

KARTON U ARHITEKTONSKOJ EDUKACIJI I PROJEKTOVANJU: OD EKSPERIMENTA DO ODRŽIVE PRAKSE

CARDBOARD IN ARCHITECTURAL EDUCATION AND DESIGN: FROM EXPERIMENTATION TO SUSTAINABLE PRACTICE

Verica Krstić

University of Belgrade – Faculty of Architecture, Belgrade, Serbia

(<https://orcid.org/0000-0002-9862-8351>)

Abstract

Contemporary design concepts in architecture are increasingly shaped by transdisciplinary approaches that connect spatial, technological, ecological, and industrial systems. In this context, cardboard and paper-based materials, although rarely recognized as primary architectural resources, possess significant potential for experimental, educational, and sustainable applications. This paper explores the possibilities of using cardboard as a design medium through temporary structures, interior systems, prototyping processes, and pedagogical practices. Particular emphasis is placed on its recyclability, environmental impact, adaptability, and capacity to stimulate innovative thinking in architectural education and professional practice. Experimental work within educational environments can broaden the field's application and deepen understanding of the material's structural, spatial, and performative properties, thereby encouraging its future implementation in professional practice. The research positions cardboard as a relevant material within circular and sustainable design approaches.

Keywords: cardboard, architectural design, architectural education, sustainable materials, circular economy

Izvod

Savremeni projektantski koncepti u polju arhitekture sve više se konstituišu u okviru transdisciplinarnih pristupa koji povezuju prostorne, tehnološke, ekološke i industrijske sisteme. U tom kontekstu, karton i materijali na bazi papira, iako se retko prepoznaju kao primarni arhitektonski resursi, poseduju značajan potencijal za eksperimentalnu, obrazovnu i održivu primenu. Ovaj rad istražuje mogućnosti primene kartona kao projektantskog medija kroz privremene strukture, enterijerske sisteme, procese prototipizacije i pedagoške prakse. Posebna pažnja usmerena je na njegovu mogućnost reciklaže, ekološki uticaj, prilagodljivost i kapacitet da podstakne inovativno mišljenje u arhitektonskoj edukaciji i profesionalnoj praksi. Eksperimenti u obrazovnom okruženju mogu proširiti polje njegove primene i omogućiti dublje razumevanje strukturnih, prostornih i performativnih svojstava materijala, čime se podstiče i buduća primena u profesionalnoj praksi. Istraživanje pozicionira karton kao relevantan materijal u okviru cirkularnih i održivih pristupa projektovanju.

Cljučne reči: karton, arhitektonsko projektovanje, arhitektonska edukacija, održivi materijali, cirkularna ekonomija

Corresponding author:

Dr Verica Krstic, Associate Professor

Department of Architecture

University of Belgrade - Faculty of Architecture

Bulevar kralja Aleksandra 73/II, 11120 Belgrade

+38164-175-70-75

verica.krstic@arh.bg.ac.rs

LEAD OR BE LED: INNOVATION STRATEGY IN THE AGE OF AI

PREDVODITI ILI BITI VOĐEN: STRATEGIJA INOVACIJA U ERI VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

Gjoko Muratovski

Australian Institute of Advanced Technologies, Melbourne, Australia

Abstract

The most innovative organizations in the world have one thing in common: design is not a service they consume, but a strategy they lead with. Today, artificial intelligence is further increasing the importance of this approach. In this keynote lecture, Prof. Dr. Gjoko Muratovski argues that as generative systems increasingly take over operational and execution tasks, designers are being liberated to focus on what human creativity does best – asking better questions, challenging assumptions, and making decisions that shape culture, products, and user experiences.

The author highlights the importance of design-led innovation in the age of artificial intelligence and demonstrates that the integration of AI tools into design practice is not a threat to creative leadership but rather a catalyst for its further development. Freed from routine production activities, designers can move toward research, systems thinking, and strategic planning. In this context, artificial intelligence becomes the engine of innovation, while design thinking provides the roadmap.

Drawing on his research and international experience, Prof. Muratovski outlines the priorities organizations must embrace to remain competitive: building AI-literate creative cultures, positioning design as a core strategic function, and developing leadership capabilities capable of anticipating and managing change before disruption occurs.

Keywords: artificial intelligence, design thinking, innovation, strategic management, creative leadership, digital transformation

Izvod

Najinovativnije organizacije na svetu imaju jednu zajedničku karakteristiku: dizajn nije usluga koju koriste, već strategija kojom upravljaju. Danas veštačka inteligencija dodatno povećava značaj ovakvog pristupa. U ovom predavanju prof. dr Gjoko Muratovski ističe da, kako generativni sistemi sve više preuzimaju operativne i izvršne zadatke, dizajneri dobijaju priliku da se usmere na ono što ljudska kreativnost jedinstveno omogućava – postavljanje boljih pitanja, preispitivanje ustaljenih pretpostavki i donošenje odluka koje oblikuju kulturu, proizvode i korisnička iskustva.

Autor ukazuje na značaj inovacija vođenih dizajnom u eri veštačke inteligencije i pokazuje da integracija AI alata u dizajnersku praksu ne predstavlja pretnju kreativnom liderstvu, već stvara uslove za njegov dalji razvoj. Oslobođeni rutinskih proizvodnih procesa, dizajneri mogu da se usmere ka istraživanju, sistemskom razmišljanju i strateškom planiranju. U tom kontekstu, veštačka inteligencija postaje pokretač procesa, dok dizajnersko razmišljanje predstavlja mapu za njegovo usmeravanje.

Na osnovu sopstvenih istraživanja i međunarodnog iskustva, prof. Muratovski predstavlja prioritete koje organizacije moraju da razvijaju kako bi ostale konkurentne: izgradnju kreativnih kultura koje razumeju i koriste veštačku inteligenciju, pozicioniranje dizajna kao ključne strateške funkcije i razvoj liderstva sposobnog da prepozna i upravlja promenama pre nego što one nastupe.

Ključne reči: veštačka inteligencija, dizajnersko razmišljanje, inovacije, strateški menadžment, kreativno liderstvo, digitalna transformacija

Corresponding author:

Distinguished Prof. Dr. Gjoko Muratovski
Australian Institute of Advanced Technologies,
Melbourne, Australia
gokom@yahoo.com

SISTEM ZA AKVIZICIJU I ANALIZU PODATAKA IZ PROIZVODNIH PROCESA SA VELIKOM UČESTANOŠĆU ODABIRANJA

SYSTEM FOR HIGH-FREQUENCY DATA ACQUISITION AND ANALYSIS IN PRODUCTION PROCESSES

Milan Bebić^{1a}, Neša Rašić^{2b}, Aleksandra Grujić^{2c}

¹ETF Beograd; ²VIŠER Beograd, Srbija

^a(<https://orcid.org/0000-0003-2694-6980>)

^b(<https://orcid.org/0009-0000-8160-7653>)

^c(<https://orcid.org/0000-0002-8372-2468>)

Izvod

Nadzor industrijskih proizvodnih procesa, pored direktnog vizuelnog nadzora, sve više se bazira na računarskim sistemima za akviziciju (prikupljanje i snimanje) podataka. Uobičajeno se za potrebe nadzora i upravljanja postavljaju SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sistemi. Iako se komunikacija SCADA sistema i PLC kontrolera ostvaruje primenom brze komunikacije bazirane na Ethernet protokolu, uobičajeno je da odabiranje podataka bude ne kraće od 500 ms, odnosno sa učestanošću od samo 2 Hz [1]. Softver za praćenje procesa, vizuelni prikaz i prikaz trendova sa arhiviranjem podataka se može instalirati na standardnom PC računaru, ali je potrebna licenca za softver, što podiže cenu.

Kod brzih procesa, sa brzo-promenljivim veličinama kakvi se mogu naći u papirnoj, metalnoj, i tekstilnoj industriji, (sa linijskom obradom materijala) mogu se primenjivati specijalizovani sistemi [2] koji nude učestanosti odabiranja od 100 – 1000Hz. Ovi sistemi zahtevaju specijalizovan hardver za povezivanje sa kontrolerom, licenciran softver i radnu stanicu sa PC računarom visokih performansi. Cena takvog sistema za praćenje proizvodnog procesa, često prevazilazi cenu upravljačkog sistema, zbog čega je broj instalacija takvih sistema u odnosu na SCADA sisteme značajno manji.

Autori ovog rada razvili su sopstveni sistem za praćenje proizvodnih procesa koji omogućava brzu akviziciju i snimanje (arhiviranje) podataka koji je baziran na dostupnom hardveru, i standardnom PC računaru, sa učestanošću odabiranja podataka od oko 100Hz, čime se spajaju dobre osobine sistema za akviziciju, uz nižu cenu. Razvijeni sistem omogućava snimanje podataka iz upravljačkog sistema bilo kog proizvodnog procesa sa PLC kontrolerom. Sve što je potrebno dodati od hardvera u upravljački sistem proizvodnog procesa je konvertor protokola, i deo koda koji obrađuje slanje podataka. Podržani su praktično svi poznati industrijski protokoli, od osnovnih do onih sa visokim komunikacionim performansama kao što su PROFIBUS i PROFINET.

Sa druge strane na PC računaru se preko Modbus TCP/IP protokola prikupljaju i snimaju podaci. Analiza podataka se može vršiti odmah nakon prikupljanja podataka, ili kasnije sa snimljenim podacima. Sistem je otvoren za izmene, čime je ostvareno da nema ograničenja u vidu unapred planiranih i programiranih analiza, tako da se može implementirati svaka analiza koju korisnik smatra potrebnom [3].

U radu će biti prikazana osnovna hardverska struktura sistema, struktura softverskog koda kojom se ilustruju mogućnosti i ostvareni rezultati. Sistem je testiran u praksi, u Laboratoriji za Elektromotorne pogone Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Laboratoriji za električne mašine i pretvarače u Odseku Visoka škola elektrotehnike i računarstva, ATUSS, kao i na postrojenju poprečnog rezača u Fabriki kartona Umka.

Abstract

Monitoring of industrial production processes, in addition to direct visual supervision, is increasingly based on computer-based systems for data acquisition, i.e. data collection and recording. For monitoring and control purposes, SCADA systems, or Supervisory Control and Data Acquisition systems, are commonly implemented. Although communication between SCADA systems and PLC controllers is achieved using high-speed communication based on the Ethernet protocol, data sampling is typically performed at intervals not shorter than 500 ms, corresponding to a frequency of only 2 Hz [1]. Process monitoring, visualization, trend display and data archiving software can be installed on a standard PC, but a software licence is required, which increases the overall cost.

In fast processes involving rapidly changing variables, such as those found in the paper, metal and textile industries, particularly in continuous material-processing lines, specialized systems [2] can be used, offering sampling frequencies of 100–1000 Hz. These systems require specialized hardware for connection to the controller, licensed software and a high-performance PC workstation. The cost of such a production-process monitoring system often exceeds the cost of the control system itself, which is why the number of installations of such systems is significantly lower compared with SCADA systems.

The authors of this paper have developed their own production-process monitoring system that enables rapid data acquisition and recording, i.e. archiving, based on readily available hardware and a standard PC, with a data sampling frequency of approximately 100 Hz. In this way, the advantages of data acquisition systems are combined with lower cost. The developed system enables data to be recorded from the control system of any production process equipped with a PLC controller. The only additional hardware required in the production-process control system is a protocol converter, together with a section of code responsible for processing and sending the data. Virtually all known industrial protocols are supported, from basic protocols to those with high communication performance, such as PROFIBUS and PROFINET.

On the PC side, data are collected and recorded via the Modbus TCP/IP protocol. Data analysis can be performed immediately after acquisition or subsequently using the recorded data. The system is open to modification, which eliminates limitations related to predefined and preprogrammed analyses, allowing any analysis considered necessary by the user to be implemented [3].

The paper presents the basic hardware structure of the system, the structure of the software code illustrating its capabilities, and the results achieved. The system was tested in practice in the Laboratory for Electrical Drives at the School of Electrical Engineering, University of Belgrade; in the Laboratory for Electrical Machines and Converters at the Department of the School of Electrical and Computer Engineering, ATUSS; and on the cross-cutting machine line at the Umka Cardboard Mill.

- [1] SIMATIC WinCC V8: www.siemens.com/en-us/products/scada/wincc-v8/, Siemens, Beograd, Srbija.
- [2] iba System – Process Data Acquisition & Analysis: <https://www.iba-ag.com/en/iba-system>, iba AG, Fuerth, Germany.
- [3] MATLAB computing platform: <https://www.mathworks.com/products/matlab/capabilities.html>

Corresponding author:

Milan Bebić

Laboratorija za Elektromotorne pogone

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Beogradu

www.pogoni.etf.bg.ac.rs

bebic@etf.bg.ac.rs

PRIMJENA NAPREDNIH RIJEŠENJA U POVEZIVANJU OPC SERVERA I SQL BAZE PODATAKA - ERGA QCREPORT I ERGA RECIPT MANAGEMENT

APPLICATION OF ADVANCED SOLUTIONS IN CONNECTING OPC SERVERS AND SQL DATABASE - ERGA QCREPORT AND ERGA RECIPE MANAGEMENT

Antun Rukavina, Ivan Ratkovčić

Erga d.o.o., Bana Jelacica 197, 35210 Vrpolje, Croatia

Abstract

The paper describes two solutions that are using OPC protocol to bring process data from factory floor automation systems to SQL database. OPC protocol helps engineers in getting data out of a PLC, DCS, or field device and putting into an HMI, historian, MES, or ERP system.

At the beginning, paper describes basic concepts of OPC protocol.

Furthermore, paper describe Erga QCReport application. Erga QCReport is used to store production reports and measurements profiles in SQL database and present them to operators through modern web interface.

At the end, paper deals with application of recipe management. OPC to SQL database connection has been used to handle recipe data in order to support advance grade change procedure.

Keywords: OPC, Erga QCReport, recipe management

Izvod

Rad opisuje dva rješenja koja koriste OPC protokol za prijenos procesnih podataka iz sustava za automatizaciju u SQL bazu podataka. OPC protokol pomaže inženjerima u preuzimanju podataka iz PLC-a, DCS-a ili uređaja u polju i njihovom prebacivanju u HMI, historian, MES ili ERP sustav.

Na početku, rad opisuje osnovne koncepte OPC protokola.

Nadalje, rad opisuje aplikaciju Erga QCReport. Erga QCReport se koristi za pohranjivanje izvješća o proizvodnji i profila mjerenja u SQL bazu podataka i njihovo prezentiranje operaterima putem modernog web sučelja.

Na kraju, rad se bavi primjenom upravljanja receptima. OPC veza sa SQL bazom podataka korištena je za rukovanje podacima receptata kako bi se podržao postupak napredne izmjene naloga.

Ključne reči: OPC, Erga QCReport, upravljanje receptima

1. INTRODUCTION

OPC stands for Open Platform Communications, an industrial software interoperability standard that enables hardware and software from different vendors to share data through a common interface, regardless of the underlying device protocol.

The original acronym, coined in the mid-1990s, stood for OLE for Process Control, where OLE referred to Microsoft's Object Linking and Embedding technology. As OPC matured and extended beyond Windows platforms into cross-platform architectures, the OPC Foundation officially adopted the current name: Open Platform Communications.

OPC protocol follows a classic client-server model. OPC server communicates with industrial devices (PLCs, RTUs, DCS controllers, meters, drives) and then exposes data from industrial devices in a standardized, OPC-compliant format that any OPC client can consume. An OPC Client is software component that requests data from one or more OPC Servers.

Family of OPC standards includes OPC DA, OPC HAD, OPC A&E and OPC UA. OPC DA is original and most widely deployed OPC standard. OPC UA is the modern, platform-independent successor to OPC DA.

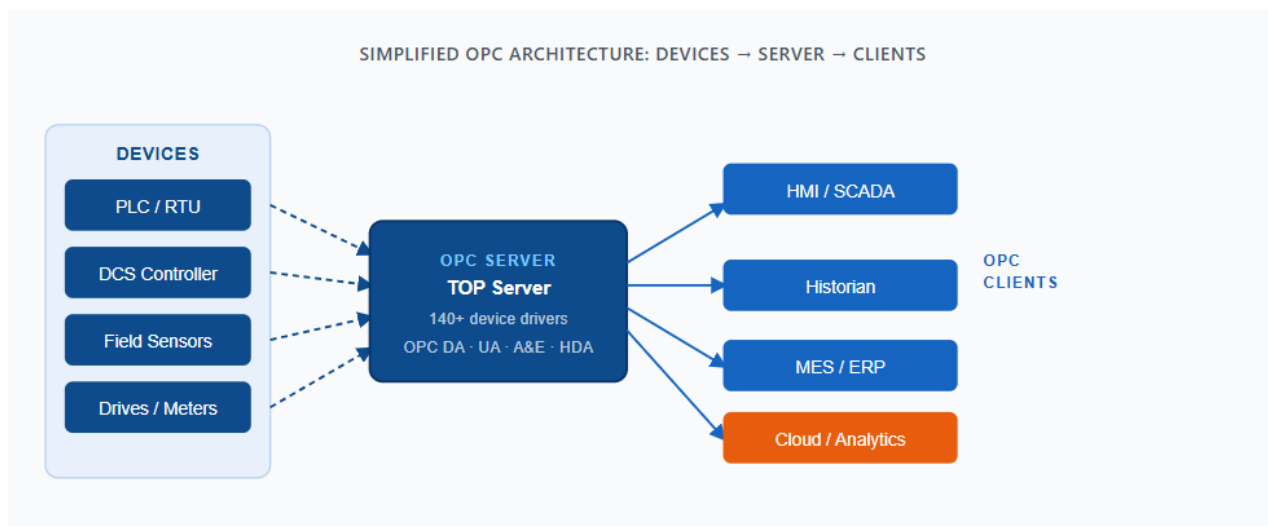


Figure 1: OPC architecture

Slika 1. OPC arhitektura.

Software described further in the article is based on several components that enable retrieval of data from OPC servers and storing them into SQL database. Data stored in the database is then presented some kind of HMI, which depends on type of application. Figure 2. Shows concept of transferring data to database.

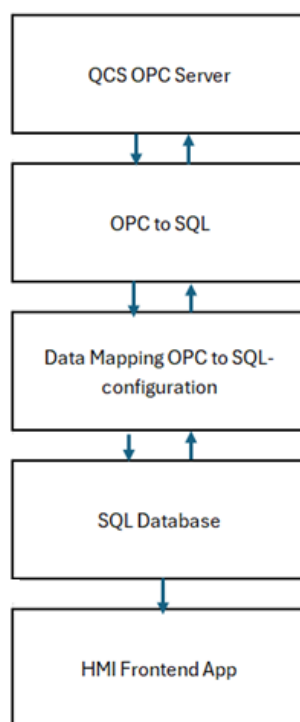


Figure 2: Transfer of data from OPC server to SQL database

Slika 2. Prenos podataka sa OPC servera u SQL bazu podataka.

2. QCREPORT FOR PULP & PAPER INDUSTRY

2.1 Key features

Intended for industrial plants that want to automate the collection, analysis and monitoring of data from quality control systems (QCS) and Distributed Control Systems (DCS).

QCReport is platform that does not depend on type of QCS and DCS system. Only condition to introduce QCReport platform is existence of OPC server running inside QCS and DCS system.

The main goal of the system is to connect QCS and DCS to a centralized database, enable quick insight into the state of the process and provide accurate and reliable reports via a modern web interface.

Reports can be stored for several years, and they are available for retrieval to the operators, shift leaders and production managers.

Main components of software package are:

- PRODUCTION REPORTS - Track reel history, grade change history, day/shift production history and customized reports
- MEASUREMENT REPORTS - Monitor standardization, calibration, and sample check verification
- CONTOUR MAPS - Visualize sensor data from QCS sensors.

2.2 Production reports

Presenting production data in form of following reports:

- Reel reports
- Grade reports
- Day/shift reports
- Customized reports e.g. monthly report, yearly report etc.

Content of each report depend of type of QCS system. Generally, reports contains general data, production summary and quality analysis for each reel, grade and shift and day. Saving of the reports is triggered by reel change and grade change signals coming from QCS system.

Every report can be customized. Customer can decide to add data about specific consumption of energy, raw materials or chemicals, that are not contained in standard report from QCS system.

Figure 3. bellow presents one example of grade report.

Figure 4. shows menu for grade report selection.

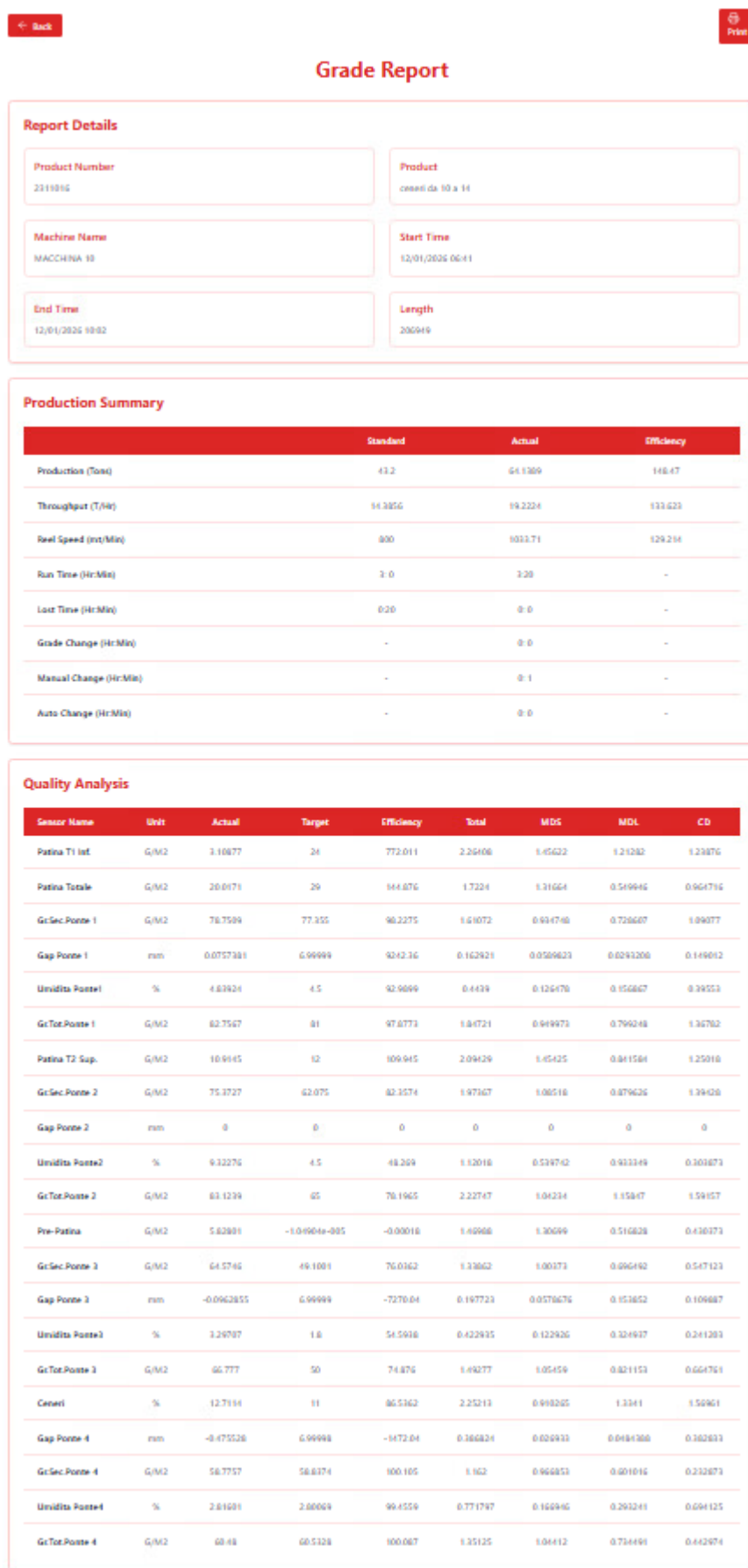


Figure 3: Example of grade report
Slika 3. Primer izveštaja za određenu vrstu papira.

← Back

Grade Report

Date	Product Number	Actions
12. 01. 2026. 10:02	2311016	View Details
12. 01. 2026. 06:41	2311016	View Details
12. 01. 2026. 06:40	2311418	View Details
11. 01. 2026. 04:44	2311016	View Details
10. 01. 2026. 10:24	2300011	View Details
08. 01. 2026. 11:11	2311418	View Details
07. 01. 2026. 12:38	2311418	View Details
02. 01. 2026. 10:57	2300011	View Details
19. 12. 2025. 15:03	2311016	View Details
18. 12. 2025. 15:43	2311016	View Details
18. 12. 2025. 15:43	2311016	View Details
18. 12. 2025. 15:43	2311016	View Details
17. 12. 2025. 15:31	2311418	View Details
17. 12. 2025. 15:31	2311418	View Details
17. 12. 2025. 15:31	2311418	View Details
17. 12. 2025. 14:52	2311016	View Details
17. 12. 2025. 14:52	2311016	View Details
17. 12. 2025. 14:52	2311016	View Details
17. 12. 2025. 14:52	2311016	View Details
17. 12. 2025. 14:52	2311016	View Details

Previous
Page 1 of 10
Next

Figure 4: Grade report menu
Slika 4. Meni izveštaja za određenu vrstu papira.

2.2 Measurements reports

Measurement reports track status of sensors that are part of QCS system. Reports are ultimate tool that helps engineers in preventive and corrective maintenance.

Range of reports coming from sensors depend from type of QCS system. Set of reports coming from ABB QCS800xA system is following:

- Standardization reports
- Calibration sample reports
- Sample check reports.

Figure 5. shows example of standardization report. In this case, report contains all standardization data from all sensors in selected frame.

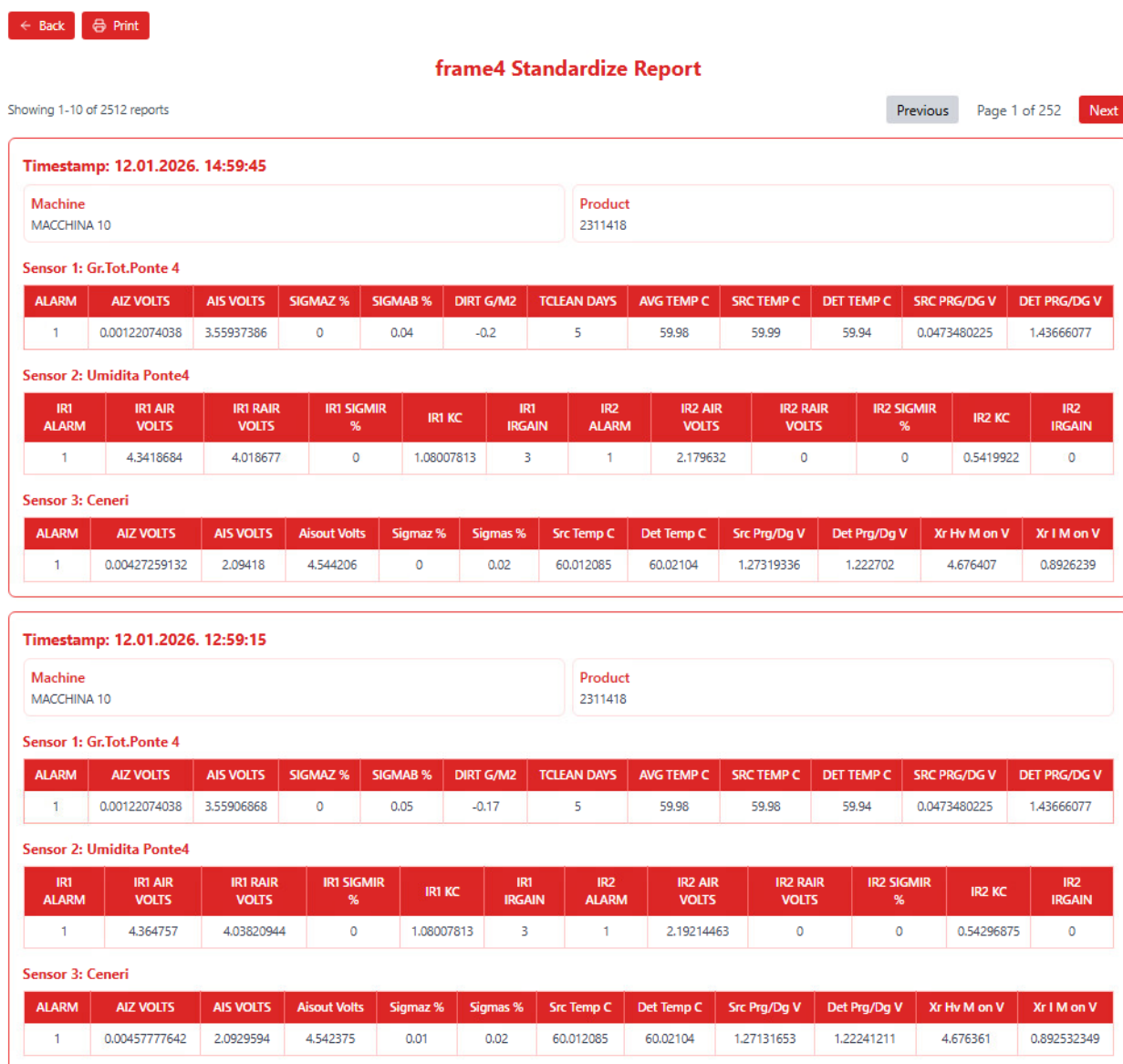


Figure 5: Sample of standardization report
Slika 5. Primer izveštaja o standardizaciji.

2.2 Profile map

The Profile map module shows spatial sensor data and highlights CD/MD profile variations. Users can zoom, pan, and inspect measurement values, and select which sensor from which measurement frame will be presented inside the map. Enables quick identification of streaks, uneven profiles or calibration drifts.

Following area of operator display can be identify:

- Sensor heatmap – two-dimensional representation of all profile values, both in MD and CD direction
- General data – indicates values like grade code, reel number, statistical data about last profile and also statistical distribution of all values.
- Profiles in CD and MD directions

Figure 6. shows example of profile map operator display.

Current version of application stores last 200 profiles in database and presents them on profile map. New version will work with 14400 profiles, which is around 5 days storage, if we count with 30s scan time of measurement frame. Bigger profile storage can configured on request.

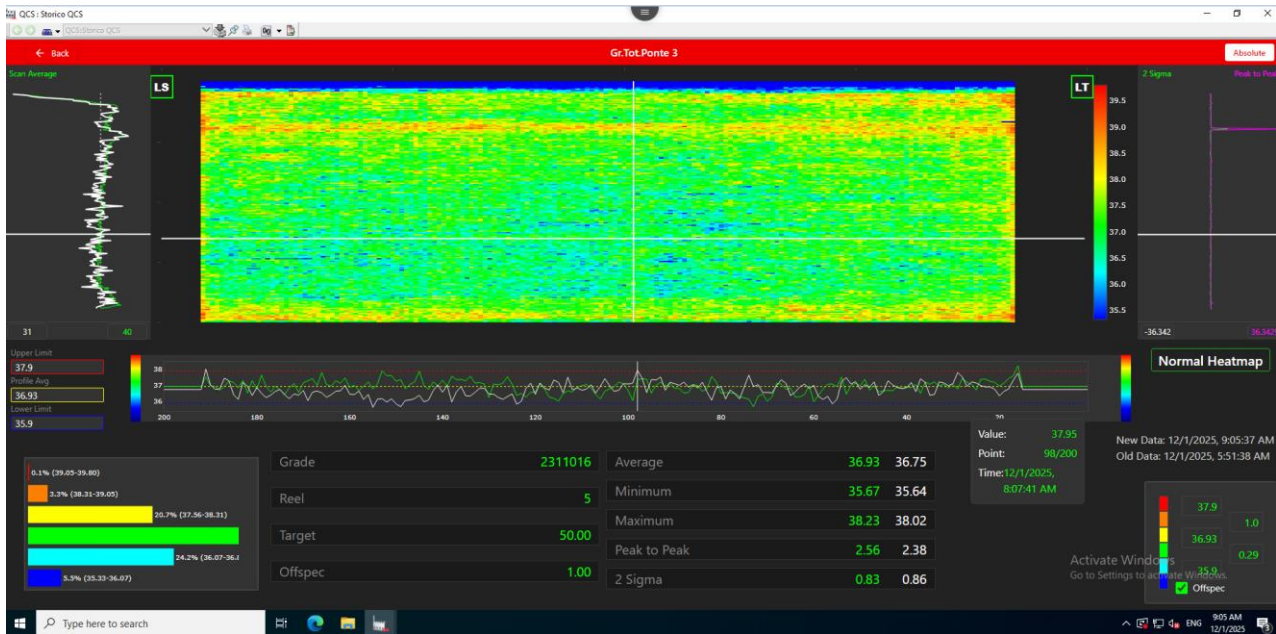


Figure 6: Profile map
Slika 6. Mapa profila

3. ERGA RECIPE MANAGEMENT

Erga Recipe Management is a solution that enables centralized management and storage of recipes.

Recipe data are stored in SQL database. Standard Erga software components are used to enable storage and retrieval of data from database using OPC protocol. Number of parameters for each recipe and number of recipes is configurable. Parameters for each recipe can be modified by process engineers and operators.

Solution has been applied in paper mill Sappi Carmignano that produce coated specialty papers. Interface that is used for creation, retrieving or modifying of recipe data is created inside DCS system. In this case it is ABB 800xA. Recipes names and descriptions are aligned with grade names and descriptions in the QCS system and ERP system.

Main purpose of recipe or grade data management is to support grade change sequence. Using data from recipe database or and grade change sequence following benefits can be achieved:

- Better quality of paper at the beginning of every production
- Less waste
- Cost reduction due to the optimization of chemical dosages and energy used for refining

Figure 7. presents operator interface used for creation, retrieving, or modifying of recipe data and for handling of grade change sequence. Also it presents parameters included in the database, and the mainly chemical dosages, refiner specific energy setpoints and consistency setpoints.

All grade parameters can be retrieved from database, modified and all modifications can be stored back to database. All modifications must be done under preliminary set of parameters. During grade change sequence execution all preliminary grade parameters are copied to active grade parameters. In certain step of grade change sequence, active grade parameters are written to PID regulators as external setpoints.



Figure 7: Recipe data operator display
Slika 7. Operatorski ekran sa podacima o recepturi.

References

<https://softwaretoolbox.com/resources/what-is-opc>

Corresponding author:

Ivan Ratkovcic

Erga d.o.o., Bana Jelacica 197, 35210 Vrpolje, Croatia

ivan.ratkovcic@erga.hr

GRAFIČKA MANUFAKTURA U VREMENU DIGITALIZACIJE I VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

GRAPHIC ARTS MANUFACTURING IN THE ERA OF DIGITALIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Miodrag Ristić, Emilija Ristić, Nenad Orlić

Deto, Pančevo, Srbija

Izvod

Grafička industrija prolazi kroz jednu od najznačajnijih transformacija od pojave digitalne štampe. Digitalizacija poslovnih procesa, automatizacija pripreme za štampu, razvoj veb platformi za naručivanje i personalizaciju proizvoda, kao i sve šira primena veštačke inteligencije, menjaju način na koji grafičke manufakture posluju, komuniciraju sa klijentima i kreiraju vrednost. Rad analizira uticaj savremenih digitalnih tehnologija na tradicionalne grafičke proizvodne procese, sa posebnim osvrtom na mogućnosti koje pružaju alati zasnovani na veštačkoj inteligenciji. Posebna pažnja posvećena je automatizaciji dizajna, optimizaciji proizvodnje, prediktivnom planiranju resursa i unapređenju korisničkog iskustva kroz personalizovane proizvode i usluge. Istovremeno, razmatraju se izazovi vezani za očuvanje stručnih znanja, promene kompetencija zaposlenih, zaštitu autorskih prava i etičke aspekte primene AI sistema.

Zaključuje se da budućnost grafičke manufakture nije u zameni čoveka tehnologijom, već u njihovoj sinergiji, gde kreativnost, zanatsko iskustvo i stručnost zaposlenih ostaju ključni faktori konkurentnosti, dok digitalizacija i veštačka inteligencija predstavljaju alate za povećanje efikasnosti, kvaliteta i tržišne prilagodljivosti.

Ključne reči: *grafička industrija, grafička manufaktura, digitalizacija, veštačka inteligencija, automatizacija, personalizacija, digitalna transformacija.*

Abstract

The graphic industry is undergoing one of its most significant transformations since the emergence of digital printing. The digitalization of business processes, automation of prepress preparation, development of web-based platforms for ordering and product personalization, and the increasingly widespread application of artificial intelligence are changing the way graphic manufacturing companies operate, communicate with clients, and create value. This paper analyses the impact of contemporary digital technologies on traditional graphic production processes, with particular emphasis on the opportunities offered by artificial-intelligence-based tools. Special attention is given to design automation, production optimization, predictive resource planning, and the improvement of user experience through personalized products and services. At the same time, the paper discusses challenges related to the preservation of professional expertise, changes in employee competencies, copyright protection, and the ethical aspects of applying AI systems.

It is concluded that the future of graphic manufacturing does not lie in replacing humans with technology, but in their synergy, where creativity, craft experience, and employee expertise remain key factors of competitiveness, while digitalization and artificial intelligence serve as tools for increasing efficiency, quality, and market adaptability.

Keywords: *graphic industry, graphic manufacturing, digitalization, artificial intelligence, automation, personalization, digital transformation.*

Corresponding author:

Miodrag Ristić

Tel:+381638286228

Preduzeće za grafičku delatnost Deto d.o.o.

Primorska 59 - 26000 Pančevo, Srbija

www.deto.rs

office@deto.rs

OPTIMIZACIJA MODERNE FABRIKE CELULOZE I PAPIRA PRIMENOM METODA NAPREDNOG UPRAVLJANJA PROCESOM - APC („ADVANCED PROCESS CONTROL”) I VIRTUELNIH/SOFT SENZORA

OPTIMIZATION OF A MODERN PULP AND PAPER MILL USING ADVANCED PROCESS CONTROL – APC METHODS AND VIRTUAL/SOFT SENSORS

Dušan Otašević

Honeywell d.o.o., Beograd, Srbija

Izvod

Industrija celuloze i papira suočava se sa sve većim zahtevima u pogledu efikasnosti proizvodnje, kvaliteta proizvoda, potrošnje energije i održivosti. Rešenja zasnovana na naprednom upravljanju procesom – APC (“Advanced Process Control”), u kombinaciji sa modelima mašinskog učenja i virtuelnim (soft) senzorima, predstavljaju moćan alat za optimizaciju proizvodnje i unapređenje operativnih performansi.

U radu će biti prikazane mogućnosti primene multivarijabilnog prediktivnog upravljanja, optimizacije u realnom vremenu i virtuelnih/soft senzora u cilju povećanja stabilnosti procesa, smanjenja varijabilnosti ključnih parametara proizvodnje i povećanja efikasnosti rada postrojenja. Posebna pažnja biće posvećena virtuelnim/soft senzorima za procenu procesnih veličina koje nije moguće ili nije ekonomski opravdano meriti u realnom vremenu. Kroz primere iz industrijske prakse biće predstavljeni benefiti digitalizacije i napredne automatizacije u savremenim fabrikama celuloze i papira.

Ključne reči: Napredno upravljanje procesom (APC), Model-prediktivno upravljanje (MPC), “Real-Time” optimizacija procesa, Virtuelni/Soft senzori, Mašinsko učenje, Industrija celuloze i papira.

Abstract

The pulp and paper industry is facing increasing demands in terms of production efficiency, product quality, energy consumption, and sustainability. Solutions based on Advanced Process Control (APC), combined with machine learning models and virtual (soft) sensors, provide powerful tools for process optimization and operational performance improvement.

This paper presents the application of multivariable predictive control, real-time optimization, and virtual/soft sensors aimed at improving process stability, reducing variability of key production parameters, and increasing overall plant efficiency. Special attention is given to virtual/soft sensors used for estimating process variables that cannot be measured directly in real time or for which online measurement is not economically justified. Through practical industrial examples, the paper highlights the benefits of digitalization and advanced automation in modern pulp and paper mills.

Keywords: Advanced Process Control (APC), Model Predictive Control (MPC), Real-Time Process Optimization, Virtual/Soft Sensors, Machine Learning, Pulp&Paper Industry.

Corresponding author:

Dušan Otašević

Menadžer prodaje

Honeywell | Process Solutions

tel: +381 11 6302 945

mob: +381 63 1082 851

dusan.otasevic@honeywell.com

<http://www.honeywell.com/>

PRIMENA „PAMETNIH“ PROCESNIH MERENJA U PAPIRNOJ INDUSTRIJI

APPLICATION OF "SMART" PROCESS MEASUREMENTS IN THE PAPER INDUSTRY

Dejan Otašević

O2 Process Solutions d.o.o., Beograd, Srbija

Izvod

Pouzdana procesna merenja predstavljaju osnovu efikasnog upravljanja i optimizacije procesa u savremenoj proizvodnji papira. Razvoj inteligentnih mernih uređaja omogućio je kontinuirano praćenje ključnih procesnih parametara uz napredne dijagnostičke funkcije i podršku prediktivnom održavanju.

U radu će biti dat pregled savremenih „pametnih“ mernih tehnologija koje se koriste u papirnoj industriji, uključujući merenja protoka, pritiska, nivoa, vibracija i analitičkih parametara. Poseban fokus biće na unapređenju pouzdanosti procesa, smanjenju troškova održavanja i podršci digitalnoj transformaciji kroz primenu inteligentne instrumentacije i naprednih sistema nadzora i upravljanja. Na praktičnim primerima biće prikazan doprinos savremenih merenja povećanju operativne efikasnosti i sigurnosti rada postrojenja.

Ključne reči: „Pametni“ transponderi, Procesna merenja, Digitalizacija, Prediktivno održavanje, Kontroleri, RTU, Papirna industrija, Upravljanje procesom.

Abstract

Reliable process measurements form the foundation of efficient process control and optimization in modern paper production. The development of intelligent field instrumentation has enabled continuous monitoring of critical process parameters, supported by advanced diagnostic functions and predictive maintenance capabilities.

This paper provides an overview of modern smart measurement technologies used in the paper industry, including flow, pressure, level, vibration, and analytical measurements. Particular emphasis is placed on improving process reliability, reducing maintenance costs, and supporting digital transformation through the implementation of intelligent instrumentation, advanced monitoring systems, controllers, and Remote Terminal Units (RTUs). Practical industrial examples will demonstrate the contribution of modern measurement technologies to enhanced operational efficiency, process performance, and plant safety.

Keywords: "Smart" Transmitters, Process Measurements, Digitalization, Predictive Maintenance, Controllers, RTUs, Paper Industry, Process Control.

Corresponding author:

Dejan Otašević
Managing director
O2 Process Solutions d.o.o.
Beograd, Srbija
www.o2ps.rs

INTEGRACIJA ESG POKAZATELJA I FINANSIJSKIH PERFORMANSI U INDUSTRIJI DATA CENTARA: EMPIRIJSKA STUDIJA SLUČAJA DCT KRAGUJEVAC

INTEGRATION OF ESG INDICATORS AND FINANCIAL PERFORMANCE IN THE DATA CENTRE INDUSTRY: AN EMPIRICAL CASE STUDY OF DCT KRAGUJEVAC

Danilo Savić^{1a}, Kosana Vićentijević^{2b}, Veljko Davidović³, Biljana Lazarević³

¹Data Cloud Technology d.o.o., Kragujevac; ²Academy of Applied Studies Western Serbia; ³Casa Forte, Belgrade, Serbia

^a(<https://orcid.org/0000-0003-1297-8607>)

^b(<https://orcid.org/0000-0002-2230-6006>)

Izvod

Ovaj rad istražuje kompleksnu međuzavisnost između ekoloških, društvenih i upravljačkih (Environmental, Social, Governance - ESG) pokazatelja i finansijskih performansi u sektoru digitalne infrastrukture, fokusirajući se na studiju slučaja kompanije Data Cloud Technology (DCT) Kragujevac u periodu 2022–2025. godine. Osnovni cilj istraživanja je operacionalizacija specifičnih ESG indikatora, primarno energetske efikasnosti iskazane kroz Power Usage Effectiveness (PUE) i efikasnosti korišćenja vode (Water Usage Effectiveness - WUE), te analiza njihove povezanosti sa profitabilnošću (EBITDA i EBITDA marža). Primenjena metodologija obuhvata deskriptivnu statistiku, analizu trendova i obračun Pearsonovog koeficijenta korelacije. S obzirom na izrazito mali broj posmatranja u trogodišnjem operativnom ciklusu (N=3), istraživanje ima naglašen eksplorativni karakter. Dobijeni rezultati imaju isključivo deskriptivno-indikativan karakter i opisuju istorijsko su-kretanje i asocijacije varijabli na posmatranom uzorku, bez mogućnosti donošenja čvrstih statističkih zaključaka o uzročno-posledičnim (kauzalnim) vezama. Rezultati istraživanja doprinose inicijalnom razumevanju veze između ESG praksi i finansijskih performansi u sektoru data centara, ukazujući na značaj energetske i resursne efikasnosti kao pratećih faktora poslovne uspešnosti.

Cljučne reči: ESG pokazatelji, finansijske performanse, data centri, PUE, CAPEX, ograničenja korelacije

Abstract

This paper explores the complex interdependence between environmental, social and governance (ESG) indicators and financial performance in the digital infrastructure sector, focusing on a case study of Data Cloud Technology (DCT) Kragujevac for the period 2022–2025. The primary objective of the research is to operationalize specific ESG indicators, primarily energy efficiency expressed through Power Usage Effectiveness (PUE) and water-use efficiency expressed through Water Usage Effectiveness (WUE), and to analyse their relationship with profitability, measured by EBITDA and EBITDA margin.

The applied methodology includes descriptive statistics, trend analysis and calculation of Pearson's correlation coefficient. Given the very small number of observations within the three-year operational cycle (N = 3), the research is strongly exploratory in nature. The obtained results are exclusively descriptive and indicative, describing the historical co-movement and associations of the variables in the observed sample, without allowing firm statistical conclusions regarding causal relationships to be drawn.

The research results contribute to an initial understanding of the relationship between ESG practices and financial performance in the data-centre sector, indicating the importance of energy and resource efficiency as accompanying factors of business performance.

Keywords: ESG indicators, financial performance, data centres, PUE, CAPEX, limitations of correlation

1. UVOD

U savremenom poslovnom okruženju, koncept održivosti i korporativne društvene odgovornosti postao je nezaobilazan deo strategije rasta i razvoja kompanija širom sveta. Integracija ekoloških, društvenih i upravljačkih faktora (Environmental, Social, and Governance - ESG) u tradicionalne finansijske analize predstavlja ključni korak ka stvaranju dugoročne vrednosti i identifikaciji potencijalnih rizika i prilika. Nasuprot tradicionalnom pristupu koji analizira isključivo finansijsko zdravlje kompanije kroz stvoreni profit i prinos na kapital, savremeni standardi

poslovanja zahtevaju dopunjavanje finansijskih rezultata sa ekološkim i društvenim uticajem. Industrija data centara predstavlja infrastrukturu savremenog digitalnog društva i jedan je od ključnih stubova savremene digitalne ekonomije, sa bitnim uticajem na potrošnju energije, prirodnih resursa i finansijske performanse kompanija. Sa eksponencijalnim rastom količine podataka koji se generišu, obrađuju i skladište, data centri postaju i jedni od najvećih potrošača električne energije i vode na globalnom nivou. Prema podacima Međunarodne agencije za energiju (International Energy Agency - IEA), data centri trenutno troše oko 1–1.5% globalne električne energije, sa tendencijom rasta (International Energy Agency, 2026). Sa ekspanzijom digitalizacije i obima obrade podataka, povećava se i potreba za efikasnim upravljanjem resursima, što pitanje održivosti stavlja u sam fokus savremenog poslovanja. U tom kontekstu, ESG pokazatelji postaju važan instrument za ocenu operativne efikasnosti i dugoročne profitabilnosti.

Predmet istraživanja u ovom radu je analiza odnosa između ESG performansi (sa naglaskom na ekološku efikasnost) i finansijskih rezultata u industriji data centara, sa posebnim fokusom na studiju slučaja kompanije Data Cloud Technology (DCT) Kragujevac. Cilj rada je da se ispita na koji način primena ESG praksi, operacionalizovana kroz pokazatelje energetske i resursne efikasnosti (PUE, WUE i udeo obnovljive energije), korespondira sa finansijskim performansama, merenim kroz EBITDA, EBITDA maržu i rast prihoda.

Pri tome se, uvažavajući metodološka ograničenja uzorka i preporuke naučne opreznosti, naglašava da se fokus stavlja isključivo na korelacione odnose i istorijske asocijacije, dok se uzročno-posledične veze ne mogu statistički verifikovati na bazi posmatranog vremenskog serijala:

H0: Primena ESG praksi, izražena kroz pokazatelje energetske i resursne efikasnosti, pozitivno je povezana sa finansijskim performansama data centara.

H1: Poboljšanje energetske efikasnosti (odnosno niži PUE) pokazuje pozitivnu povezanost sa finansijskim performansama.

H2: Veći udeo obnovljive energije pozitivno utiče na tržišnu konkurentnost i rast prihoda data centara. (Metodološka napomena: Usled specifičnih infrastrukturnih i tržišnih okolnosti, udeo obnovljive energije iznosio je 0% tokom posmatranog perioda, pa se ova hipoteza u radu postavlja teorijski/konceptualno, dok se u empirijskom delu detaljno obrazlažu razlozi nemogućnosti njene trenutne verifikacije). H3: Postoji indikativna korelacija između operativnih ESG performansi i EBITDA posmatranog data centra.

Istraživanje je zasnovano na empirijskoj analizi sekundarnih podataka kompanije DCT Kragujevac za period 2022-2025. godina, uz primenu deskriptivne statistike, Pearsonovog koeficijenta korelacije i analize trendova, sa ciljem ispitivanja odnosa između ESG i finansijskih varijabli. Struktura rada obuhvata teorijski okvir i pregled literature, metodologiju istraživanja i izvore podataka, analizu rezultata studije slučaja, diskusiju nalaza sa osvrtom na ulogu investicionog ciklusa, te zaključna razmatranja sa implikacijama za praksu i predlozima za dalja istraživanja. Doprinos rada ogleda se u integraciji tehničkih ESG indikatora i finansijskih metrika na nivou konkretnog regionalnog data centra, čime se nastoji pružiti doprinos razumevanju ovih odnosa u industriji digitalne infrastrukture na tržištima u razvoju.

2. PREGLED LITERATURE

Savremeni izazovi održivog razvoja i digitalne transformacije ukazuju na potrebu za integrisanim pristupom koji povezuje ekonomske, ekološke i tehnološke aspekte poslovanja data centara. U tom smislu, pregled literature u ovom radu sistematizuje relevantna istraživanja koja analiziraju međuzavisnost ekonomskog rasta, energetske resursa, ESG izveštavanja i razvoja digitalne infrastrukture, sa posebnim fokusom na industriju data centara.

Ekonomske rast predstavlja važan pokretač razvoja, ali istovremeno generiše povećane emisije štetnih gasova, što ukazuje na postojanje konflikta između ekonomskih i ekoloških ciljeva. Empirijski nalazi potvrđuju da rast privrede može dovesti do povećanja emisije CO₂, dok primena obnovljivih izvora energije doprinosi njihovom smanjenju (Lojanica et al., 2025). Ovi rezultati ukazuju na potrebu za intenzivnijim ulaganjima u čiste tehnologije i unapređenje energetske efikasnosti.

Pravovremeno prepoznavanje finansijskih teškoća omogućava efikasnije upravljanje rizicima i donošenje kvalitetnijih poslovnih odluka (Dimitrijević et al., 2024). Ovaj aspekt je posebno značajan u kontekstu ESG izveštavanja, gde pouzdanost i transparentnost podataka predstavljaju osnov za donošenje odluka. Rastući problemi zagađenja životne sredine utiču na promenu poslovnih modela i strateških prioriteta kompanija, posebno u energetski intenzivnim sektorima kao što je industrija data centara. Povećana svest korisnika i poslovnih partnera o značaju održivosti dovodi do toga da se ekološki odgovorno poslovanje sve više vrednuje kao faktor konkurentnosti,

što može imati direktne implikacije na finansijske performanse (Raletić et al., 2025). U tom kontekstu, primena *ESG* principa u upravljanju data centrima ne predstavlja samo regulatorni zahtev, već i ključni element dugoročne poslovne strategije, uz istovremenu potrebu za unapređenjem održivih praksi i razvojem regulatornog okvira koji omogućava usklađivanje sa zahtevima investitora usmerenih ka održivosti (Manić & Glišić, 2025).

Koncept ekološki odgovornog upravljanja data centrima razvija se od kraja 20. veka, uporedo sa rastom ekološke svesti koja sve više utiče na ekonomske i investicione odluke. Rast globalnih ekonomija omogućio je državama razvoj nove infrastrukture i poboljšanje životnog standarda građana, ali intenzivna eksploatacija resursa, uključujući i sve veću potrošnju energije data centara, dovodi do ozbiljnih ekoloških problema kao što su gubitak biodiverziteta, degradacija zemljišta i povećano zagađenje vode i vazduha (Gungor & Saglam, 2025). U uslovima globalnih tržišnih promena, gde se odluke sve više zasnivaju na vrednosnim kriterijumima, *ESG* principi postaju ključan faktor diferencijacije u industriji data centara (Lazarević et al., 2026). Ovaj sveobuhvatni pritisak na ekološku održivost i poslovne modele naglašava potrebu za strateškim ulaganjima u energetske efikasne i održive infrastrukturu data centara, čime se stvara osnova za kasniju primenu finansijskih instrumenata usmerenih ka održivosti. Razvoj finansijskih instrumenata usmerenih ka održivosti, poput zelenih obveznica, doprinosi jačanju investicija u energetske efikasne i održive infrastrukturu, što je posebno značajno za kapitalno intenzivne sektore kao što je industrija data centara. Iako ovi instrumenti omogućavaju finansiranje projekata sa pozitivnim ekološkim efektima, njihova primena i dalje je ograničena regulatornim i tržišnim izazovima (Anufrijev, 2024). U tom kontekstu, dostupnost i efikasno korišćenje ovih izvora finansiranja mogu imati indirektan uticaj na unapređenje *ESG* performansi i dugoročnu profitabilnost data centara.

Paralelno sa finansijskim mehanizmima, primena principa cirkularne ekonomije omogućava efikasnije upravljanje resursima kroz smanjenje otpada i ponovno korišćenje materijala, što može doprineti smanjenju operativnih troškova i poboljšanju ekoloških performansi (Mostak et al., 2025). Ovakav pristup je posebno relevantan za data centre, gde optimizacija resursa ima direktne implikacije na energetske efikasne i ukupne *ESG* pokazatelje.

Navedeni trendovi ukazuju na sve veću potrebu za integracijom ciljeva održivog razvoja u poslovne strategije i sisteme izveštavanja. Uključivanje *ESG* i *SDG* (Sustainable Development Goals) principa doprinosi većoj transparentnosti i omogućava bolje razumevanje uticaja poslovnih aktivnosti na životnu sredinu i društvo, iako nivo njihove implementacije i dalje varira između organizacija (Spalević & Vićentijević, 2024). U tom smislu, povezivanje održivih praksi sa merljivim finansijskim rezultatima postaje ključno za donošenje strateških odluka u industriji data centara.

Razvoj digitalne infrastrukture, posebno data centara, predstavlja ključni faktor savremene ekonomije, ali istovremeno nameće značajne izazove u pogledu održivosti i upravljanja resursima. Data centri visokog nivoa pouzdanosti, poput Tier III i Tier IV, omogućavaju kontinuitet poslovanja i podršku kritičnim sistemima, što direktno utiče na stabilnost i rast prihoda kompanija (Abiodun, 2025). Međutim, njihova izražena energetska intenzivnost dovodi do povećanja operativnih troškova i ekološkog opterećenja, čime *ESG* pokazatelji postaju ključni faktor u oceni njihove ukupne efikasnosti i dugoročne profitabilnosti.

U tom kontekstu, energetska efikasnost zauzima centralno mesto u analizi performansi data centara. *PUE* (Power Usage Effectiveness) predstavlja najčešće korišćen indikator za merenje efikasnosti, ali njegova primena ima određena ograničenja, posebno u složenim i dinamičnim infrastrukturnim okruženjima (Fieni et al., 2025). Zbog toga se sve više razvijaju napredni modeli za optimizaciju potrošnje energije, uključujući primenu tehnika mašinskog učenja, koji omogućavaju preciznije upravljanje resursima i potencijalno unapređenje finansijskih performansi kroz smanjenje troškova i povećanje operativne efikasnosti (Patel, 2025). Poseban izazov predstavlja optimizacija sistema hlađenja, koji imaju dominantan uticaj na ukupnu potrošnju energije. Data centri su izrazito energetske intenzivni sistemi, pri čemu najveći deo opterećenja potiče od toplote koju generiše IT oprema. Primena naprednih rešenja, kao što su ekonomizatori i prilagođavanje klimatskim uslovima, može značajno unaprediti energetske efikasne (Kim et al., 2024). Međutim, efikasnost ovih rešenja zavisi od specifičnih operativnih i klimatskih uslova, što ograničava njihovu univerzalnu primenu.

Pored energije, značajan aspekt održivosti data centara predstavlja i potrošnja vode. Na nivo potrošnje utiču brojni faktori, uključujući tip sistema hlađenja, iskorišćenost servera i klimatske uslove (Lei et al., 2025), što ukazuje na potrebu za integrisanim pristupom upravljanju resursima.

Standardizacija predstavlja važan mehanizam za povezivanje *ESG* pokazatelja sa finansijskim performansama u industriji data centara, jer omogućava merenje, uporedivost i pouzdanost relevantnih indikatora. Standard EN 50600

(Information technology. Data centre facilities and infrastructures) definiše zahteve za projektovanje, upravljanje i merenje performansi infrastrukture data centara, čime se obezbeđuje jedinstven okvir za evaluaciju energetske efikasnosti, operativne pouzdanosti i održivosti (Institut za standardizaciju Srbije, 2020). Njegova primena omogućava kvantifikaciju ESG pokazatelja, kao što su PUE i drugi indikatori efikasnosti, koji imaju direktan uticaj na troškove poslovanja i profitabilnost. Razvoj ovog standarda rezultat je aktivnosti relevantnih međunarodnih organizacija za standardizaciju, čime se doprinosi harmonizaciji tehničkih i održivih praksi u data industriji (CEN/CENELEC/ETSI, 2021). Dodatno, evropski regulatorni okvir u oblasti energetske efikasnosti podstiče operatere data centara na kontinuirano praćenje i optimizaciju potrošnje resursa, čime ESG performanse postaju sastavni deo upravljanja finansijskim rezultatima (Kananen, 2024). Stručne analize i praktične smernice dodatno olakšavaju implementaciju ovih standarda u realnim uslovima poslovanja (Techerati, 2023). Da bi se osigurala fizička bezbednost i dostupnost IT infrastrukture moraju se preduzeti odgovarajuće mere. U tom kontekstu, evropski standard EN 50600 daje holistički pristup planiranju, izgradnji i radu data centara. On pruža planerima, instalaterima i operaterima data centara sveobuhvatne smernice u obliku različitih zahteva, posebno u pogledu napajanja, klimatizacije i bezbednosne infrastrukture (TÜV NORD, 2012).

Pored standardizacije, Tier klasifikacija data centara predstavlja važan alat za procenu nivoa pouzdanosti i dostupnosti infrastrukture, što direktno utiče na kontinuitet poslovanja i smanjenje operativnih rizika (Colocation America, 2023). Viši nivoi Tier klasifikacije povezani su sa većim investicionim troškovima, ali i sa većom stabilnošću prihoda i poverenjem korisnika, što ukazuje na jasnu vezu između tehničkih karakteristika infrastrukture. Data centri se često klasifikuju prema Tier sistemu, koji definiše nivo redundancije, pouzdanosti i dostupnosti infrastrukture. Sistem Tier klasifikacije razvio je Uptime Institute i on se koristi globalno kao standard za ocenu sposobnosti data centra da obezbedi neprekidan rad IT opreme (Uptime Institute).

Iako postoje brojna istraživanja koja analiziraju pojedinačne aspekte održivosti i performansi data centara, uočava se nedostatak integrisanih pristupa koji povezuju ESG pokazatelje i finansijske performanse. Većina studija fokusira se na tehničke ili ekološke indikatore, dok je njihova direktna veza sa profitabilnošću nedovoljno istražena. Dodatno, primena postojećih metrika, poput PUE, suočava se sa ograničenjima u različitim operativnim uslovima, dok standardizacija, iako razvijena, nije ujednačeno implementirana u praksi. Ovi nedostaci ukazuju na potrebu za empirijskim istraživanjima koja integrišu tehničke i finansijske dimenzije poslovanja. U tom kontekstu, ovaj rad doprinosi literaturi kroz analizu povezanosti ESG indikatora i finansijskih performansi na nivou konkretnog data centra, čime se nastoji prevazići jaz između teorijskih modela i njihove praktične primene.

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I IZVORI PODATAKA

3.1. Metodološki okvir i analitički postupak

Istraživanje u ovom radu zasnovano je na empirijskoj metodi studije slučaja (case study) kompanije Data Cloud Technology (DCT) Kragujevac, sa fokusom na analizu veze između infrastrukturne pouzdanosti, operativnih ekoloških pokazatelja i finansijskih rezultata. Data centar u Kragujevcu projektovan je i izgrađen prema evropskom standardu EN 50600 Class 4, što predstavlja najviši nivo infrastrukturne pouzdanosti i operativne efikasnosti, u potpunosti korelirajući sa Tier IV klasifikacijom prema globalnim standardima Uptime Institute. Pomenuta sertifikacija obezbeđuje sveobuhvatnu evaluaciju tehničkih karakteristika arhitekture, elektroenergetskih i rashladnih sistema, te operativnih procesa održivosti, što je ključno za objektivnu operacionalizaciju nefinansijskih ESG performansi.

Usklađenost sa standardima visokog Tier nivoa (Class IV) podrazumeva striktno definisanu sistemsku redundansu i stopu dostupnosti infrastrukture. S obzirom na to da je ova varijabla na posmatranom uzorku konstantna (objekat sve vreme posluje u Class IV režimu), ona se statistički ne može tretirati kao varijabilna promenljiva za dalju korelacionu analizu unutar samog data centra, već predstavlja fiksni infrastrukturni preduslov.

Analitički okvir za ispitivanje odnosa između identifikovanih ESG i finansijskih varijabli obuhvata primenu deskriptivne statistike, analize istorijskih trendova i proračun Pearsonovog koeficijenta linearne korelacije (r).

3.2. Operacionalizacija varijabli i izvori podataka

Istraživanje se zasniva na analizi sekundarnih podataka DCT-a Kragujevac za vremenski serijal 2022–2025. godine. Kako bi se zadovoljio kriterijum naučne verodostojnosti i transparentnosti, poreklo i metodi verifikacije podataka se precizno specifikuju:

1. Operativni ekološki indikatori (*PUE* i *WUE*): U skladu sa standardom *EN 50600-4-2*, efikasnost korišćenja električne energije (*Power Usage Effectiveness* - *PUE*) obračunava se po formuli:

$$PUE = \frac{\text{Ukupna energija objekta (MWh)}}{\text{Energija IT opreme MWh}}$$

Efikasnost korišćenja vode (*Water Usage Effectiveness* - *WUE*), definisana standardom *EN 50600-4-3*, računa se kao:

$$WUE = \frac{\text{Godišnja potrošnja vode (litara)}}{\text{Energija IT opreme kWh}}$$

Ovi podaci su obezbeđeni direktnim uvidom u interne telemetrijske baze podataka i *BMS (Building Management System)* sisteme data centra *DCT Kragujevac*, kroz kontinuirano očitavanje mernih grupa. Eksterna verifikacija izvršena je unakrsnim upoređivanjem sa mesečnim računima isporučilaca energenata (*EPS (Elektro privreda Srbije)* i *JKP "Vodovod i kanalizacija" Kragujevac*). Dodatni izvor predstavlja dobrovoljni, javno objavljeni *ESG* izveštaj kompanije za 2024. godinu, kao i tehnička dokumentacija o sertifikaciji.

2. Finansijski indikatori (*Prihodi, EBITDA, CAPEX*): Finansijske performanse prate se kroz ukupne poslovne prihode, *EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization)* i *EBITDA* maržu. Podaci za period 2022–2024. godine preuzeti su iz zvaničnih, revidiranih godišnjih finansijskih izveštaja podnetih Agenciji za privredne registre (*APR*) Republike Srbije. Podaci za 2025. godinu preuzeti su iz internog preliminarog bruto bilansa i zvaničnih izveštaja menadžmenta pre konačnog zaključenja *APR* baze.

Statističko ograničenje uzorka: Budući da je objekat operativan od kraja 2022. godine, uzorak obuhvata tri pune operativne godine (2023–2025). Zbog malog broja posmatranja ($N=3$), obračunati korelacioni koeficijenti imaju isključivo deskriptivno-indikativan karakter za dati uzorak. Oni opisuju istorijsko su-kretanje varijabli, ali nemaju opštu statističku značajnost niti omogućavaju donošenje zaključaka o uzročno-posledičnim (kauzalnim) vezama. Takođe, pošto je udeo obnovljive energije tokom čitavog posmatranog perioda iznosio 0% (usled snabdevanja iz konvencionalne mreže bez zakupljenih zelenih sertifikata), empirijska provera tog segmenta na ovom uzorku nije bila izvodljiva.

3.3. Empirijski prikazi *ESG* operativnih indikatora

Za inicijalnu kontekstualizaciju ostvarenih rezultata *DCT Kragujevac* i pozicioniranje na širem evropskom ICT tržištu, u Tabeli 1 je prikazan uporedni pregled srodnih data centara u Evropi koji posluju pod istim *EN 50600 Class 4* standardom.

Table 1. Comparative overview of EN 50600 Class 4 certified data centers and key ESG and financial indicators

Tabela 1. Komparativni pregled EN 50600 Class 4 sertifikovanih data centara i ključnih ESG i finansijskih indikatora

Data centar (naziv + lokacija)	EN 50600 Class 4	ESG reporting	PUE	WUE	Udeo obnovljive energije (%)	EBITDA (mil. €)	EBITDA marža (%)	Napomena / Izvor
Beyond.pl Data Center 2, Poznań, Poljska	✓	✓	1.25	1.10	40	12.5	28	Podaci iz godišnjeg izveštaja 2023 (Beyond, 2023)
Talex Data Center (Poznań), Poznań, Poljska	✓	✓	1.30	1.15	35	10.8	25	Podaci iz izveštaja operatera 2023 (Talex, 2023)
Talex Data Center (Wrocław), Wrocław, Poljska	✓	✓	1.28	1.12	38	11.2	26	Podaci iz izveštaja operatera 2023 (Talex, 2023)
European Data Hub, Luksemburg	✓	✓	1.20	1.05	45	14.0	30	Podaci iz publikacije 2023 (Capitoline, 2023)
Data Cloud Technology – DCT Kragujevac, Srbija	✓	✓	1.19	1.04	0	8.5	32	ESG izveštaj 2024 (Data Cloud Technology, 2025) i intervju (Cord magazine, 2024)

Napomena: Prikazana vrednost PUE indikatora za DCT Kragujevac (1,19) odnosi se na stabilno, projektovano stanje objekta pri optimalnom i vršnom kapacitetu opterećenja, što omogućava direktnu i ravnopravnu metodološku komparaciju sa stabilnim operativnim performansama navedenih data centra u Poljskoj i Luksemburgu koji već godinama funkcionišu u punom kapacitetu. Nasuprot tome, u kasnijim delovima rada (analiza kroz godine) biće prikazan stvarni, istorijski proces sukcesivnog operativnog rasta i popunjavanja infrastrukturnih kapaciteta kroz godine (gde početni operativni PUE iznosi 1,88 i postepeno opada ka projektovanom nivou usled ulistavanja novih korisnika).

Takođe, aspekt ekološke održivosti koji se odnosi na udeo obnovljive energije iznosi 0%. Iz tog razloga, neposredna empirijska provera podhipoteze H2 u ovom trenutku nije bila izvodljiva na bazi istorijskih podataka DCT Kragujevac. Razlog za nulti procenat leži u činjenici da se data centar u ovoj fazi razvoja primarno snabdeva električnom energijom direktno iz konvencionalne komercijalne distributivne mreže čiji miks dominantno čine konvencionalni izvori, bez zakupljenih garancija porekla zelenih sertifikata, dok sopstveni solarni kapaciteti ili ugovori o direktnoj kupovini zelene energije (PPA) još uvek nisu integrisani u sistem. Uvrštavanje hipoteze H2 u istraživački deo rada zadržava punu metodološku konzistentnost jer služi kao teorijsko-konceptualni orijentir za buduće faze razvoja i kao važan kontrolni mehanizam koji naglašava realan jaz između proklamovanih ekoloških ciljeva i trenutnih infrastrukturnih i tržišnih mogućnosti u regionu.

3.4. Istorijska analiza operativnih performansi i trendova DCT Kragujevac

U nastavku se daju strukturirani istorijski podaci unutrašnjeg poslovanja DCT Kragujevac za period 2022–2025. godine, koji služe kao empirijska podloga za analizu resursne efikasnosti i izolovanje ekoloških trendova posmatranog objekta.

Table 2. ESG operational indicators of the DCT Kragujevac data center

Tabela 2 - ESG operativni indikatori data centra DCT Kragujevac

Godina	PUE (Power Usage Effectiveness)	WUE (Water Usage Effectiveness) (u odnosu na potrošnju komercijalnih korisnika)	Ukupna potrošnja električne energije (MWh)	Potrošnja IT opreme (komercijalni korisnici) (MWh)	Potrošnja vode (m ³)	Udeo obnovljive energije (%)
2022	-	-				
2023	1.88	3.23	9.097	3.612	11.677	0
2024	1.82	2.14	10.984	4.228	9.062	0
2025	1.75	2.44	12.130	4.908	12.019	0

Analiza prikazanih podataka:

PUE (Power Usage Effectiveness) kontinuirano opada kroz posmatrani period (sa 1,88 na 1,75), što ukazuje na progresivno poboljšanje opšte energetske efikasnosti objekta. Ovaj trend je direktna posledica optimizacije rashladnih i elektroenergetskih podsistema, kao i tehnološkog uteguća infrastrukture.

WUE (Water Usage Effectiveness) indikator pokazuje određenu varijabilnost, uz značajnije poboljšanje u 2024. godini (pad na 2,14) i blago povećanje u 2025. godini (2,44). Ova kretanja korespondiraju sa mikroklimatskim oscilacijama, sezonskim promenama u režimu rada rashladnih sistema i varijacijama u operativnim uslovima eksploatacije objekta.

Ukupna i IT potrošnja energije beleže stabilan rast kroz posmatrane godine. Ovaj rast je u potpunosti usklađen sa fizičkim širenjem kapaciteta i intenzivnijim iskorišćenjem infrastrukture, što je direktno uslovljeno ulistavanjem i priključenjem novih komercijalnih korisnika data centra.

Udeo obnovljive energije kroz čitav posmatrani period konstantno ostaje na 0%. Sa metodološkog aspekta, ovaj podatak još jednom potvrđuje opravdanost nemogućnosti empirijske provere podhipoteze H2 na ovom uzorku, te jasno ukazuje na potrebu za sistemskim uvođenjem održivih izvora ili eksternom nabavkom zelenih sertifikata sa garancijom porekla (poput I-REC sistema) u predstojećim fazama strateškog i tehnološkog razvoja data centra.

Ovi nalazi i identifikovani trendovi predstavljaju polaznu empirijsku osnovu za dalje ispitivanje, modelovanje i korelacionu analizu odnosa između nefinansijskih ESG performansi i ključnih finansijskih rezultata kompanije.

3.5. Finansijski pokazatelji

Tabela 3 sadrži ključne finansijske pokazatelje kompanije DCT Kragujevac za period 2022-2025. godine, uključujući ukupne poslovne prihode, poslovni rezultat, EBITDA, EBITDA maržu, rast prihoda i CAPEX investicije u infrastrukturu. Ovi podaci omogućavaju preciznu ocenu operativne profitabilnosti i investicionog angažmana data centra u kontekstu dugoročne implementacije ESG praksi.

Table 3. Financial indicators (RSD)

Tabela 3 – Finansijski pokazatelji (RSD)

Godina	Ukupni poslovni prihodi (RSD)	Poslovni rezultat (RSD)	EBITDA (RSD)	EBITDA marža (%)	Rast prihoda (%)	CAPEX investicije u infrastrukturu (RSD)
2022	64.165.000	9.168.000	9.203.000	14	344	12.422.000
2023	269.718.000	5.808.000	15.724.000	6	320	66.637.000
2024	400.928.000	14.909.000	41.591.000	10	49	79.674.000
2025	787.770.030	108.344.239	157.274.334	20	96	99.403.000

Na osnovu prikazanih podataka evidentan je rast ukupnih prihoda tokom posmatranog perioda, što ukazuje na ekspanziju poslovanja data centra. EBITDA i EBITDA marža takođe pokazuju uzlazni trend, posebno u 2025. godini, što upućuje na poboljšanje operativne profitabilnosti. Istovremeno, visoke vrednosti CAPEX investicija ukazuju na intenzivan investicioni ciklus usmeren ka razvoju infrastrukture. Ovakva dinamika rasta prihoda i investicija predstavlja važan kontekst za analizu povezanosti između ESG indikatora i finansijskih performansi.

Analiza prikazanih podataka:

Evidentan je snažan rast ukupnih poslovnih prihoda i EBITDA tokom posmatranog četvorogodišnjeg perioda, sa izrazito naglašenim skokom u 2025. godini. Ovakav trend nedvosmisleno ukazuje na uspešnu tržišnu ekspanziju data centra, stabilizaciju operativne profitabilnosti i ekonomiju obima koja nastupa sa većim stepenom popunjenosti kapaciteta.

EBITDA marža pokazuje specifičnu dinamiku; nakon inicijalnog pada u 2023. godini na 5,83% (što je karakteristično za fazu visokih početnih operativnih troškova i ulistavanja prvih korisnika), beleži se stabilan uzlazni trend koji u 2025. godini dostiže maksimalnih 19,96%.

CAPEX investicije progresivno rastu iz godine u godinu (dostižući blizu 100 miliona RSD u 2025. godini), što svedoči o intenzivnom i kontinuiranom investicionom ciklusu. Ova kapitalna ulaganja su direktno usmerena ka tehničko-tehnološkom razvoju infrastrukture, što omogućava skaliranje data centra i ugradnju savremenih, energetski efikasnijih rashladnih i elektroenergetskih sistema.

Ovakva dinamika istovremenog rasta prihoda i kapitalnih investicija predstavlja ključni ekonomski kontekst koji daje osnovu za dalju analizu i adekvatno tumačenje korelacionih odnosa između operativnih ESG performansi i krajnjih finansijskih rezultata.

3.6. Obračun i analiza emisija CO₂

U cilju sveobuhvatne kvantifikacije ekološkog uticaja DCT Kragujevac, Tabela 4 prikazuje Scope 2 emisije stakleničkih gasova (CO₂) za posmatrani period. U skladu sa GHG Protokolom (Greenhouse Gas Protocol) i specifičnostima industrije digitalne infrastrukture, Scope 1 direktne emisije nisu uključene u analizu zbog njihove operativne zanemarljivosti (data centar ne koristi sopstvene fosilne izvore za primarnu proizvodnju energije, izuzev dizel-generatora za krizne situacije koji se testiraju u minimalnim intervalima).

Za obračun Scope 2 (indirektnih) emisija nastalih prevashodno nabavkom električne energije, primenjena su dva ravnopravna metodološka pristupa:

Location-based pristup: Odražava prosečan intenzitet emisija elektroenergetske mreže Republike Srbije u kojoj data centar fizički posluje.

Market-based pristup: Uzima u obzir specifične ugovorne aranžmane i uslove snabdevanja koje kompanija ima sa isporučiocem električne energije.

Table 4. CO₂ emissions**Tabela 4 - Emisija CO₂**

Godina	Scope 2 emisije CO ₂ (tCO ₂ e) - <i>Location-based</i>	Scope 2 emisije CO ₂ (tCO ₂ e) - <i>Market-based</i>	Napomena / Status Scope 1 emisija
2022	-	-	Inicijalni period (objekat bez komercijalnog opterećenja). Scope 1 emisije su zanemarljive.
2023	-	-	Prva operativna godina (sistem za formalni proračun i izveštavanje o emisijama nije bio uspostavljen).
2024	7.846,05	6.035,90	Podaci verifikovani kroz zvanični ESG izveštaj kompanije.
2025	8.617,80	6.210,46	Preliminarni proračun na bazi ukupne godišnje telemetrije potrošnje.

Metodološko pojašnjenje i analiza podataka:

Ograničenje istorijskog niza (2022-2023): Za prve dve godine posmatranog perioda ne postoje raspoloživi podaci o emisijama CO₂. U 2022. godini objekat je bio u fazi testiranja, dok u 2023. godini formalni proračun ugljeničnog otiska još uvek nije bio operativno uveden u praksu izveštavanja kompanije. Ovo ograničenje je jasno istaknuto radi očuvanja transparentnosti i naučnog integriteta rada.

Trend u periodu (2024-2025): Na osnovu raspoloživih empirijskih podataka za poslednje dve godine, uočava se nominalni rast emisija u location-based modelu (sa 7.846,05 na 8.617,80 tCO₂e), što direktno korespondira sa povećanjem ukupne potrošnje električne energije usled širenja kapaciteta i priključenja novih korisnika.

Uticaj tržišnih mehanizama: Bitna razlika u korist market-based modela u 2024. i 2025. godini jasno svedoči o tome da menadžment kroz ugovorne odnose sa snabdevačem optimizuje ekološki otisak. Ipak, pošto je unutrašnji udeo obnovljive energije i dalje 0%, ove vrednosti ukazuju na to da se smanjenje u market-based segmentu ostvaruje eksternim komercijalnim rešenjima (zeleni paketi snabdevača), dok se stvarna lokalna dekarbonizacija očekuje u narednim fazama razvoja.

4. DISKUSIJA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Rezultati empirijske analize ukazuju na kompleksan i slojevit odnos između ESG performansi i finansijskih rezultata u industriji data centara. Na posmatranom uzorku kompanije DCT Kragujevac posebno se izdvajaju i prepliću efekti unutrašnje energetske efikasnosti i intenzivnih infrastrukturnih investicija na krajnju profitabilnost. Kako bi se obezbedio sistematičan uvid u smer i intenzitet kretanja posmatranih varijabli, u Tabeli 5 su sumirani rezultati proračuna Pearsonovog koeficijenta linearne korelacije (r).

Table 5. Pearson correlation coefficient results (N=3)**Tabela 5 - Rezultati Pearsonovog koeficijenta korelacije (N=3)**

Korelacioni odnos (Variable)	Vrijednost koeficijenta (r)	Statistička interpretacija intenziteta trenda
PUE - EBITDA	-0,95	Jaka negativna korelacija
CAPEX - EBITDA	+0,97	Ekstremno jaka pozitivna korelacija
Ukupni prihodi - EBITDA	+0,99	Ekstremno jaka pozitivna korelacija (očekivan odnos)
WUE - EBITDA	-0,41	Slaba negativna korelacija

S obzirom na inherentno ograničenje uzorka koji obuhvata tri pune operativne godine (N=3), obračunati koeficijenti u Tabeli 5 imaju isključivo deskriptivno-indikativan karakter. Oni precizno opisuju istorijsko kretanje i linearne trendove na datom uzorku, ali se metodološki ne mogu koristiti za donošenje opštih statističkih zaključaka niti za automatsko uspostavljanje uzročno-posljedičnih (kauzalnih) veza između posmatranih fenomena. Ekstremno visoke vrednosti pojedinih koeficijenata primarno su odraz istovremenog, paralelnog linearnog rasta fizičkih kapaciteta objekta i tehnološke optimizacije sistema u početnoj fazi operativnog rada. Rezultati prikazani u Tabeli 5

pružaju empirijsku podlogu za evaluaciju postavljenih hipoteza. Snažna negativna korelacija između PUE i EBITDA ($r = -0,95$), kao i pozitivan trend kretanja ESG kompozitnog indeksa sa profitabilnošću, pružaju direktnu podršku glavnoj hipotezi (H_0), dokazujući da je primena ESG praksi, posmatrana kroz pokazatelje energetske i resursne efikasnosti, pozitivno povezana sa finansijskim performansama data centra. Ipak, intenzitet te veze se ne može posmatrati izolovano, već u svetlu snažnog investicionog ciklusa koji prati objekat.

4.1. Analiza ekoloških performansi (E) i operativne profitabilnosti

Empirijski podaci ukazuju na kontinuirano poboljšanje energetske efikasnosti data centra *DCT Kragujevac* u posmatranom periodu. Vrednosti ključnog indikatora *PUE* linearno opadaju sa 1,88 u 2023. godini na 1,75 u 2025. godini.

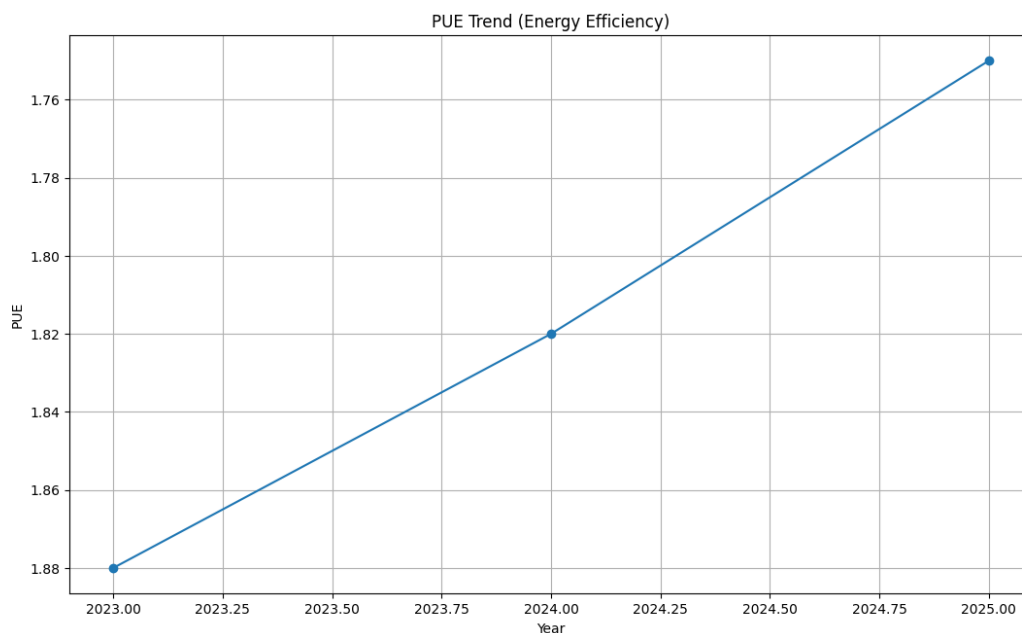


Figure 1. PUE trend (Energy efficiency of DCT Kragujevac)

Slika 1. Trend PUE pokazatelja (energetska efikasnost DCT Kragujevac)

Ovaj opadajući trend *PUE* vrednosti svedoči o uspešnoj tehničkoj optimizaciji elektroenergetskih i rashladnih podсистема pod nadzorom inženjerskih službi objekta. Smanjenje gubitaka energije i prateće unapređenje resursne efikasnosti potvrđuju da dimenzija "E" (*Environmental*) unutar *ESG* okvira poseduje direktnu operativnu relevantnost. Dobijeni nalazi su u potpunoj metodološkoj saglasnosti sa savremenom literaturom (Fieni et al., 2025; Patel, 2025), u kojoj se ističe da je optimizacija *PUE* indikatora primarni mikrotehnički mehanizam za kontrolu i redukciju operativnih troškova unutar savremenih data centara.

Paralelno sa optimizacijom energetske efikasnosti, posmatrani finansijski podaci *DCT Kragujevac* beleže snažan i stabilan rast operativne profitabilnosti, sa naročito izraženim skokom *EBITDA* pokazatelja u 2025. godini.

U savremenoj ekonomskoj literaturi naglašava se da data centri, kao izrazito kapitalno intenzivni sistemi, ostvaruju inicijalni rast profitabilnosti dominantno kroz širenje komercijalnih kapaciteta, ulistavanje novih korisnika i posledičnu optimizaciju fiksnih operativnih troškova po jedinici opterećenja (Abiodun, 2025).

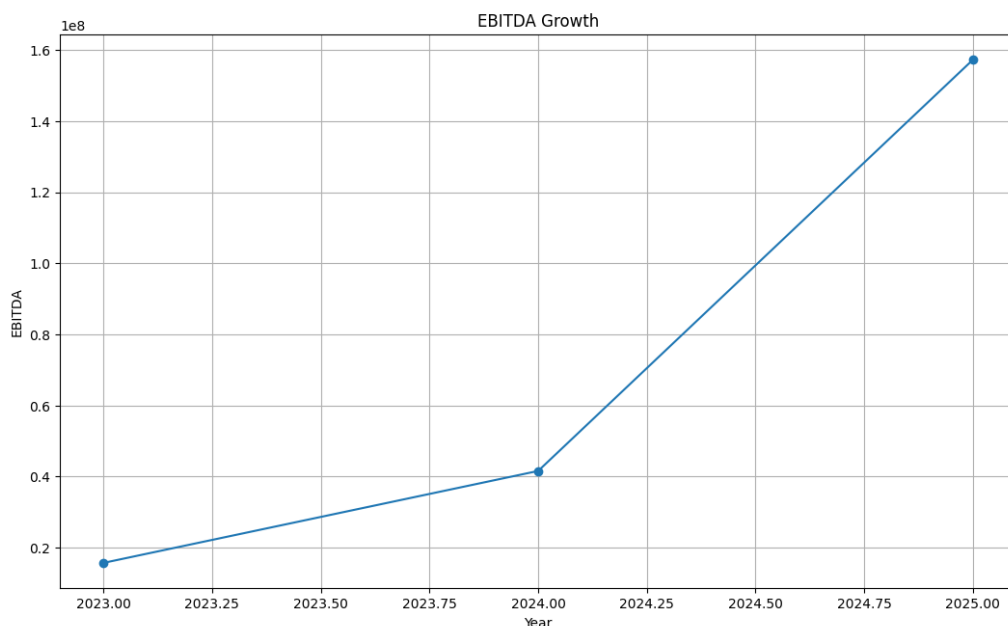


Figure 2. EBITDA growth trend (Operating profitability)

Slika 2. Trend rasta EBITDA (operativna profitabilnost)

Analiza korelacije između PUE i EBITDA otkrila je snažnu negativnu vezu ($r = -0,95$). Sa deskriptivnog aspekta, ovaj rezultat potvrđuje da su niže (povoljnije) vrednosti PUE indikatora istorijski praćene višim vrednostima EBITDA.

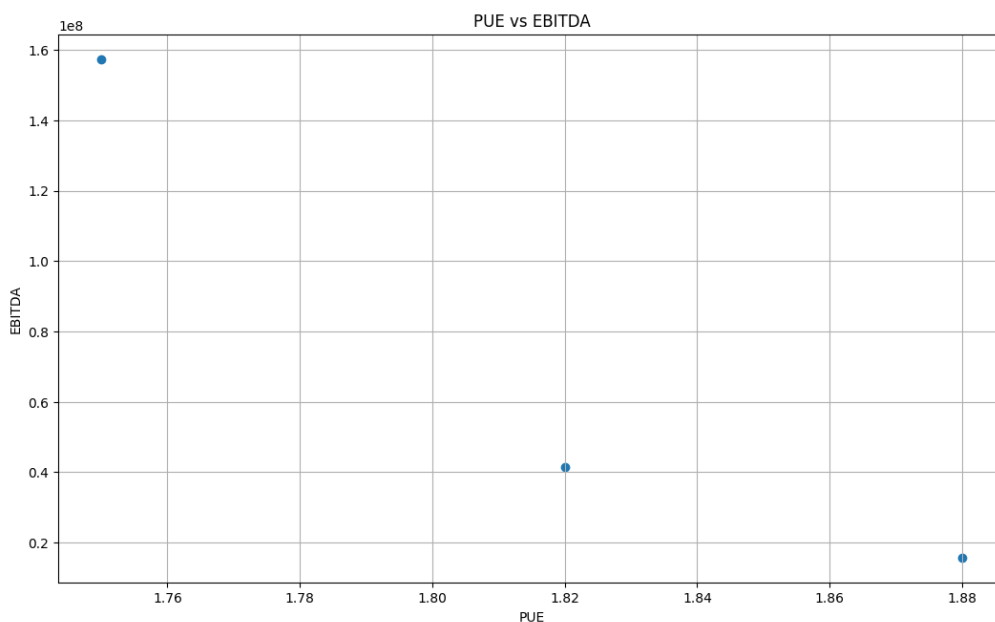


Figure 3. Relationship between PUE and EBITDA

Slika 3. Odnos između PUE i EBITDA

Iako ovaj rezultat pruža empirijsku podršku postavljenoj hipotezi H1 - prema kojoj unapređenje energetske efikasnosti pozitivno korespondira sa finansijskim performansama - visoka vrednost koeficijenta se ne sme interpretirati kao izolovana kauzalnost. Uštede ostvarene smanjenjem energetske gubitaka svakako optimizuju troškovnu stranu bilansa uspeha (što je u skladu sa nalazima Kim et al., 2024), ali one predstavljaju samo jedan od elemenata u složenom mehanizmu rasta profitabilnosti.

Nasuprot stabilnom trendu energetske efikasnosti, indikator efikasnosti korišćenja vode (WUE) pokazuje varijabilnu dinamiku (pad na 2,14 u 2024. godini, nakon čega sledi blagi rast na 2,44 u 2025. godini).

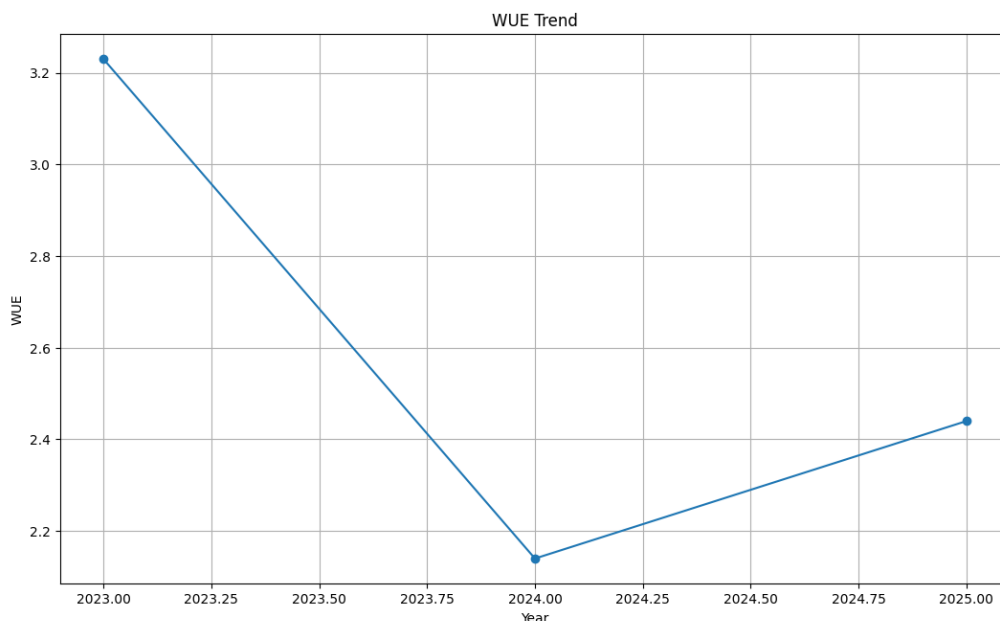


Figure 4. WUE trend (Water usage effectiveness)

Slika 4. Trend WUE pokazatelja (efikasnost korišćenja vode)

Ovakva fluktuacija implicira visoku zavisnost *WUE* indikatora od eksternih klimatskih i sezonskih oscilacija, kao i od trenutnih režima rada rashladnih tornjeva pod različitim nivoima IT opterećenja objekta. Slaba negativna korelacija sa profitabilnošću ($r = -0,41$) potvrđuje teorijske stavove iz literature da *WUE*, iako ekološki značajan, predstavlja sekundarni i znatno manje stabilan finansijski indikator u poređenju sa *PUE*, posebno u IT intenzivnim infrastrukturnim sistemima (Lei et al., 2025).

4.2. Tržišna ekspanzija, CAPEX ciklus i testiranje hipoteza

Ukupni poslovni prihodi DCT Kragujevac beleže izrazitu ekspanziju tokom posmatranog četvorogodišnjeg perioda, reflektujući visoku tržišnu potražnju za uslugama data centra.

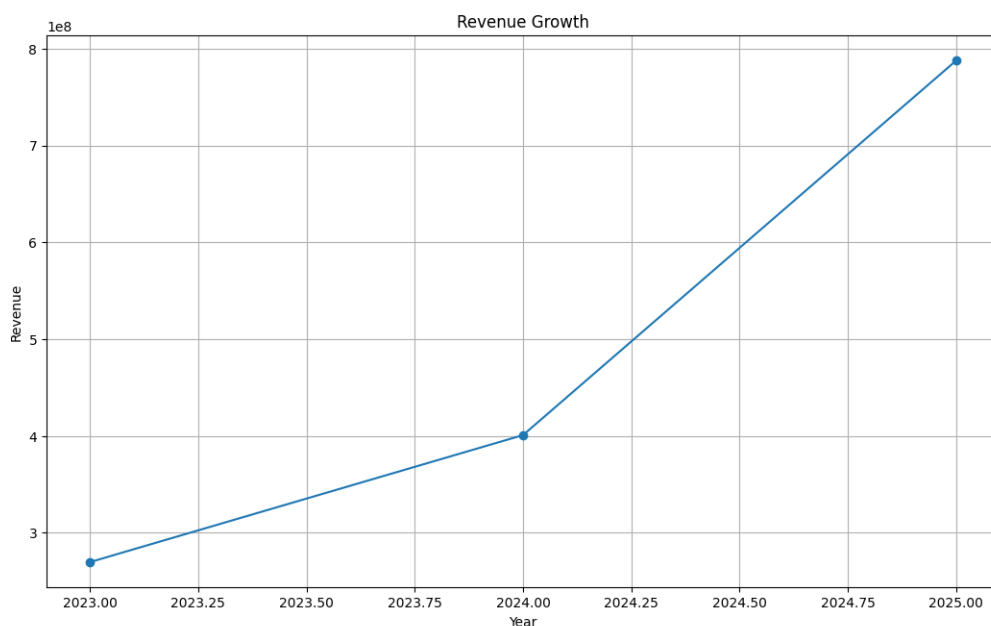


Figure 5. Revenue growth trend of DCT Kragujevac

Slika 5. Trend rasta prihoda DCT Kragujevac

Međutim, s obzirom na to da je udeo obnovljive energije u unutrašnjoj strukturi potrošnje tokom čitavog perioda iznosio 0%, neposredna empirijska provera podhipoteze H2 (o uticaju zelenih izvora na rast prihoda) na ovom uzorku nije bila izvodljiva. Dobijeni nulti procenat jasno dokazuje da ostvareni rast prihoda nije bio generisan ekološkom diferencijacijom ili upotrebom održivih izvora, već isključivo agresivnom tržišnom ekspanzijom i sukcesivnim ulistavanjem komercijalnih korisnika na konvencionalnu mrežu. Ova pojava ilustruje čest fenomen u ICT industriji u razvoju, gde ESG tranzicija i uvođenje zelenih sertifikata privremeno zaostaju za primarnim finansijskim i tehnološkim širenjem (Gungor & Saglam, 2025).

Da bi se precizno razumio bazični pogonski mehanizam unutrašnje efikasnosti, Slika 6 prikazuje odnos između ukupne potrošnje električne energije objekta i stvarne potrošnje same IT opreme komercijalnih korisnika.

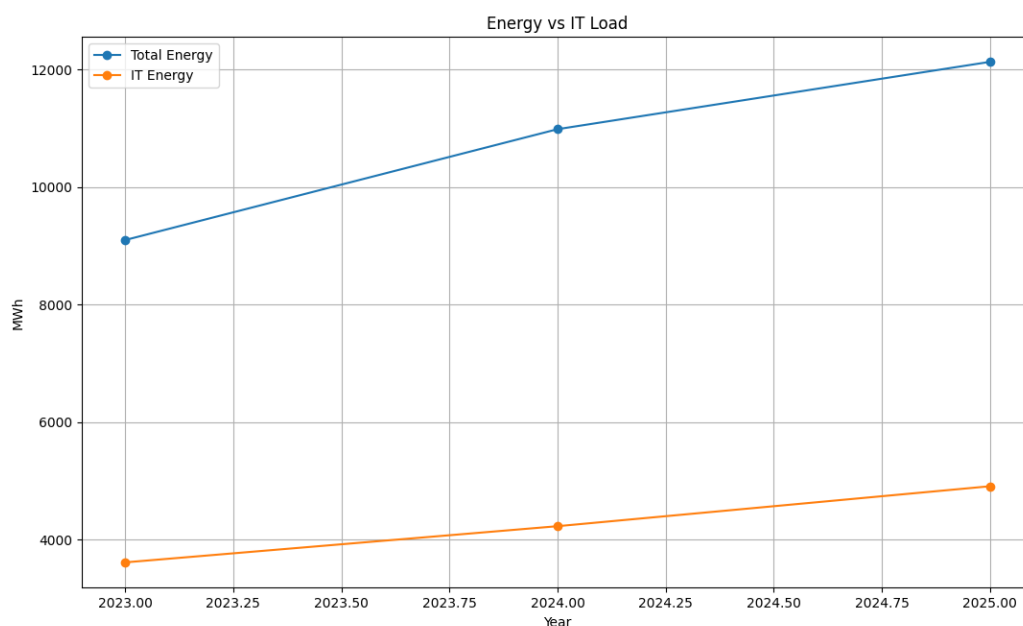


Figure 6. Relationship between total energy consumption and IT load
Slika 6. Odnos ukupne potrošnje energije i IT opterećenja

Uočeni paralelni rast oba pokazatelja, uz progresivno smanjivanje jaza između njih, predstavlja ključni tehnički preduslov koji je omogućio pad PUE vrednosti. Veća popunjenost i intenzivnije korišćenje instalirane infrastrukture direktno povećavaju korisnu IT potrošnju u odnosu na režijske troškove hlađenja i napajanja zgrade.

U tom kontekstu, proračunata ekstremno visoka pozitivna korelacija između kapitalnih investicija (CAPEX) i EBITDA ($r = 0,97$) zahteva duboko i rigorozno ekonomsko tumačenje.

Ovaj rezultat nedvosmisleno implicira da je zabeleženi rast profitabilnosti DCT Kragujevac primarno vođen intenzivnim investicionim ciklusom i fizičkim skaliranjem kapaciteta, a ne izolovano unutrašnjim ESG performansama. Kao izrazito kapitalno intenzivan sistem, data centar ostvaruje klasičnu ekonomiju obima kroz kontinuiranu ugradnju nove IT i rashladne opreme visoke vrijednosti.

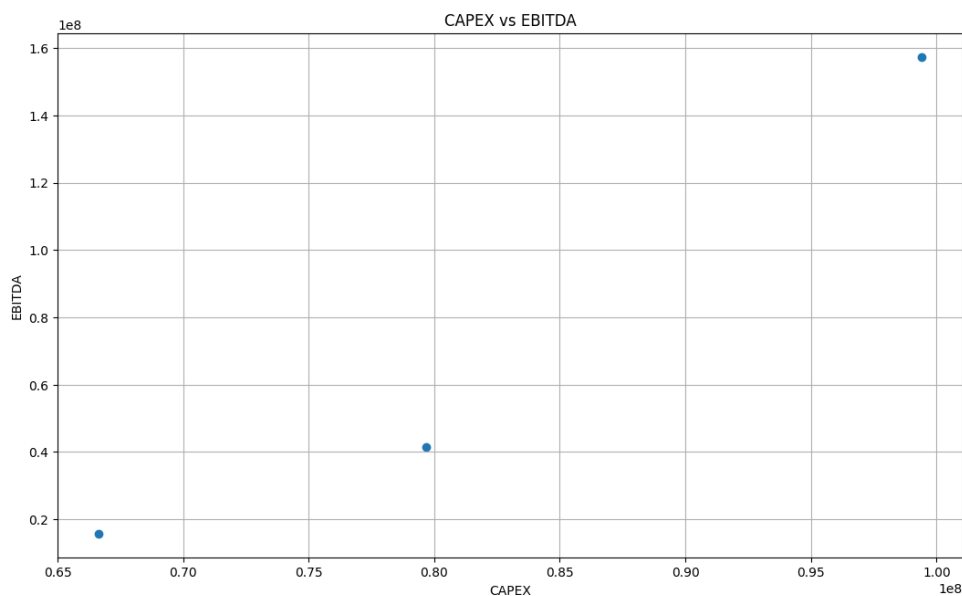


Figure 7. Relationship between CAPEX investments and EBITDA

Slika 7. Odnos između CAPEX investicija i EBITDA

Iako ova savremena oprema imanentno donosi bolju energetska efikasnost (što se reflektuje kroz pad PUE pokazatelja), sam rast EBITDA je direktna funkcija generisanja novih infrastrukturnih kapaciteta, privlačenja velikih "anchor" korisnika i širenja palete usluga na tržištu. Shodno tome, na ovom stepenu razvoja, ESG performanse deluju prvenstveno kao podržavajući (korektivni) faktor koji uspešno optimizuje troškove na nivou jedinice opterećenja, dok su kapitalne investicije (CAPEX) primarni i dominantni pokretač ukupnog finansijskog rasta. Ovakav nalaz je u potpunosti usklađen sa industrijskim standardima koji potvrđuju da je finansijska dinamika u ranim fazama operativnog ciklusa data centara pod direktnim i dominantnim uticajem investicione strategije i kapitalnih ulaganja (Colocation America, 2023).

4.3. ESG kompozitni indeks

U cilju sintetizovanja operativnih ekoloških performansi, metodom normalizacije i ponderisanja unutrašnjih PUE i WUE pokazatelja formiran je eksperimentalni ESG kompozitni indeks. Analiza njegovog odnosa sa operativnim rezultatom (EBITDA) otkriva pozitivan trend kretanja.

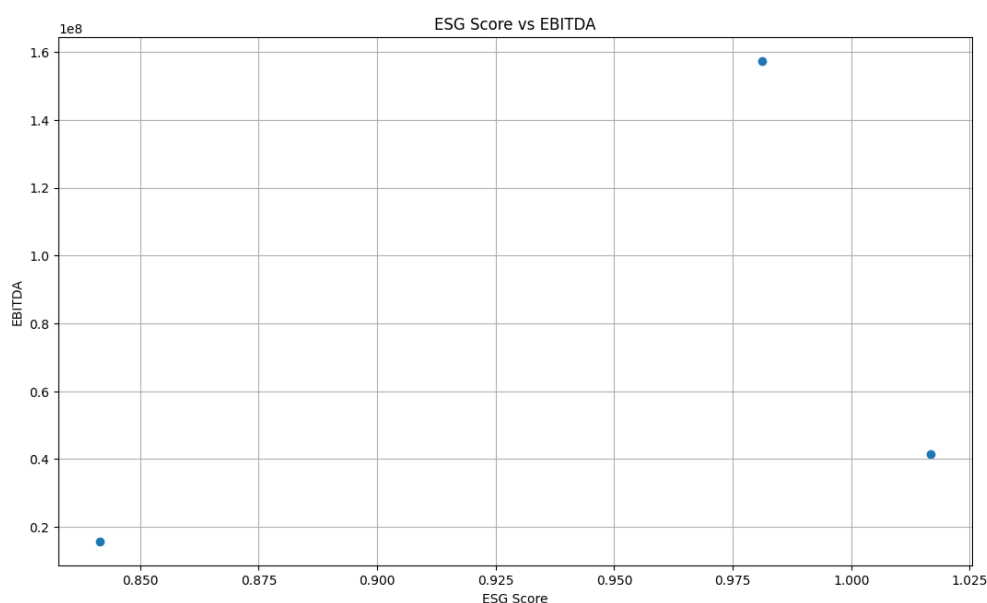


Figure 8. Relationship between the ESG composite index and EBITDA

Slika 8. Odnos ESG kompozitnog indeksa i EBITDA

Ovaj rezultat pruža direktnu empirijsku potvrdu za H3, predočavajući da integrisane ESG performanse pozitivno korespondiraju sa ekonomskom uspešnošću data centra. Međutim, posmatran u korelaciji sa ekstremno dominantnim uticajem CAPEX-a, kompozitni ESG indeks jasno potvrđuje svoju sekundarnu, stabilizirajuću ulogu u finansijskoj arhitekturi kompanije.

Sveukupno posmatrano, rezultati istraživanja na uzorku DCT Kragujevac sugerišu da se finansijska održivost modernih data centara zasniva na integrisanom pristupu: kapitalne investicije obezbeđuju neophodno skaliranje i tržišnu ekspanziju, dok kontinuirano ESG utegnuće operativnih indikatora (poput energetske efikasnosti) osigurava da se taj rast odvija uz minimalne resursne gubitke i optimizovane operativne troškove. Zbog prepoznatih ograničenja u pogledu veličine istorijskog niza, ovi empirijski trendovi predstavljaju vredan eksplorativni orijentir koji zahteva dalju validaciju u narednim fazama tehnološkog razvoja objekta i na širim regionalnim uzorcima.

5. ZAKLJUČAK

Sprovedeno istraživanje na primeru data centra DCT Kragujevac pruža empirijski uvid u dinamiku odnosa između operativnih ESG performansi i ključnih finansijskih pokazatelja u ranoj fazi razvoja kapitalno intenzivne digitalne infrastrukture. Na osnovu detaljne analize trendova i proračuna Pearsonovih koeficijenata korelacije za period 2022-2025. godine, mogu se izvesti sledeći zaključci:

Potvrda krovne istraživačke postavke (Glavna hipoteza H0): Empirijski rezultati analize poslovanja DCT Kragujevac pružaju podršku glavnoj hipotezi rada (H0). Dokazano je da je primena ESG praksi, izražena kroz pokazatelje energetske (PUE) i resursne (WUE) efikasnosti, pozitivno povezana sa finansijskim performansama data centra, prvenstveno kroz dugoročnu optimizaciju operativnih troškova i smanjenje resursnih gubitaka po jedinici IT opterećenja.

Energetska efikasnost kao stabilan operativni oslonac (Potvrda hipoteze H1): Kontinuirani pad PUE pokazatelja sa 1,88 na 1,75 svedoči o uspešnoj tehničkoj optimizaciji i resursnoj efikasnosti objekta. Zabeležena snažna negativna korelacija sa EBITDA ($r = -0,95$) potvrđuje da povećanje energetske efikasnosti linearno prati rast operativne profitabilnosti, primarno kroz mehanizam redukcije operativnih troškova po jedinici IT opterećenja.

Ograničenja tržišta i ekološke tranzicije (Status hipoteze H2): Usled činjenice da je udeo obnovljive energije u unutrašnjoj strukturi potrošnje iznosio 0%, neposredna empirijska verifikacija hipoteze H2 na ovom uzorku nije bila izvodljiva. Nulti procenat zelene energije jasno ukazuje na to da je eksplozivni rast prihoda u posmatranom periodu bio isključivo rezultat agresivne tržišne ekspanzije i popunjavanja infrastrukturnih kapaciteta kroz konvencionalnu elektroenergetsku mrežu, što reflektuje regionalne izazove u dostupnosti zelenih sertifikata.

Sveobuhvatni uticaj održivosti na efikasnost (Potvrda hipoteze H3): Formiranjem i analizom ESG kompozitnog indeksa detektovan je pozitivan smer kretanja sa operativnom profitabilnošću (EBITDA), čime je uspešno potvrđena hipoteza H3. Ovaj nalaz dokazuje da holističko praćenje i optimizacija nefinansijskih performansi korelira sa dugoročnom ekonomskom stabilnošću data centra.

Dominacija investicionog ciklusa (CAPEX): Ekstremno visoka pozitivna korelacija između CAPEX investicija i EBITDA ($r = 0,97$) jasno diferencira bazični pokretač finansijskog rasta. Rezultati nedvosmisleno pokazuju da je rast profitabilnosti u ovoj fazi operativnog ciklusa primarno vođen kapitalnim ulaganjima i fizičkim skaliranjem kapaciteta (ekonomija obima). U tom kontekstu, ESG performanse deluju kao važan podržavajući i stabilizirajući faktor, dok CAPEX predstavlja primarnu pogonsku snagu ekonomske održivosti.

Metodološka ograničenja i smernice za buduća istraživanja: Ključno ograničenje ovog rada odnosi se na kratak istorijski niz podataka ($N=3$), zbog čega obračunati koeficijenti korelacije imaju deskriptivno-indikativan karakter i ne mogu se generalizovati kao opšti kauzalni odnosi.

Budući pravci istraživanja trebali bi da obuhvate proširenje vremenske serije podataka, analizu Scope 3 emisija i evaluaciju finansijskih efekata onog trenutka kada DCT Kragujevac integriše sopstvene solarne kapacitete ili PPA ugovore o kupovini zelene energije.

Rad dokazuje da održivost modernih data centara zahteva integrisani menadžerski pristup. Finansijski uspeh i tržišna ekspanzija generišu se kroz strateški vođene kapitalne investicije, dok sistematsko unapređenje unutrašnjih ESG indikatora obezbeđuje da se taj rast odvija na resursno efikasan, ekološki optimizovan i dugoročno održiv način.

6. REFERENCE

- [1] Abiodun, K. (2025). Digital infrastructure & sustainable data centers investment in Africa: Role of Tier III & Tier IV. *Int. J. Multidiscip. Res. Growth Eval*, 6, 1878-1888. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2025.6.1-1878-1888>
- [2] Anufrijev, A. (2024). Unapređenje čistije proizvodnje emisijama zelenih obveznica - izazovi i slabosti. *REVIZOR * Časopis Za Upravljanje Organizacijama, Finansije i Reviziju*, 27(108), 175-200. <https://doi.org/10.46793/Rev24108175A>
- [3] Beyond, (2023). Beyond.pl data center with EN 50600 certification, from <https://www.beyond.pl/en/newsroom/press-releases/beyond-pl-data-center-with-en-50600-certification/>
- [4] Capitoline, (2023). European Data Hub and CBRE gains Europe's first EN50600 Class 4e certificate, from <https://www.capitoline.org/project/european-data-hub-and-cbre-achieve-europes-first-en50600-class-4e-certification/>
- [5] CEN/CENELEC/ETSI. (2021). Review of standardisation activities Energy Management and Environmental Viability of Data Centres, https://www.cenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN%20sectors/Digital%20Society/Green%20Data%20Centres/brochuredatacentrestandardizationedition8_2021.pdf
- [6] Colocation America, Data Center Standards (Tiers I-IV), <https://www.colocationamerica.com/data-center/tier-standards-overview>
- [7] Cord magazine, (2024). AI sve prisutnija u industriji, from <https://cordmagazine.com/sr/biznis/price-uspesnih/danilo-savic-data-cloud-technology-ai-sve-prisutnija-u-industriji/>
- [8] Data Cloud Technology, (2025). Usvojen prvi ESG izveštaj Data Cloud Technology: Posvećeni održivoj budućnosti, from <https://www.dct.rs/sr/vesti/usvojen-prvi-esg-izve%C5%A1taj-data-cloud-technology-posve%C4%87eni-odr%C5%BEivoj-budu%C4%87nosti.html>
- [9] Dimitrijević, D., Milutinović, S., & Stanković, P. (2024). Determinante nastupanja finansijskih neprilika kod srednjih i velikih javnih akcionarskih društava. *Ekonomski Horizonti*, Volumen 26, Sveska 3, 301 - 319. <https://doi:10.5937/ekonhor2403301D>
- [10] Fieni, G., Rouvoy, R., & Seinturier, L. (2025). "xxPUE: Extending Power Usage Effectiveness Metrics For Cloud Infrastructures," in *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, vol. 10, no. 5, pp. 908-920, Sept.-Oct. 2025, <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2025.3549687>.
- [11] Gungor, S., & Saglam, B. M. (2025). Energetska neizvesnost i nestabilnost tržišta akcija - dokazi iz najbogatijih ekonomija sveta primenom GARCH-MIDAS pristupa. *Ekonomski horizonti*, 27(2), 135-149. <https://doi.org/10.5937/ekonhor2502135G>
- [12] Institut za standardizaciju Srbije. (2020). SRPS EN 50600-1:2020 Informacione tehnologije - Objekti i infrastruktura centara za obradu podataka- Deo 1: Opšti koncepti, https://iss.rs/sr_Latn/project/show/iss:proj:67548
- [13] International Energy Agency (IEA). (2026). Electricity 2026: Analysis and forecast to 2030. IEA, Paris. https://iea.blob.core.windows.net/assets/b73798cb-e452-42b9-9d8a-07542de7a041/Electricity_2026.pdf
- [14] Kananen, S. (2024). EN 50600-standardien mukaiset energiatehokkuus-laskennat CSC:n Kajaanin datakeskuksissa, Kajaani University of Applied Sciences (KAMK), <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2024050810231>
- [15] Kim, J. H., Shin, D. U., & Kim, H. (2024). Data Center Energy Evaluation Tool Development and Analysis of Power Usage Effectiveness with Different Economizer Types in Various Climate Zones. *Buildings*, 14(1), 299. <https://doi.org/10.3390/buildings14010299>
- [16] Lazarević, B., Davidović, V., Vičentijević, K., & Kurtanović, M. (2026). Izazovi integracije ESG principa i veštačke inteligencije u menadžmentu prodaje. *Marketing*, 57(1), 49-60. <https://doi.org/10.5937/mkng2601049L>
- [17] Lei, N., Lu, J., Shehabi, A., & Masanet, E. (2025). The water use of data center workloads: A review and assessment of key determinants. *Resources, Conservation and Recycling*, 219, 108310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108310>
- [18] Lojanica, N., Pantović, D., Dimitrijević, M., Obradović, S., & Nancu, D. (2025). The Effects of Renewable Energy, Economic Growth, and Trade on CO2 Emissions in the EU-15. *Energies*, 18(16), 4363. <https://doi.org/10.3390/en18164363>
- [19] Manić, S., & Glišić, I. (2025). Strane direktne investicije i/ili institucije u funkciji rasta Zapadnog Balkana - očekuj (ne)očekivano. *Ekonomski horizonti*, 27(3), 247-260. <https://doi.org/10.5937/ekonhor2503247G>
- [20] Mostak, S., Tanjim, T., Akther, M. S., Shuvo, J. K., Solaiman, M., Rokon, A. A. M., & Shahjalal, M. (2025). Upravljanje zelenim otpadom i strategije za smanjenje troškova otpada u krojačkim pogonima industrije odeće. *Tekstilna industrija*, 73(3), 40-49. <https://doi.org/10.5937/tekstind2503040M>
- [21] Patel, R. (2025). Machine Learning (ML)-Via Power Usage Effectiveness (PUE) Estimation for Energy-Efficient Cloud Data Centers, *World Conference on Communication & Computing (WCONF)*, Raipur, India, pp. 1-6, doi:10.1109/WCONF64849.2025.11233352.
- [22] Raletić, J. S., Jovičić, D., & Damjanović, J. (2025). Iskustvo potrošača kao osnov ekološki odgovorne trgovine u regionu bivše Jugoslavije. *Marketing*, 56(3), 233-245. <https://doi.org/10.5937/mkng2503233R>
- [23] Spalević, Ž., & Vičentijević, K. (2024). Integrating the green law into the sustainability of economic entities. *International Review*, 3-4, 165-170. <https://doi.org/10.5937/intrev2404165STalex>, (2023). Talex Data Center with EN 50600, from <https://www.talex.pl/en/talex-data-center-with-en-50600/>

- [24] Techerati, The EN 50600: How to meet the European standard for data centres, <https://www.techerati.com/features-hub/opinions/the-en-50600-how-to-meet-the-european-standard-for-data-centres/>
- [25] TÜV NORD, (2012). EN 50600 (DC), from <https://www.tuev-nord.de/en/services/auditing-and-certification/en-50600/>
- [26] Uptime Institute. Tier Classification System, from <https://uptimeinstitute.com/tiers>

Corresponding author:

Biljana Lazarević

Senior Consultant

Data Cloud Technology d.o.o., Kragujevac;

phone: +381 69 55 45 717

biljana.lazarevic@casaforte.rs

SINERGIJA PROIZVODNJE PAPIRA I PRERADE OTPADNE VODE I PUT KA EFIKASNIJEM BIOLOŠKOM TRETMANU

THE SYNERGY OF PAPER PRODUCTION AND WASTEWATER TREATMENT AND THE PATH TO MORE EFFICIENT BIOLOGICAL TREATMENT

Marko Anđelković

Smurfit Westrock d.o.o, Beograd, Srbija

IZVOD

Postrojenje za biološki tretman otpadnih voda u kompaniji Smurfit Westrock Beograd pušteno je u rad 2023. godine kao prvo privatno postrojenje ovog tipa u Republici Srbiji. Tokom eksploatacije identifikovan je niz mogućnosti za unapređenje rada sistema kroz optimizaciju anaerobnog i aerobnog tretmana, upravljanje nutrijentima, kontrolu temperature procesne vode, unapređenje merenja procesnih parametara i doradu pojedinih tehnoloških celina. Implementirane mere obuhvatile su povećanje zapremine procesne vode radi kontrole kiselosti, izmenu logike doziranja nutrijenata, unapređenje procesa denitrifikacije, automatizaciju održavanja senzora, kao i više infrastrukturnih i procesnih modifikacija. Ostvareni rezultati potvrđuju značaj integrisanog pristupa između proizvodnje papira i postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, uz značajno unapređenje stabilnosti procesa i efikasnosti biološkog tretmana.

Ključne reči: PPOV, anaerobni tretman, aerobni tretman, IC reaktor, VFA, acidifikacija, denitrifikacija, papirna industrija.

ABSTRACT

The biological wastewater treatment plant at Smurfit Westrock Belgrade was commissioned in 2023 as the first private facility of its kind in the Republic of Serbia. During operation, several opportunities for process improvement were identified through the optimization of anaerobic and aerobic treatment, nutrient management, process water temperature control, monitoring systems, and upgrades of selected treatment units. Implemented measures included increasing process water retention volume to improve acidification control, modifying nutrient dosing logic, enhancing denitrification performance, automating sensor maintenance, and introducing several infrastructural and operational improvements. The achieved results demonstrate the importance of integrating paper production and wastewater treatment processes, leading to improved process stability and higher biological treatment efficiency.

Keywords: WWTP, anaerobic treatment, aerobic treatment, IC reactor, VFA, acidification, denitrification, paper industry.

POSTROJENJE ZA PRERADU OTPADNE VODE U SMURFIT WESTROCK BEOGRAD

Postrojenje za biološki tretman otpadnih voda u kompaniji Smurfit Westrock Beograd (SWB) izgrađeno je i pušteno u rad tokom 2023. godine, kao prvo privatno postrojenje ovog tipa u Republici Srbiji. Postrojenje je projektovano prema standardizovanom konceptu (blueprint-u) koji se primenjuje i na drugim postrojenjima unutar grupacije Smurfit Westrock.

Proces proizvodnje u kompaniji Smurfit Westrock karakteriše visok stepen recirkulacije i ponovne upotrebe vode. Na postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV) doprema se deo mehanički prečišćene procesne vode, nakon tretmana na flotatoru, sa koncentracijom ukupnih suspendovanih materija (TSS) manjom od 300 mg/l. Nakon mehaničkog predtretmana, otpadna voda prolazi kroz fazu kondicioniranja, koja obuhvata dodavanje nutrijenata i korekciju pH vrednosti, a zatim kroz anaerobni i aerobni tretman, nakon čega sledi taloženje (Slika 1.).

Posmatrano sa aspekta dominantnih biohemijskih procesa, anaerobni tretman obuhvata faze hidrolize, acidogeneze, acetogeneze i metanogeneze. Aerobni tretman zasniva se na procesima oksidacije organske materije, aerobne hidrolize, nitrifikacije i denitrifikacije.

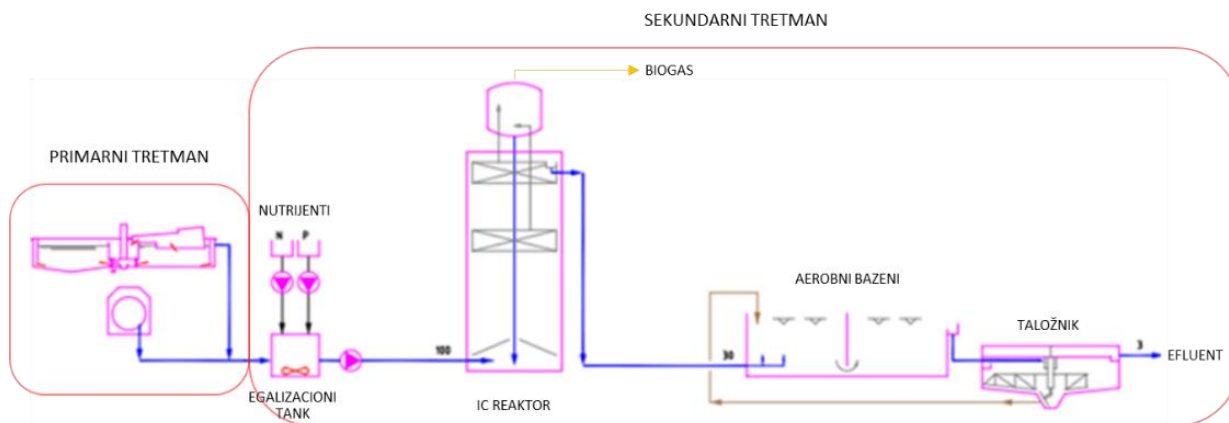


Figure 1. Schematic representation of primary and secondary wastewater treatment in SWB

Slika 1. Šematski prikaz primarnog i sekundarnog tretmana otpadne vode u SWB

ZAKONSKA REGULATIVA U RS

Prema važećoj regulativi, proizvodi u SWB se svrstavaju u grupu Papiri i kartoni proizvedeni pretežno od otpadnog papira.

Table 1. Emission limit values at the point of discharge into surface waters

Tabela 1. Granične vrednosti emisije na mestu ispuštanja u površinske vode

Parametar	Jedinica mere	Granična vrednost
Hemijska potrošnja kiseonika (HPK)	kg O ₂ / t	5
Biohemijska potrošnja kiseonika (BPK ₅)	mg O ₂ / l	25
Ukupni neorganski azot (NH ₄ -N, NO ₃ -N, NO ₂ -N)	mg/l	10
Ukupni fosfor	mg/l	2
Adsorbujući organski halogenidi (AOX)	kg/t	0,012

HEMIJSKA POTROŠNJA KISEONIKA (HPK) / CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD)

Hemijska potrošnja kiseonika predstavlja jedan od najznačajnijih pokazatelja opterećenja otpadnih voda organskim materijama. Hemijska potrošnja kiseonika (HPK, engl. Chemical Oxygen Demand – COD) predstavlja ukupnu količinu kiseonika potrebnu za hemijsku oksidaciju organskih materija prisutnih u vodi i jedan je od najvažnijih parametara za karakterizaciju opterećenja otpadnih voda. Međutim, sama vrednost COD ne pruža informacije o biorazgradivosti organske materije, zbog čega se ukupni COD deli na pojedinačne frakcije prema njihovoj dostupnosti mikroorganizmima i mogućnosti biološke razgradnje.

Ukupni COD (COD_t) sastoji se od lako biorazgradive rastvorene frakcije (SS), sporo biorazgradive čestične frakcije (XS), rastvorene inertne frakcije (SI) i čestične inertne frakcije (XI) – Slika 2. Lako biorazgradiva frakcija (SS) predstavlja organsku materiju koja je neposredno dostupna mikroorganizmima i obuhvata, između ostalog, isparljive masne kiseline (VFA), jednostavne šećere i druge rastvorene organske materije. Sporo biorazgradiva frakcija (XS) sastoji se od suspendovanih organskih materija koje prethodno moraju proći proces hidrolize pre nego što postanu dostupne mikroorganizmima. Inertne frakcije (SI i XI) ne učestvuju značajno u biološkoj razgradnji i uglavnom prolaze kroz sistem ili se uklanjaju zajedno sa viškom mulja.

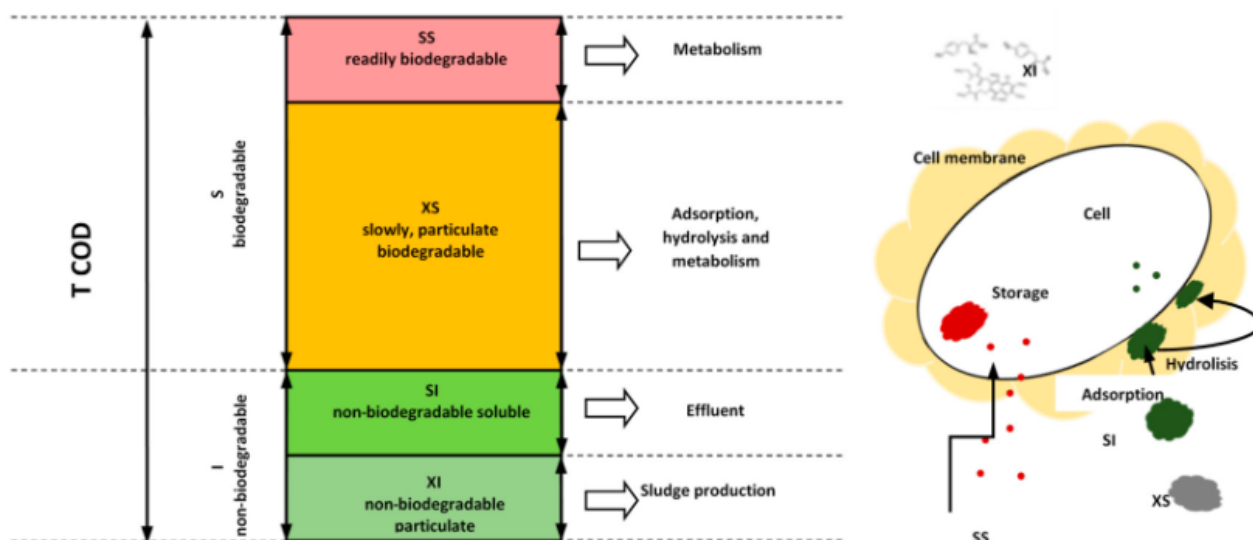


Figure 2. Schematic representation of COD fractions
Slika 2. Šematski prikaz COD frakcija

Raspodela COD-a na pojedinačne frakcije omogućava bolje razumevanje ponašanja organske materije u anaerobnim i aerobnim procesima, procenu potencijala za biološku razgradnju i efikasnije upravljanje radom postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda.

Pored COD-a, značajan pokazatelj karakteristika otpadne vode predstavlja i biohemijska potrošnja kiseonika (BPK, engl. Biochemical Oxygen Demand – BOD), koja predstavlja količinu kiseonika potrebnu mikroorganizmima za biološku razgradnju organske materije u definisanom vremenskom periodu. Za razliku od COD-a, koji obuhvata ukupnu organsku materiju podložnu hemijskoj oksidaciji, BOD predstavlja samo njen biorazgradivi deo. Zbog toga odnos BOD i COD daje važnu informaciju o stepenu biorazgradivosti otpadne vode i potencijalu za biološki tretman. U kontekstu frakcionacije, najveći doprinos BOD-u daju lako biorazgradiva rastvorena frakcija (SS) i sporo biorazgradiva čestična frakcija (XS), dok inertne frakcije (SI i XI) ne doprinose značajno vrednosti BOD-a.

Poseban značaj u anaerobnom tretmanu ima lako biorazgradiva rastvorena frakcija (SS), a naročito njen deo koji čine isparljive masne kiseline (VFA), koje predstavljaju direktan supstrat za metanogene mikroorganizme.

UVOD

U narednim poglavljima biće prikazane i analizirane sve dodatne aktivnosti i unapređenja koja su realizovana na postrojenju za PPOV od trenutka njegovog puštanja u rad. Obrada će biti organizovana prema procesnim celinama i tehnološkim funkcijama, a ne hronološki prema vremenu izvođenja pojedinačnih intervencija. Ovakav pristup omogućava sistematičniji pregled primenjenih rešenja, bolju preglednost uticaja pojedinačnih procesa na ukupne performanse PPOV, kao i jasnije sagledavanje međusobne povezanosti tehnoloških faza u okviru sistema prečišćavanja.

1. VFA I PROŠIRENJE ZAPREMINE PROCESNE VODE

Isparljive masne kiseline (VFA – Volatile Fatty Acids) predstavljaju ključne međuproizvode anaerobne razgradnje organske materije. Nastaju tokom procesa hidrolize i acidogeneze, pri čemu se složena organska jedinjenja prevode u jednostavnije organske kiseline, pre svega sirćetnu, propionsku i buternu kiselinu. VFA predstavljaju direktan supstrat za metanogene mikroorganizme, koji ih u završnoj fazi anaerobnog procesa konvertuju u metan i ugljen-dioksid. Zbog toga koncentracija VFA predstavlja jedan od najznačajnijih pokazatelja stabilnosti i efikasnosti anaerobnog tretmana.

Za procenu stepena predtretmana procesne vode pre ulaska u IC reaktor koristi se parametar kiselosti (acidification), definisan kao udeo VFA u CODs:

$$\text{Kiselost (\%)} = \frac{\text{VFA}}{\text{CODs}} \times 100$$

Ovaj parametar predstavlja meru konverzije rastvorene organske materije u isparljive masne kiseline. U okviru tehnologije kompanije Paques, preporučeni opseg kiselosti otpadne vode pre tretmana iznosi 20 - 40 %, jer se u tom intervalu postiže optimalna ravnoteža između proizvodnje VFA i njihove kasnije konverzije u metan u anaerobnom reaktoru.

Tokom početnog perioda rada postrojenja koncentracija VFA određivana je spektrofotometrijskom metodom korišćenjem test-kiveta. Međutim, tokom eksploatacije uočeno je da rezultati dobijeni ovom metodom odstupaju od realnih vrednosti. Analizom rezultata ustanovljeno je da prisutne suspendovane materije i relativno mala mutnoća uzoraka izazivaju interferenciju tokom merenja, što dovodi do precenjivanja koncentracije VFA. Zbog nedovoljne selektivnosti i pouzdanosti u uslovima karakterističnim za procesne vode fabrike papira i kartona, spektrofotometrijska metoda nije se pokazala pogodnom za operativno vođenje anaerobnog procesa.

Iz tog razloga uvedena je titraciona metoda koju kompanija Paques koristi za praćenje rada anaerobnih sistema. Ova metoda zasniva se na određivanju odnosa isparljivih masnih kiselina i alkaliteta putem kiselinsko-bazne titracije, čime se dobija znatno pouzdanija procena stvarnog stepena kiselosti procesne vode.

Rezultati dobijeni novom metodom pokazali su da je kiselost procesne vode bila značajno niža od projektovanih vrednosti. Nizak stepen kiselosti ukazivao je na to da se nedovoljan deo CODs prevodi u VFA pre ulaska u IC reaktor. Kao posledica toga, značajan deo hidrolize i acidogeneze odvijao se unutar samog reaktora, što je doводilo do narušavanja ravnoteže između acidogenih i metanogenih mikroorganizama. Formiranje VFA unutar reaktora uzrokovalo je lokalno snižavanje pH vrednosti i smanjenje aktivnosti metanogene populacije, što se negativno odražavalo na stabilnost procesa i efikasnost uklanjanja organskog opterećenja.

U početnoj fazi problem je delimično rešavan korišćenjem maksimalne raspoložive zapremine postojećih rezervoara procesne vode kako bi se povećalo hidrauličko vreme zadržavanja i omogućio veći stepen kiselosti pre ulaska vode u IC reaktor. Iako je ovim pristupom ostvaren određen napredak, raspoloživa zapremina nije bila dovoljna za potpuno stabilizovanje procesa.

Trajno rešenje postignuto je nakon instalacije dodatnog rezervoara zapremine 600 m³ (Slika 3.). Povećanjem ukupne zapremine procesne vode omogućena je preciznija kontrola vremena zadržavanja i stepena fermentacije pre anaerobnog tretmana. Na taj način stvoreni su uslovi za održavanje kiselosti u cilnom opsegu od 20 do 40 %, što je rezultovalo stabilnijim radom IC reaktora i efikasnijom konverzijom organske materije u biogas.

Održavanje kiselosti unutar preporučenog opsega ima značajan uticaj na stabilnost anaerobnog procesa. Vrednosti ispod 20% ukazuju na nedovoljnu pripremu procesne vode i premeštanje dela acidogene faze u sam reaktor, dok vrednosti iznad 40% mogu ukazivati na prekomernu fermentaciju procesne vode i povećanu akumulaciju organskih kiselina. Takvi uslovi mogu dovesti do smanjenja puferskog kapaciteta sistema, povećane osetljivosti procesa na promene opterećenja i potencijalne inhibicije metanogeneze. Iz tog razloga održavanje kiselosti otpadne vode pre biološkog tretmana, u opsegu od 20 do 40 %, predstavlja jedan od ključnih operativnih zahteva za stabilan rad anaerobnog sistema.



Figure 3. 600 m³ screen water tank in SWB

Slika 3. Tank 600 m³ za sitovu vodu u SWB

2. RAZMENA TOPLOTE I EFIKASNIJE UPRAVLJANJE TOPLOTNIM BILANSOM

Tokom prvog letnjeg perioda rada postrojenja uočen je problem povišene temperature procesne vode. Do pregrevanja je dolazilo usled kombinovanog uticaja zagrevanja u flotatoru, zagrevanja IC reaktora usled sunčevog zračenja, kao i izloženosti otvorenih rezervoara atmosferskim uslovima. U pojedinim periodima temperatura procesne vode prelazila je 40 °C, pri čemu dolazi do smanjenja aktivnosti mikrobioloških zajednica i pada efikasnosti biološkog tretmana (Slika 4.).

U početnoj fazi problem je ublažavan direktnim hlađenjem procesne vode pre ulaska u IC reaktor korišćenjem tehničke vode. U narednoj godini implementirano je trajnije rešenje u vidu ugradnje razmenjivača toplote sa čilerom, čime je omogućena kontrolisana termička regulacija sistema. Princip rada zasniva se na razmeni toplote između pregrejane otpadne vode i dela hladne tehničke vode, koja se naknadno koristi i u procesu proizvodnje papira, čime je ostvareno efikasnije upravljanje toplotnim bilansom postrojenja.

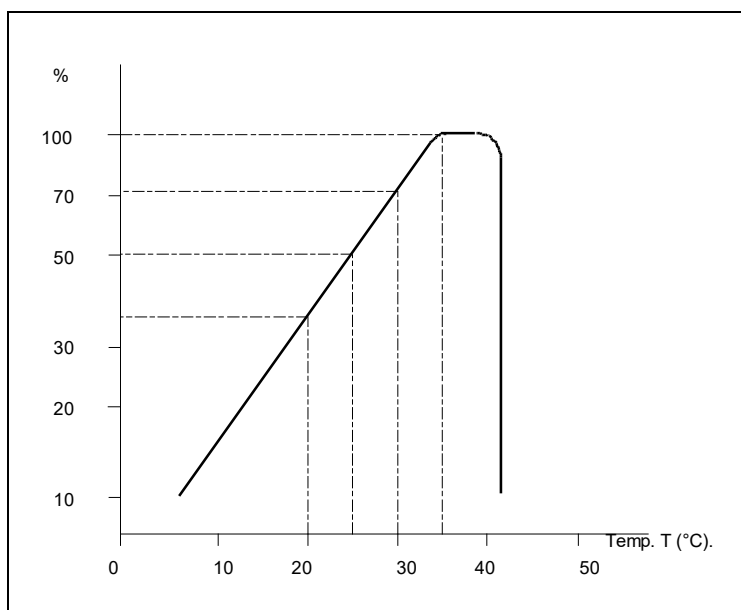


Figure 4. Activity of mesophilic methanogenic bacteria as a function of temperature

Slika 4. Aktivnost mezofilnih metanogenih bakterija u funkciji temperature

3. RASTVARANJE UREE I OPTIMIZACIJA SISTEMA PRIPREME NUTRIJENATA

Tokom projektovanja PPOV definisano je da će se kao izvor azota u biološkom tretmanu koristiti čvrsta urea, koja se prethodno rastvara i zatim dozira u proces. Međutim, u fazi implementacije uočeno je da je za pripremu rastvora uree predviđena isključivo hladna tehnička voda, što se pokazalo kao neadekvatno rešenje u eksploatacionim uslovima.

Rastvaranje uree u hladnoj vodi odvija se značajno sporije, pri čemu dolazi do nepotpunog rastvaranja i formiranja kristalnih naslaga. Preporučena temperatura za efikasno rastvaranje uree iznosi približno 30 - 40 °C, dok se pri temperaturama ispod 20 °C značajno smanjuje brzina rastvaranja i povećava rizik od taloženja i začepljenja sistema za doziranje. Kao posledica primene hladne vode došlo je do neadekvatnog pripremanja rastvora, nestabilnog doziranja nutrijenata i učestalih zapušanja opreme.

Radi otklanjanja uočenih problema, instaliran je dodatni cevovod za dovođenje tople tehničke vode iz proizvodnje do PPOV, čime je omogućeno pripremanje rastvora uree u temperaturnom opsegu pogodnom za potpuno i stabilno rastvaranje. Na taj način obezbeđeno je ravnomernije doziranje azota u biološki proces, kao i pouzdaniji rad sistema za pripremu i distribuciju nutrijenata.

4 IZMENA LOGIKE UPRAVLJANJA DOZIRANJEM NUTRIJENATA

U okviru optimizacije rada postrojenja izvršena je izmena strategije upravljanja doziranjem nutrijenata (azota i fosfora) u biološki tretman. U početnoj fazi doziranje je bilo upravljano na osnovu protoka otpadne vode ka PPOV, pri čemu je ulazni protok korišćen kao osnovni referentni parametar.

U daljem razvoju sistema uveden je napredniji pristup upravljanju, gde se doziranje nutrijenata vezuje za protok izdvojenog biogasa na vrhu IC reaktora, kao indirektni pokazatelj stepena razgradnje organske materije i intenziteta biološke aktivnosti u reaktoru. Na ovaj način umesto kontrole na ulazu u proces, praćenje se vrši na njegovom izlazu, odnosno na kraju reakcije.

Primena ove logike rezultovala je znatno preciznijim doziranjem nutrijenata, boljim usklađivanjem sa stvarnim potrebama mikrobiološkog sistema i stabilnijim radom reaktora. Kao posledica toga, uočen je pad koncentracije ukupnog azota u efluentu, što ukazuje na efikasnije korišćenje doziranih nutrijenata i smanjenje njihovog viška u procesu.

Ukoliko ovim pristupom ne bi bila postignuta željena optimizacija, kao alternativno rešenje razmatrana je implementacija inline merenja ukupnog organskog ugljenika (TOC) i upravljanje doziranjem nutrijenata na osnovu

TOC signala. Ovakav sistem je već primenjen u pojedinim postrojenjima unutar grupacije i pokazao je dobre rezultate, ali u konkretnom slučaju nije bio potreban zbog postignutih poboljšanja primenom upravljanja preko biogasa.

5 OPTIMIZACIJA RADA AEROBNE FAZE I UPRAVLJANJE AZOTNIM JEDINJENJIMA

Aerobna faza biološkog tretmana u SWB zasniva se na obezbeđivanju kiseonika putem tri površinska aeratora, koji rade u režimu automatske regulacije na osnovu merenja koncentracije rastvorenog kiseonika u vodi. Sistem upravljanja aeracijom konfigurisan je tako da aeratori moduliraju svoj rad u cilju dostizanja i održavanja zadatih (setovanih) vrednosti koncentracije rastvorenog kiseonika.

Tokom početnog perioda rada postrojenja uočeno je da su u sistemu dominantne koncentracije nitratnih jona (NO_3^-), što je ukazivalo na izraženu nitrifikaciju, ali i nedovoljno izražen proces denitrifikacije. S obzirom na to da u originalnom projektu nije bilo predviđeno dovoljno zapremine za odvojenu denitrifikacionu zonu, razmatrane su operativne mere za unapređenje uklanjanja azota.

Kao moguće rešenje analizirana je modifikacija rada jednog od tri površinska aeratora, tako da se njegov režim rada smanji do nivoa pri kojem bi dominantno imao funkciju mešanja, uz minimalan unos kiseonika. Na taj način bi se stvorili uslovi za lokalne anoksične zone u kojima bi se odvijala denitrifikacija, dok bi preostala dva aeratora obezbeđivala dovoljno kiseonika za efikasnu nitrifikaciju. Kao optimalno rešenje izabran je prvi aerator u nizu, uzimajući u obzir prisustvo veće količine organske materije u toj zoni, što je povoljno za denitrifikacione procese.

Kombinacija ove mere sa prethodno implementiranim optimizacijama upravljanja doziranjem nutrijenata preko protoka biogasa rezultovala je značajnim poboljšanjem u uklanjanju azotnih jedinjenja. Na taj način postignuto je smanjenje ukupnog azota u sistemu za oko 60%, čime je značajno unapređena ukupna efikasnost postrojenja i stabilnost izlaznog efluenta.

6 AUTOMATSKO ČIŠĆENJE SENZORA ZA DO

U početnoj fazi rada aerobnog sistema uočeni su problemi u stabilnom merenju koncentracije rastvorenog kiseonika (DO), usled učestalog prljanja senzora i formiranja naslaga kamenca u aerobnim tankovima. Zbog visoke osetljivosti mernih sonde, bilo je neophodno njihovo svakodnevno ručno čišćenje, koje se izvodilo upotrebom 5% rastvora limunske kiseline. Ova operacija je bila vremenski zahtevna i operativno opterećujuća, uz povremene prekide u pouzdanom merenju i kontroli procesa aeracije.

Radi unapređenja pouzdanosti merenja i smanjenja potrebe za manuelnim intervencijama, implementirana je oprema za automatsko čišćenje senzora rastvorenog kiseonika. Sistem se montira direktno na sondu i funkcioniše na principu periodičnog izduvavanja komprimovanim vazduhom, pri čemu se u definisanim intervalima vrši čišćenje površine senzora od naslaga i nečistoća.

Uvođenjem ovog sistema značajno je smanjena potreba za ručnim održavanjem, obezbeđena je stabilnija i pouzdanija merna signalizacija, kao i preciznija regulacija rada aeratora. Kao rezultat, poboljšana je kontrola koncentracije rastvorenog kiseonika u aerobnim tankovima, što je direktno doprinelo efikasnijem upravljanju procesom aeracije i stabilnosti celokupnog biološkog tretmana.

7 VIDLJIV PLAMEN I NOVA BAKLJA

U početnoj fazi rada postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda korišćena je baklja za spaljivanje viška biogasa koja je imala delimično manuelni režim upravljanja, uključujući ručnu kontrolu dotoka vazduha za sagorevanje. Zbog promenljivog sastava i protoka biogasa, u eksploataciji nije bilo moguće obezbediti stabilnu kontrolu veličine i intenziteta plamena, što je doводilo do promena u vidljivosti i kvalitetu sagorevanja.

S obzirom na lokaciju baklje u blizini javno dostupne površine, ovakvi operativni uslovi su sa aspekta bezbednosti i vizuelnog uticaja ocenjeni kao neprihvatljivi. Iz tog razloga, u saradnji između investitora i projektno–izvođačkog konzorcijuma, doneta je odluka o zameni postojećeg sistema potpuno automatskom bakljom.



Figure 5. Newly installed flare in SWB

Slika 5. Novoinstalirana baklja u SWB

Nova baklja je opremljena sistemom automatske regulacije sagorevanja, koji na osnovu merenja temperature procesa i relevantnih operativnih parametara automatski podešava odnos biogasa i vazduha. Na taj način obezbeđeno je stabilno i kontrolisano sagorevanje biogasa, uz značajno smanjenje vidljivog plamena i poboljšanje bezbednosnih i ekoloških performansi sistema.

8 DORADA SEKUNDARNOG TALOŽNIKA

Sekundarni taložnik, koji je postojao u okviru ranijeg postrojenja, integrisan je u novo postrojenje kao završna faza tretmana nakon anaerobnog i aerobnog procesa. U početnoj fazi eksploatacije uočeno je da taložnik ne obezbeđuje optimalne hidrauličke uslove rada, usled konstruktivnog odstupanja u nivelaciji.

Naime, taložnik je bio blago nagnut, što je dovodilo do neujednačenog prelivanja efluenta, pri čemu je voda izlazila dominantno sa jedne strane. Kao posledica toga, efektivna površina taloženja nije bila u potpunosti iskorišćena, što je uticalo na smanjenu efikasnost separacije mulja i vode.

Dodatno, uočen je značajan stepen varijabilnosti koncentracije istaloženog aerobnog mulja, što je otežavalo stabilno upravljanje povratnim muljem i imalo indirektan uticaj na rad aerobnog dela postrojenja.

Radi otklanjanja uočenih nedostataka izvršena je dorada metalnog prstena taložnika i njegovo nivelisanje na nultu kotu, čime je obezbeđeno ravnomerno prelivanje vode po celoj obimnoj dužini taložnika. Ovom intervencijom poboljšani su hidraulički uslovi, povećana iskorišćenost efektivne površine i stabilizovan proces separacije aktivnog mulja.



Figure 6. View of a section of the WWTP from the secondary clarifier

Slika 6. Pogled na deo PPOV sa sekundarnog taložnika

9 PREDSTOJEĆA UNAPREĐENJA NA PPOV

Sve prethodno opisane intervencije predstavljaju deo kontinuiranog procesa optimizacije rada postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, pri čemu se unapređenja ne posmatraju kao završena celina, već kao stalni proces tehničkog i operativnog usavršavanja sistema.

U narednom periodu planirana su sledeća unapređenja:

A. Implementacija AirJec sistema i automatska TSS kontrola

Planira se zamena sistema komprimovanog vazduha tehnologijom AirJec, čime bi se poboljšala efikasnost flotatora. Dodatno, predviđena je automatska kontrola rada flotatora na osnovu merenja koncentracije suspendovanih materija (TSS), što bi omogućilo preciznije upravljanje i stabilniji kvalitet prečišćene vode.

Iskorišćenje postojećeg betonskog rezervoara za dodatnu denitrifikaciju

Predviđena je rekonstrukcija i opremanje starog betonskog tanka ugradnjom mešalice, čime bi se omogućilo formiranje dodatne anoksične zone za unapređenje procesa denitrifikacije i poboljšanje uklanjanja azotnih jedinjenja.

B. Optimizacija upravljanja viškom aerobnog mulja

U situacijama kada zbog proizvodnje niskogramaturnih papira nije moguće slanje viška aerobnog mulja u proizvodnju kao punila, planirana je izgradnja novog cevovoda koji bi omogućio usmeravanje viška mulja u sistem prljave procesne vode, čime bi se obezbedilo fleksibilnije i stabilnije upravljanje viškom biomase.

C. Postrojenje za prečišćavanje biogasa

Planira se izgradnja sistema za prečišćavanje biogasa kako bi se omogućilo njegovo korišćenje u kotlarnici. Na taj način bi se povećao stepen iskorišćenja proizvedene energije i unapredila ukupna energetska efikasnost postrojenja.

Ova unapređenja predstavljaju sledeći korak u razvoju PPOV sistema, sa ciljem povećanja operativne stabilnosti, energetske efikasnosti i fleksibilnosti u upravljanju različitim procesnim uslovima.

10 ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih analiza i realizovanih unapređenja u radu postrojenja za biološki tretman otpadnih voda kompanije Smurfit Westrock Beograd, može se zaključiti da je optimizacija procesa značajno doprinela stabilnosti i efikasnosti celokupnog sistema. Identifikovane slabosti u početnoj fazi eksploatacije uspešno su otklonjene kroz kombinaciju tehnoloških, operativnih i infrastrukturnih intervencija.

Poseban doprinos ostvaren je u poboljšanju anaerobnog i aerobnog tretmana, preciznijem upravljanju nutrijentima, kao i unapređenju kontrole ključnih procesnih parametara, uključujući pH vrednost i temperaturu. Automatizacija pojedinih funkcija i unapređenje mernih sistema dodatno su povećali pouzdanost rada postrojenja.

Dobijeni rezultati potvrđuju da integrisan pristup, koji povezuje proizvodni proces i sistem prečišćavanja otpadnih voda, predstavlja ključni faktor za postizanje visokog nivoa efikasnosti i stabilnosti u radu bioloških postrojenja. Time je pokazano da kontinuirano praćenje i optimizacija procesa imaju presudnu ulogu u održivom upravljanju industrijskim otpadnim vodama.

LITERATURA

- [1] Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje. Sl. glasnik RS, br. 67/2011, 48/2012 i 1/2016.
- [2] Płuciennik-Koropczuk, E., Myszograj, S. (2019). New Approach in COD Fractionation Methods. *Water*, 11(7), 1484. DOI: 10.3390/w11071484. Dostupno na: MDPI Water – New Approach in COD Fractionation Methods. (Korišćeno za definisanje i prikaz frakcija HPK/COD: SS, SI, XS i XI.)
- [3] Tehnička dokumentacija kompanije Paques, dostavljena u okviru projekta izgradnje i puštanja u rad PPOV Smurfit Westrock Beograd.
- [4] Tehnička dokumentacija kompanije Hydrotech, dostavljena u okviru projekta izgradnje i puštanja u rad PPOV Smurfit Westrock Beograd.

Corresponding author:

Marko Anđelković

Rukovodilac postrojenja za preradu voda

Smurfit Westrock Beograd d.o.o.

+381 60 3790 551

marko.andjelkovic@smurfitwestrock.rs

STRATEGIJA FINANCIJSKOG BLAGOSTANJA KAO KLJUČ ZA ZADRŽAVANJE INŽENJERSKIH TALENATA U CPAG INDUSTRIJI

FINANCIAL WELLNESS STRATEGY AS A KEY TO RETAINING ENGINEERING TALENT IN THE CPAG INDUSTRY

Željka Šeler mag oec

Aplanium vl Željka Šeler, Stari Brod, Hrvatska

Abstract

The implementation of the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) and ongoing decarbonisation processes are creating new challenges for the pulp, paper, packaging and graphics (CPAG) industry. At the same time, labour markets are facing shortages of highly qualified engineering professionals and increasing workforce mobility. This paper analyses Financial Wellness as a human resource management instrument aimed at improving employee retention and organisational commitment. Based on a literature review and comparative financial analysis, the study examines the potential of Financial Wellness programmes to reduce financial stress and strengthen workforce stability during industrial transformation.

Keywords: financial wellness, employee retention, engineering talent, PPWR, CPAG industry

Sažetak

Implementacija Uredbe o ambalaži i ambalažnom otpadu (PPWR) te procesi dekarbonizacije stvaraju nove zahtjeve za industriju celuloze, papira, ambalaže i grafike (CPAG). Istodobno, tržište rada suočava se s nedostatkom visokoobrazovanih inženjerskih stručnjaka i povećanom mobilnošću radne snage. U radu se analizira financijsko blagostanje zaposlenika kao instrument upravljanja ljudskim potencijalima usmjeren na povećanje organizacijske privrženosti i zadržavanje talenata. Na temelju pregleda literature i komparativne financijske analize razmatra se potencijal programa financijskog blagostanja za smanjenje financijskog stresa i jačanje stabilnosti radne snage tijekom industrijske transformacije. Na temelju teorijskog okvira i studije slučaja, rad pokazuje da programi financijskog blagostanja mogu doprinijeti većoj stabilnosti zaposlenika te smanjenju migracijskih tokova prema zapadnoeuropskim tržištima rada.

Ključne riječi: financijsko blagostanje, zadržavanje zaposlenika, inženjerski talenti, PPWR, CPAG industrija

1. UVOD

Europska PPWR regulativa (Packaging and Packaging Waste Regulation), zajedno s politikama klimatske neutralnosti do 2050. godine, značajno mijenja operativni okvir industrije celuloze, papira, ambalaže i grafike (CPAG) u Europi. Industrijski subjekti suočeni su s potrebom brze transformacije proizvodnih sustava, implementacije kružnog gospodarstva te razvoja ekološki prihvatljivih materijala.

Ove promjene zahtijevaju visoku razinu tehničke ekspertize u područjima strojarstva, elektrotehnike, kemijskog inženjerstva i procesne optimizacije. Međutim, dostupnost takvog kadra u regionalnim gospodarstvima postaje ograničavajući faktor.

Paralelno s industrijskom transformacijom, tržište rada obilježava izražena emigracija inženjerskih stručnjaka prema zapadnoeuropskim zemljama, što dovodi do smanjenja intelektualnog kapitala i usporavanja inovacijskih kapaciteta. Prema podacima Eurostata, zemlje srednje i jugoistočne Europe posljednjih desetljeća bilježe kontinuirane migracijske tokove visokoobrazovanih stručnjaka prema gospodarski razvijenijim državama Europske unije, pri čemu tehničke i inženjerske profesije čine značajan udio mobilne radne snage (Eurostat, 2025).

Suvremena istraživanja u području upravljanja ljudskim potencijalima ukazuju na to da financijski stres zaposlenika predstavlja značajan prediktor smanjenog zadovoljstva poslom, niže produktivnosti i povećane namjere napuštanja organizacije (Shim & Serido, 2019; Netemeyer et al., 2018). U inženjerskim profesijama, koje zahtijevaju visoku razinu kognitivne angažiranosti, ovaj faktor ima posebno izražen učinak.

Cilj ovog rada jest istražiti potencijal implementacije koncepta Financial Wellnessa kao strateškog instrumenta za zadržavanje inženjerskih talenata u CPAG industriji. Polazišna hipoteza glasi da sustavni programi financijskog blagostanja povećavaju financijsku otpornost zaposlenika te smanjuju njihovu migracijsku namjeru prema inozemnim tržištima rada.

2. FINANCIJSKO BLAGOSTANJE KAO HR STRATEGIJA

2.1 Definicija Financial Wellnessa

Koncept Financial Wellnessa (financijskog blagostanja zaposlenika) definira se kao razina financijske sigurnosti i sposobnosti pojedinca da učinkovito upravlja osobnim financijskim resursima, uključujući stabilnost prihoda, upravljanje dugom i dugoročnu financijsku otpornost. Koncept Financial Wellnessa vuče korijene iz ranih 1990-ih godina iz Sjedinjenih Američkih Država, gdje se inicijalno razvio unutar programa korporativne podrške zaposlenicima (Employee Assistance Programs - EAP). Izvorno se povezivao s osnovnim savjetovanjem o dugovima, no u modernoj teoriji ljudskih potencijala i industrijskog menadžmenta, Financial Wellness se definira kao sveobuhvatan, dinamičan proces u kojem pojedinac postavlja i ostvaruje kratkoročne i dugoročne financijske ciljeve, razvija visoku razinu otpornosti na ekonomske šokove te posjeduje slobodu izbora koja mu omogućuje kvalitetan život. U kontekstu industrijskih sustava, ovaj se koncept ne promatra kao pasivni benefit, već kao proaktivna investicijska strategija menadžmenta.

2.2 Teorija ljudskog kapitala

U okviru teorije ljudskog kapitala (Becker, 1964), zaposlenici predstavljaju ključni oblik organizacijske imovine, pri čemu njihova produktivnost ovisi o razini psihološke i ekonomske stabilnosti. Nadalje, teorija resursne očuvanosti (Hobfoll, 1989) sugerira da financijski stres smanjuje dostupne kognitivne resurse potrebne za donošenje optimalnih profesionalnih odluka.

U tom kontekstu, Financial Wellness programi mogu se promatrati kao organizacijska intervencija koja smanjuje „financijsko opterećenje“ i povećava raspoložive kapacitete za inovativni rad.

U znanstvenoj literaturi koja proučava produktivnost rada, brojna istraživanja ukazuju na statistički značajnu povezanost između financijskog stresa i smanjenih kognitivnih performansi zaposlenika. Kada industrijski inženjeri, uslijed manjka sustavne financijske pismenosti, donose suboptimalne odluke o zaduživanju ili upravljanju vlastitim kapitalom, nastupa distrakcija koja izravno utječe na procese donošenja odluka u proizvodnim pogonima. Paradoks tehničkog obrazovanja očituje se u tome što inženjerski kadrovi posjeduju vrhunske analitičke sposobnosti za optimizaciju složenih tehnoloških procesa i termodinamičkih sustava, no rijetko unutar formalnog obrazovanja dobivaju metodološke alate za upravljanje osobnim financijama.

2.3 Teorija očuvanja resursa

Korporativni programi financijskog blagostanja unutar CPAG industrije stoga imaju za cilj premošćivanje tog jaza. Primjeri uspješne implementacije ovih programa u razvijenim industrijskim zemljama uključuju strukturiranu edukaciju o dugoročnom investiranju (npr. pasivni indeksni fondovi i ETF-ovi), osobnim financijama, planiranju štednje, upravljanju dugom i pripremi za mirovinu. Cilj je transformirati zaposlenika iz reaktivnog primatelja plaće u proaktivnog menadžera vlastitog kapitala. U kontekstu budžetiranja na razini pojedinca, uvođenje ovih programa unutar poduzeća omogućuje radnicima stabilnost i mentalni fokus, što je ključni preduvjet za rješavanje složenih inženjerskih i ekoloških izazova koje pred industriju postavlja PPWR regulativa.

3. KOMPARATIVNA ANALIZA EKONOMSKOG POLOŽAJA INŽENJERA ZAPOSLENIH U REGIONALNIM GOSPODARSTVIMA I NJEMAČKOJ

Za potrebe istraživanja provedena je komparativna analiza gospodarskog položaja zaposlenika samca zaposlenog na usporedivim inženjerskim pozicijama u Republici Srbiji i Saveznoj Republici Njemačkoj, s naglaskom na grad München kao jedno od najvažnijih industrijskih i tehnoloških središta Europe. Analiza se temelji na poreznim i

doprinosnim stopama važećim u 2026. godini, kao i na procjenama troškova stanovanja i svakodnevnog života za samostalnu osobu koja živi samostalno.

Podaci za Republiku Srbiju preuzeti su iz važećih propisa koji uređuju porez na plaće i obvezne doprinose za socijalno osiguranje. Za Saveznu Republiku Njemačku korišteni su javno dostupni podaci o stopama socijalnih doprinosa i izračunu poreza na dohodak za poreznu klasu I (samac bez djece). Trošak života i stanovanja procjenjuje se na temelju dostupnih tržišnih pokazatelja i prosječnih cijena najma stanova odgovarajuće veličine. Rezultati analize prikazani su u Tablici 1. Odabir Njemačke kao referentnog tržišta rada temelji se na podacima Eurostata koji potvrđuju da je Njemačka među vodećim odredištima za migraciju visokokvalificiranih stručnjaka iz zemalja srednje i istočne Europe te jedno od najvećih tržišta rada za inženjerske profesije u Europskoj uniji (Eurostat, 2025).

Tablica 1. Korigirana komparativna analiza ukupnog troška kompanije i proračuna inženjera samca (2026.)

Table 1. Corrected comparative analysis of total company costs and the cost calculation for a single engineer (2026).

<i>Financijska stavka / Kategorija</i>	<i>München (Njemačka)</i>	<i>Beograd / Novi Sad (Srbija)</i>
MJESEČNI BRUTO 2 (Ukupan trošak tvrtke)	8.053 € (117,9%)	3.786 € (116,1% / 443.693 RSD)
Doprinosi na teret poslodavca	-1.220 € (17,9%)	-526 € (16,1% / 61.693 RSD)
MJESEČNI BRUTO 1 (Ugovorena plaća)	6.833 € (100%)	3.260 € (100% / 382.000 RSD)
Porez i doprinosi na teret radnika	-2.973 € (43,5%)	-1.000 € (30,7% / 117.000 RSD)
MJESEČNI NETO (Zaposleniku na račun)	3.860 € (56,5%)	2.260 € (69,3% / 265.000 RSD)
Fiksni trošak najma stana i režija (50m ²)	-1.700 €	-600 € (cca. 70.000 RSD)
Troškovi života (prehrana, transport, društvo)	-1.150 €	-650 € (cca. 76.000 RSD)
Realni slobodni višak (Mjesečna štednja)	1.010 €	1.010 € (cca. 119.000 RSD)

Izračun za München rađen je prema standardnoj poreznoj klasi 1 (Porezna klasa I – samac bez djece) i zakonskim stopama doprinosa. Mjesečni Bruto 1 (6.833 €): To je otprilike 82.000 € godišnje, što je uobičajen bruto za inženjera srednje/više razine (Mid/Senior) u Münchenu. Porezi i doprinosi na teret radnika (2.973 € / 43,5%): Zbroj poreza na dohodak (Lohnsteuer), doprinosa za mirovinsko, zdravstveno, nezaposlenost i njegu (Pflegeversicherung) za samca u Njemačkoj iznosi točno između 42% i 44% na ovoj razini plaće. Mjesečni Neto (3.860 € / 56,5%): Službeni njemački kalkulatori za 2026. godinu na bruto iznos od 6.833 € izbacuju neto iznos od oko 3.850 € do 3.870 € (ovisno o tome plaća li se crkveni porez i koja se zdravstvena kuća odabere). Doprinosi poslodavca (1.220 € / 17,9%): Ukupni doprinosi poslodavca u Njemačkoj tehnički iznose oko 19% do 20% paritetno s radnikom. Međutim, zakonska gornja granica za obračun doprinosa (Beitragsbemessungsgrenze) malo "reže" taj postotak na višim plaćama, pa se stvarni trošak poslodavca (Bruto 2) kreće oko 8.150 €. Troškovi života: Najam od 1.700 € (s režijama) za 50 m² je prikazan za München (koji je najskuplji grad u Njemačkoj). Ostatak od 1.150 € za život je dovoljan za normalan društveni život samca.

Prikaz za Srbiju odnosi se na Zakon o doprinosima poslodavca (16,1%): Od izmjena zakona, službene stope na teret poslodavca u Srbiji su porasle (PIO je povećan s 10% na 11%, a zdravstvo je ostalo 5,15%). To posljedično podiže ukupni trošak tvrtke (Bruto 2) na 443.693 RSD (oko 3.786 €). Mjesečni Neto (265.000 RSD): Kada se od Bruto 1 oduzmu doprinosi radnika i porez na zaradu (10% uz primjenu neoporezivog cenzusa koji za 2026. iznosi 28.423 RSD), dobije se upravo oko 265.000 RSD neto. Troškovi života: Najam od 600 € (70.000 RSD) za pristojan stan od 50 m² u širem centru Beograda ili Novog Sada i troškovi od 650 € za život prikazani po trenutnom stanju na tržištu za 2026. godinu.

Iako su nominalna primanja u Njemačkoj značajno viša, analiza pokazuje da se nakon uključivanja troškova stanovanja i života razlika u raspoloživom višku značajno smanjuje. Dobiveni rezultati sugeriraju da percepcija financijske superiornosti rada u zapadnoeuropskim državama nije uvijek proporcionalna stvarnim mogućnostima dugoročne akumulacije kapitala. U analiziranom modelu, oba zabilježena slučaja postižu približno isti potencijal za mjesečne uštede. Ovi rezultati nadopunjuju nalaze Eurostata prema kojima odluke o migraciji nisu određene isključivo razlikama u nominalnim plaćama, već i ukupnim životnim troškovima, mogućnostima akumulacije kapitala te subjektivnom percepcijom kvalitete života.

Postoji značajna razlika u ukupnim troškovima rada za poslodavca. Dok njemačka tvrtka izdvaja približno 8.053 eura mjesečno za promatranu razinu plaće, tvrtka u Srbiji izdvaja oko 3.786 eura za postizanje slične razine dostupnog slobodnog viška. Ova razlika ukazuje na to da postoji određeni prostor za razvoj dodatnih programa podrške zaposlenicima bez značajnog ugrožavanja konkurentnosti domaćih tvrtki.

Na temelju tih rezultata razvijen je model financijske simulacije akumulacije dugoročnog kapitala. Pretpostavlja se da zaposlenik ulaže 600 EUR mjesečno u globalno diverzificirani indeksni fond s prosječnim godišnjim prinosom od 7%, pri čemu se realizirani prinos kontinuirano reinvestira.

Buduća vrijednost investicijskog portfelja izračunava se korištenjem standardnog modela složenih kamata za periodična plaćanja:

$$V = P \times \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

gdje:

V – buduća vrijednost portfelja, P – periodična mjesečna uplata, r – efektivna stopa prinosa, n – broj investicijskih razdoblja.

Rezultati simulacije pokazuju da bi nakon petnaest godina redovitih ulaganja vrijednost portfelja mogla dosegnuti približno 181.000 eura, pri čemu bi značajan dio tog iznosa bio ostvaren kroz učinak složene kamate.

4. REZULTAT I ZAKLJUČAK

4.1. Rezultat

Dobiveni nalazi ne dokazuju da je ostanak u zemlji financijski bolji u svim slučajevima, ali ukazuju na to da razlike između regionalnog i zapadnoeuropskog tržišta rada nisu nužno proporcionalne razlikama u nominalnim plaćama. Kada se u analizu uključe troškovi života, izdaci za stanovanje i mogućnosti za dugoročnu akumulaciju kapitala, ekonomska pozicija inženjera zaposlenog u regiji postaje znatno konkurentnija nego što se često pretpostavlja. Dodatnu prednost domaćeg tržišta rada predstavljaju posebne porezne olakšice predviđene zakonodavstvom Republike Srbije za određene kategorije zaposlenih, poput povratnika iz inozemstva i novonastanjenih osoba. Ove mjere omogućuju djelomično umanjenje osnovice za obračun poreza i doprinosa pod zakonom propisanim uvjetima. Njihova primjena rezultira smanjenjem ukupnog troška rada za poslodavca uz istovremeno povećanje neto primanja zaposlenika, što se posebno odražava na visokokvalificirane stručnjake. Usporedba standardnog poreznog opterećenja u Njemačkoj i Srbiji potvrđuje da domaći sustav, uz primjenu raspoloživih poticaja, može ostvariti povoljniji odnos između ukupnog troška rada i raspoloživog dohotka. Time se dodatno smanjuje jaz između percepcije o privlačnosti rada na Zapadu i stvarnih dugoročnih rezultata koje pojedinac može ostvariti na regionalnom tržištu. Iz perspektive upravljanja ljudskim potencijalima, navedene spoznaje otvaraju prostor za razvoj integriranih strategija zadržavanja inženjerskih talenata. Kombinacija poreznih olakšica i programa financijskog blagostanja omogućuje kompanijama da povećaju atraktivnost radnog mjesta bez proporcionalnog rasta osnovne bruto plaće. Za organizacije u CPAG sektoru, takva edukacija predstavlja troškovno učinkovit instrument koji podiže subjektivni osjećaj sigurnosti i zadovoljstva zaposlenika. U uvjetima provedbe PPWR regulative, kada uspješnost transformacije izravno ovisi o dostupnosti kvalificiranih stručnjaka, briga o financijskom blagostanju i pametno korištenje zakonskih poticaja postaju ključna komponenta u smanjenju stope migracije ključnih kadrova.

4.2. Zaključak

Provedeno istraživanje pružilo je detaljan uvid u dugoročne financijske i strateške aspekte zapošljavanja visokokvalificiranih inženjerskih kadrova, uspoređujući regionalno tržište rada (s naglaskom na Republiku Srbiju) i zapadnoeuropsko tržište (reprezentirano kroz model grada Münchena). Rezultati simulacije dovode u pitanje uobičajenu pretpostavku o apsolutnoj ekonomskoj nadmoći zapadnoeuropskog tržišta. Iako su nominalne bruto i neto plaće u razvijenijim ekonomijama znatno više, uvođenje varijabli poput realnih troškova života, izdataka za stanovanje te specifičnih zakonskih poreznih olakšica za povratnike i novonastanjena lica, dramatično mijenja konačni omjer. Kada se ti faktori integriraju s projekcijama dugoročne akumulacije kapitala i učinkom složene kamate kroz razdoblje od petnaest godina, ekonomska pozicija inženjera u regiji pokazuje visoku razinu konkurentnosti, rezultirajući podjednakim ili čak povoljnijim realnim slobodnim viškom u odnosu na rad u inozemstvu.

S aspekta upravljanja ljudskim potencijalima, rad donosi ključne spoznaje za menadžment unutar CPAG sektora. U uvjetima stroge provedbe PPWR regulative, gdje tehnološka transformacija i održivost izravno ovise o zadržavanju

specifičnih inženjerskih talenata, kompanije moraju redefinirati svoje strategije privlačenja i zadržavanja kadrova. Uzimajući u obzir dugoročne demografske trendove i mobilnost radne snage unutar Europske unije koje evidentira Eurostat, zadržavanje visokoobrazovanih inženjerskih stručnjaka postaje jedan od ključnih preduvjeta industrijske konkurentnosti. Istraživanje dokazuje da nelinearni instrumenti, poput programa financijskog blagostanja, edukacije zaposlenika i strukturiranog korištenja zakonskih poreznih poticaja, omogućuju poduzećima povećanje atraktivnosti radnog mjesta i subjektivnog osjećaja financijske sigurnosti radnika. Time se smanjuje stopa migracije i ublažava odljev mozgova bez potrebe za financijski neodrživim, proporcionalnim rastom osnovnih bruto plaća.

Glavno ograničenje ovog rada proizlazi iz volatilnosti makroekonomskih indikatora, poput inflacije i fluktuacija cijena na tržištu nekretnina, koji dugoročne projekcije mogu učiniti podložnima promjenama. Također, analiza je primarno fokusirana na kvantitativne financijske aspekte, dok kvalitativni faktori (poput opće kvalitete života, društvene infrastrukture i individualnih preferencija) nisu detaljnije operacionalizirani. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na empirijsku provjeru učinkovitosti programa financijskog blagostanja u praksi domaćih poduzeća te na longitudinalno praćenje stvarnog utjecaja poreznih olakšica na odluku visokokvalificiranih stručnjaka o povratku ili ostanku u matičnoj zemlji.

Zahvala

Autor izražava iskrenu zahvalnost inženjerima i stručnjacima iz CPAG sektora koji su svojim sudjelovanjem i ustupanjem podataka omogućili validaciju financijskog modela, kao i kolegama koji su iskazali povjerenje i pružili podršku u procesu pisanja ovog rada.

Posebna i duboka zahvalnost upućuje se sinovima na neprocjenjivom doprinosu oblikovanju ključnih teza rada. Hvala Martinu Šeleru, mag. ing. comp., čije je profesionalno iskustvo rada u međunarodnom okruženju te odluka o povratku iz Münchena u Hrvatsku potaknula promišljanja o ekonomskim, profesionalnim i društvenim čimbenicima koji utječu na mobilnost visokokvalificiranih inženjerskih stručnjaka. Njegovo iskustvo predstavljalo je vrijedan praktični okvir za razmatranje pitanja zadržavanja talenata u regionalnom gospodarstvu. Hvala i Janku Šeleru, studentu mehatronike i robotike na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, na korisnim raspravama o očekivanjima i profesionalnim prioritetima mladih inženjera. Njegovi uvidi pridonijeli su boljem razumijevanju stavova generacije koja će u nadolazećim godinama predstavljati ključan ljudski kapital za tehnološku i održivu transformaciju industrije.

Njihova podrška i promišljanja dodatno su potvrdili važnost istraživanja financijskog blagostanja kao jednog od čimbenika koji može doprinijeti zadržavanju stručnih kadrova i jačanju konkurentnosti regionalne industrije u uvjetima intenzivnih tehnoloških i regulatornih promjena.

Literatura i izvori podataka

- [1] Becker, G. S. (1964). *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis*. University of Chicago Press.
- [2] European Commission. (2024). Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) – Policy documentation. European Parliament and Council.
- [3] Eurostat. (2025). Labour mobility and migration of highly educated workers in the European Union. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [4] Hobfoll, S. E. (1989). Conservation of resources: A new attempt at conceptualizing stress. *American Psychologist*, 44(3), 513–524.
- [5] Netemeyer, R. G., Gaskin, J., & Beauregard, P. (2018). Financial well-being and employee outcomes. *Journal of Occupational Health Psychology*, 23(4), 521–530.
- [6] OECD. (2024). OECD Skills Outlook: Engineering and High-Skill Mobility in Europe. OECD Publishing.
- [7] Shim, S., & Serido, J. (2019). Financial wellness and behavioral outcomes in adults. *Journal of Family and Economic Issues*, 40(2), 211–223.
- [8] *Zakon o porezu na dohodak građana*. „Službeni glasnik Republike Srbije“, br. 24/01, 80/02, 19/25 i 109/25.
- [9] *Zakon o doprinosima za obavezno socijalno osiguranje*. „Službeni glasnik Republike Srbije“, br. 84/04, 61/05, i 109/25.
- [10] World Economic Forum. (2023). *The Future of Jobs Report 2023*. World Economic Forum.

Corresponding author:

Željka Šeler

Aplanium vl Željka Šeler, Stari Brod, Hrvatska

Zeljka.seler@aplanium.hr

EFEKAT ESENCIJALNOG ULJA NA RAST SALMONELLA SPP. U SJENIČKOJ OVČIJOJ STELJI PAKOVANOJ U MODIFIKOVANOJ ATMOSFERI

EFFECT OF ESSENTIAL OIL ON SURVIVAL OF SALMONELLA. SPP IN SJENICA SHEEP S HAM IN MODIFIED ATMOSPHERE

Tanja Žugić Petrović^{1a}, Vladimir Tomović^{2b}

¹Bio-Food Viking, Sokobanja, Serbia; ²Faculty of Technology, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia

^a(<https://orcid.org/0000-0001-8237-1080>)

^b(<https://orcid.org/0000-0001-5055-1781>)

Abstract

The meat industry is increasingly promoting the trend of organic production without the use of chemical preservatives, as some preservatives exhibit carcinogenic and toxic properties. This type of meat production and processing highlights the use of essential oils due to their antibacterial and antioxidant properties, but also the possibility of using them as a substitute for synthetic additives. The application of essential oils is exceptional, it can influence the reduction of foodborne diseases, prevent or delay lipid oxidation, and extend the shelf life of food products. Oregano essential oil is one of the most frequently used essential oils in the meat industry.

Dry-cured sheep ham is a traditional product of Western Balkans. It is prepared by dry curing specially treated whole sheep carcasses which are smoked for a short time in cold smoke and spontaneously ferment in the air under uncontrolled conditions.

The aim of the research was to examine the impact of modified atmosphere packaging and the antimicrobial effect of different concentrations of oregano essential oil (0,1%, 0,3% i 0,6%), on Salmonella spp and the microbiological status of Sjenica sheep stelja, as well as to examine the acceptability of Sjenica sheep stelja.

Key words: Stelja, packaging, protection of meat

Izvod

Industrija mesa sve više propagira trend organske proizvodnje, bez upotrebe hemijskih konzervanasa, pri čemu neki konzervansi ispoljavaju kancerogene i toksične osobine. Ovaj vid proizvodnje i prerade mesa u prvi plan ističe upotrebu etarskih ulja zbog antibakterijskih i antioksidativnih osobina ali i mogućnosti da se koriste kao zamena za sintetičke additive. Primena etarskih ulja je izuzetna i može da utiče na smanjenje bolesti prenosivih hranom, da spreči i odloži lipidnu oksidaciju kao i da produži održivost namirnica. Etarsko ulje origana jedno je od najčešće korišćenih etarskih ulja za primenu u mesnoj industriji.

Dry-cured sheep ham is a traditional product of Western Balkans. It is prepared by dry curing specially treated whole sheep carcasses which are smoked for a short time in cold smoke and spontaneously ferment in the air under uncontrolled conditions.

Cilj istraživanja bio je ispitivanje uticaja pakovanja u modifikovanoj atmosferi i antimikrobnog efekta različitih koncentracija etarskog ulja origana (0,1%, 0,3% i 0,6%), na Salmonella spp. i mikrobiološki status sjeničke ovčije stelje, kao i ispitivanje prihvatljivosti sjeničke ovčije stelje.

Ključne reči: Stelja, pakovanja, zaštita mesa

1. UVOD

Fermentacija je jedan od najstarijih primenjenih biotehnoloških procesa, koji lako karljivu hranu pretvara u stabilan konzerviran proizvod, pri čemu se sam proces kroz razvoj civilizacije usavršavao do savremenih tehnologija (Aquilanti et al., 2016). Spontano fermentisani suvomesnati proizvodi zauzimaju značajno mesto na međunarodnom tržištu, odlikuju se autentičnom tehnologijom, karakterističnim organoleptičkim osobinama i danas predstavljaju glavnu gastronomsku ponudu jedne regije (Petrovic Zugic et al., 2025). Autohtoni proizvod od ovčijeg mesa, koji se tradicionalno proizvodi u Zapadnoj Srbiji, na teritoriji opštine Sjenica i opštine Tutin, je sjenička ovčija stelja (Bauman & Dumić, 2017). Bauman & Dumić (2017) ističu da proizvodi koji vode poreklo sa određenog geografskog područja najčešće se odlikuju specifičnom tehnologijom proizvodnje, mikrobiotom, karakterističnim senzornim svojstvima i

vrhunskim kvalitetom Za proizvodnju sjeničke ovčije stelje koriste se tovljeni muški kastrati i jalove ovce, autohtone vrste životinja sjenička pramenka, gajenih na lokalitetu Sjeničko-peštarske visoravni na nadmorskoj visini od 1100-1250 m (Petrovic Zugic et al., 2025). Za proizvodnju ovog proizvoda koriste se celi oblikovani trupovi ovaca sa uraslim masnim i vezivnim tkivom, koji se dime i suše, a sam proces fermentacije traje najmanje 5 do 6 meseci (Stamenković & Dević, 2006). Sjenička ovčija stelja je vrlo specifičan autohtoni suvomesnati proizvod sa vrlo karakterističnim organoleptičkim osobinama koji ovaj proizvod čine vrlo karakterističnim i prepoznatljivim na tržištu. Pakovanje i zaštita ovog proizvoda je veoma značajna za potrošače koji su istakli potrebu za prirodnim konzervansima kako bi se osigurala bezbednost i kvalitet ovog proizvoda. Mnoge biljke i začini čine prirodne supstance koje se mogu koristiti u preradi mesa, pružajući senzorne i zdravstvene koristi potrošačima (Campêlo et al., 2019). Jedna je od najvažnijih mediteranskih biljaka je *Origanum vulgare*, poznat u narodu kao origano, pripada porodici Lamiaceae i rasprostranjena je širom sveta (García et al., 2012). U literaturi postoji mnogo radova koji izveštavaju o sposobnostima origana da poboljša bezbednost i stabilnost hrane zbog antioksidativnih i antimikrobnih karakteristika (Arcila et al., 2004).

U proizvodnji tradicionalnih suvomesnatih proizvoda veoma je značajno i pakovanje istih koje pre svega ima ulogu da, spreči rast potencijalno prisutnih patogenih mikroorganizama, kao i mikroorganizama koji izazivaju kvar kao i fizičke i hemijske promene koje mogu uticati na smanjenje nutritivne vrednosti proizvoda (Chen et al., 2021).

Cilj našeg ispitivanja je utvrđivanje uticaja uticaja pakovanja u modifikovanoj atmosferi i antimikrobnog efekta različitih koncentracija etarskog ulja origana (0,1%, 0,3% i 0,6%), na rast *Salmonella* spp. i mikrobiološki status sjeničke ovčije stelje, kao i ispitivanje prihvatljivosti sjeničke ovčije stelje tokom 14 dana na 4 ± 1 °C.

MATERIJAL I METODE

Materijal

Meso

Za potrebe eksperimenta je korišćena sjenička ovčija stelja proizvedena u izabranim domaćinstvima sa područja Peštera u dve proizvodne sezone (2018/19) krajem jesenjeg i početkom prolećnog perioda. Proizvod je pripreman na isti način u svim izabranim domaćinstvima u kojima se stelja tradicionalno priprema. Uzorci ovčije stelje, težine od po 500 g, uzorkovani su pod aseptičnim uslovima, i transportovani mobilnim frižiderima do laboratorije Odseka za poljoprivredno-prehrambene studije u Prokuplju, gde su čuvani na temperaturi od 4°C. Istraživanje je sprovedeno nakon 24 sata od uzorkovanja

Priprema i skladištenje uzoraka

Ovčija stelja je podeljena u dve grupe. Jedna polovina uzoraka je kontaminirana mešavinom *Salmonella* spp., zatim je svaka kontaminirana i nekontaminirana polovina podeljena je na po četiri dela, od kojih u jedan deo nije dodato etarsko ulje, a u drugi, treći i četvrti deo je dodato 0,1%, 0,3% i 0,6% etarskog ulja origana. Nakon toga svaka grupa je podeljena na još dva dela prilikom koga je polovina pakovana u modifikovanu atmosferu (30% O₂/50% CO₂/20% N₂) a druga u uobičajne pvc kesice. Za pakovanje uzoraka u modifikovanu atmosferu upotrebljena je mašina za pakovanje Multivac R 245, (Huenenberg, Švajcarska). Korišćena je folija OPA/EVOH/PE (orijentisani poliamid/etilen vinil alkohol/polietilen, Dynopack, Polimoon, Kristiansand, Norveška) sa niskom propustljivošću za gas (stepen propustljivosti za O₂ – 3,2 cm³/m²/dan pri 23 °C; za N₂ – 1 cm³/m²/dan pri 23 °C; za CO₂ – 14 cm³/m²/dan pri 23 °C i za vodenu paru 15 g/m²/dan pri 38 °C). Svi uzorci su čuvani na temperaturi od 4°C. Uzorci su otvoreni za analizu nakon 0, 3, 7, i 14 dana skladištenja.

Sojevi Salmonella spp.

Za izradu eksperimenta pripremljeni su sojevi *Salmonella Enteritidis* (ATCC 13076) i *Salmonella Typhimurium* (ATCC 14028). Od prekonoćnih (18h) bujonskih kultura (TSB, Merck, Nemačka) pripremljen je koktel *Salmonella* spp. za inokulaciju stelje koncentracije 6 log cfu/ml.

Etarsko ulje

Etarsko ulje origana nabavljeno je od kompanije Heba doo. (Beograd, Srbija) i skladišteno je u neprozirne staklene boce na temperaturi frižidera od 4 ± 1 °C.

Metode

Mikrobiološke analize

Na mešavinu serovarijetete *Salmonella* spp. napravljene za kontaminaciju mesa određena je minimalna inhibitorna koncentracija ulja origana. U eksperimentalno kontaminiranim uzorcima stelje praćen je rast i razmnožavanje *Salmonella* spp., dok je u uzorcima koji nisu kontaminirani serovarijetetima *Salmonella* spp. praćen broj bakterija iz familije *Enterobacteriaceae*, ukupan broj aerobnih mezofilnih bakterija i broj bakterija mlečne kiseline. Mikrobiološke analize na uzorcima stelje rađene su nultog, trećeg, sedmog i četrnaestog dana skladištenja. Rezultati broja praćenih bakterija iskazani su kao log CFU(*Colony Forming Unit*) /g mesa.

Određivanje minimalne inhibitorne koncentracije

Za ispitivanje osetljivosti bakterijskih sojeva na etarska ulja korišćena je metoda mikrodilucije u mikrotitracionim pločama (CLSI 2009, CLSI 1999).

Određivanje broja *Salmonella* spp. u inokulisanim uzorcima

Za određivanje broja *Salmonella* spp. korišćen je Xylose Lysine Tergitol 4 agar (XLT4) (Oxoid, UK) prema Pathania et al., (2010).

Određivanje ukupnog broja aeroba (ACC)

Određivanja broja ćelija koje obrazuju kolonije na čvrstim podlogama korišćen je standard SRPS EN ISO 4833:2008

Određivanje broja *Enterobacteriaceae* (EBC)

Za određivanje broja ćelija koje obrazuju kolonije na čvrstim podlogama korišćena je metoda SRPS ISO 21528-2: 2009,

Određivanje broja BMK vrste

Za određivanje broja ćelija koje obrazuju kolonije na čvrstim podlogama korišćena je metoda ISO 15214:1998.

Senzorna ocena uzoraka sjeničke ovčije stelje

Senzornim ispitivanjem ocenjivani su samo nekontaminirani uzorci stelje nultog, trećeg, sedmog i četrnaestog dana skladištenja pri temperaturi od 4 ± 1 °C. Senzorna analiza sprovedena je prema zahtevima standarda SRPS EN ISO 8589:2012.

REZULTATI I DISKUSIJA

Na početku skladištenja stelje nije utvrđeno prisustvo *Salmonella* spp. u nekontaminiranim uzorcima, dok se u kontaminiranim uzorcima broj *Salmonella* spp. kretao u opsegu od $4,26 \pm 0,05$ log cfu/g u uzorcima upakovanim u modifikovanu atmosferu sa dodatkom 0,6% etarskog ulja origana do $6,20 \pm 0,05$ log cfu/g u uzorcima bez dodatka etarskog ulja pakovanim u običnim pvc pakovanjima (tabela 1). Statistički značajne razlike uočene su odmah nultog dana broj *Salmonella* spp. bio je statistički značajno viši u uzorcima bez dodatka origana i uzorcima sa origanom od broja ovih bakterija u uzorcima pakovanim u modifikovanu atmosferu sa dodatkom 0,1%, 0,3% i 0,6% etarskog ulja. Tokom celog istraživanja javlja se značajno viši broj *Salmonella* spp. zabeležen u uzorcima pakovanim u običnim pvc pakovanjima u odnosu na modifikovanu atmosferu što potvrđuje zaštitnu ulogu modifikovane atmosfere u odnosu na pvc obično pakovanje. Statistički značajne razlike u broju *Salmonella* spp. zabeležene su između svih uzoraka. Smanjenje broja bakterija *Salmonella* spp. bez obzira na uslove pakovanja može se pripisati skladištenju uzoraka na temperaturama ispod 5 °C (Wong et al., 2002). Wilson & Nierhaus (2004) ističu da bakterije koje rastu u uslovima sredine čija je temperatura ispod temperature optimalne za njihov rast one pokušavaju da se adaptiraju što dovodi do promena u sintezi proteina, ćelijskoj membrani, kao i u drugim ćelijskim strukturama. Niske temperature dovode do produžavanja lag faze i smanjenog razmnožavanja što uzrokuje i odumiranje bakterijske ćelije (Cahill et al., 2007).

Četrnaestog dana ispitivanja više nije zabeležen rast *Salmonella* spp. u uzorcima pakovanim u modifikovanu atmosferu sa dodatkom etarskog ulja origana u koncentraciji 0,6%. u uzorcima pakovanim u pvc ambalažu uočen je povećani broj *Salmonella* spp trećeg dana istraživanja dok se pad broja beleži sedmog do četrnaestog dana u ovim uzorcima. Najveći pad u broju *Salmonella* spp kod uzoraka pakovanih u običnu pvc ambalažu očekivano se beleži četrnaestog dana istraživanja u uzorcima koji su tretirani sa 0,6% eteričnog ulja origana, što je kod ovakvog pakovanja i očekivano (tabela 1).

Tabela 1. Prosečan broj bakterija (log cfu/g) *Salmonella* spp. u eksperimentalno kontaminiranim uzorcima upakovanih u PVC i modifikovanu atmosferu, sa i bez ulja origana

Table 1. Average number of *Salmonella* spp. bacteria (log CFU/g) in experimentally contaminated samples packaged in PVC and modified atmosphere, with and without oregano oil.

Grupe uzoraka	Dan ispitivanja			
	0	3	7	14
MAP	0 ±0,02	5,88±0,09	5,29 ±0,02	4,92 ±0,14
MAP+ 0,1% O	5,5 ±0,02	4,81 ±0,18	4,07±0,09	4,02±0,03
MAP+ 0,3% O	5,30 ±0,05	4,57 ±0,03	3,69±0,2	3,22 ±0,3
MAP+ 0,6% O	4,26±0,05	3,56 ±0,02	2,55±0,13	<1
PVC	8,20±0,05	9,2±0,05	8,37 ±0,07	8,22 ±0,06
PVC+ 0,1% O	7,4 0±0,02	6,29 ±0,13	6,31±0,17	6,26 ±0,05
PVC+ 0,3% O	6,32 ±0,03	6,84 ±0,06	5,83 ±0,16	5,55 ±0,13
PVC+ 0,6% O	6,16 ±0,02	5,69 ±0,16	5,25 ±0,12	4,05 ±0,02

Mikrobiološka analiza nekontaminirane stelje upakovane u MAP pakovanjima u definisanom vremenskom intervalu od 0, 3, 7, 14 dana na temperaturi frižidera od 4±1 °C, predstavljena je u tabelama 2-4. Iz rezultata se može videti da se broj mikroorganizama menja i da je najveći porast ukupnog broja mikroorganizama detektovan četrnaestog dana u uzorcima pakovanim u pvc ambalažu i kreće se u opsegu od 8,71 do-7,30 log CFU/g u uzorcima sa 0,6% oregano ulja. Nultog dana ukupan broj aerobnih mikroorganizama iz uzoraka stelje upakovanih u map ambalažu se kretao od 6,25 do 5,81 log CFU/g zadnjeg dana istraživanja. Skladištenjem uzoraka upakovanih u MAP ambalažu došlo je do smanjenja u broju mikroorganizama svih ispitivanih grupa što potvrđuje činjenicu da je zaštitna uloga pakovanja presudna tokom procesa uskladištenja proizvoda. Takođe je zapaženo i smanjenje broja bakterija kod map ambalaže u tretiranim uzorcima origano uljem što takođe ističe konzervirajući efekat ulja.

Mnogi istraživači napominju da su Gram-negativne bakterije osetljivije na dejstvo ugljen-dioksida od Gram-pozitivnih bakterija pri čemu mehanizam delovanja objašnjavaju penetracijom ugljen-dioksida kroz zid bakterijske ćelije, brzo snižavanju pH vrednosti unutar ćelije smanjenju enzimske aktivnosti u ćeliji (McMillin et al., 2008; Cooksey, 2014).

Tabela 2. Prosečan broj aerobnih mezofilnih bakterija (log cfu/g) u nekontaminiranim uzorcima stelje upakovanih u PVC i modifikovanu atmosferu, sa i bez ulja origana

Table 2. Average number of aerobic mesophilic bacteria (log CFU/g) in uncontaminated bedding samples packaged in PVC and modified atmosphere, with and without oregano oil.

Grupe uzoraka	Dan ispitivanja			
	0	3	7	14
MAP	6,25 ±0,03	5,97±0,19	6,00 ±0,25	5,81±0,05
MAP+ 0,1% O	6,13 ±0,05	5,46±0,07	5,16 ±0,06	4,89 ±0,13
MAP+ 0,3% O	5,85 ±0,03	5,25 ±0,06	5,32 ±0,07	4,71 ±0,18
MAP+ 0,6% O	5,30 ±0,03	4,95 ±0,02	4,22 ±0,05	4,20±0,05
PVC	6,68±0,05	6,95±0,10	7,43±0,02	8,71±0,05
PVC+ 0,1% O	6,65±0,02	6,95±0,05	7,30 ±0,05	8,13±0,03
PVC+ 0,3% O	5,80 ±0,05	5,40±0,02	6,50±0,14	7,88 ±0,03
PVC+ 0,6% O	5,56±0,01	5,95±0,03	6,15 ±0,09	7,30 ±0,16

Kada je u pitanju promena broja enterobakterija uzoraka upakovanih u map i pvc ambalažu, beleži se niži rast u odnosu na BMK. Prosečan broj enterobakterija se kretao u opsegu od 4,05 nultog dana do 2,81 log CFU/g četrnaestog dana istraživanja kod map ambalaže, dok se kod uzoraka pakovanih u pvc abalažu beleži značajno povećanje istraživanih bakterija. Značaj pakovanja I uticaj eteričnog ulja na smanjenje prisustva enterobakterija u uzorcima stelje je I I ovde zabeleženo, pri čemu se u uzorcima map pakovanja sa 0,6% origana ne beleži prisustvo istraživanih bakterija sedmog dana istraživanja. Mnogi istraživači napominju da je za ostvarivanje antibakterijskog efekta (bakteriostatskog ili baktericidnog) etarskih ulja u hrani potrebna i deset puta veća koncentracija etarskih ulja od one određene u laboratorijskim in vitro kao posledica interakcija etarskih ulja, bakterija sa komponentama hrane (Hayouni et al., 2008; Burt, 2004).

Tabela 3. Prosečan broj enterobakterija (log cfu/g) u nekontaminiranim uzorcima stelje upakovanim u PVC i modifikovanu atmosferu, sa i bez ulja origana

Table 3. Average number of Enterobacteriaceae (log CFU/g) in uncontaminated bedding samples packaged in PVC and modified atmosphere, with and without oregano oil.

Grupe uzoraka	Dan ispitivanja			
	0	3	7	14
MAP	4,05 ±0,02	3,02±0,02	3,00 ±0,05	2,81±0,05
MAP+ 0,1% O	4,03 ±0,05	1,85±0,05	1,56 ±0,03	1,72 ±0,02
MAP+ 0,3% O	3,80 ±0,03	1,66 ±0,05	1,52 ±0,06	< 1
MAP+ 0,6% O	2,23 ±0,05	1,3 ±0,01	< 1	< 1
PVC	4,65±0,09	3,35±0,10	3,39 ±0,04	2,97±0,05
PVC+ 0,1% O	4,05±0,05	2,95±0,03	2,93 ±0,05	2,02±0,03
PVC+ 0,3% O	3,55 ±0,05	2,50±0,02	2,52±0,14	1,75 ±0,29
PVC+ 0,6% O	3,25±0,02	1,98±0,05	1,20 ±0,09	1,20±0,05

Rezultati Govaris et al., (2010) su pokazali da etarsko ulje origana aplikovano u koncentraciji od 0,6% i 0,9% pokazuje antimikrobnu aktivnost na temperaturama od 4° C i 10° C, s tim što je primenjeno u koncentraciji od 0,9% imalo bolji inhibitorni efekat.

Gram-pozitivne katalaze i oksidaza negativni bacili koji su uspešno rasli na MRS-u su detektovani kao bakterije mlečne kiseline (BMK). BMK su druge po bakterijskoj dominaciji u stelji pakovanoj u map ambalažu, i njihov broj se povećava od vrednosti 3.02 log CFU/g nultog dana u sva 3 uzorka do vrednosti 7,21log CFU/g, četrnaestog. dana (tabela 4). Prosečan broj BMK u pvc ambalaži je tokom istraživanja pokazivao značajan porast u odnosu na map ambalaži I u uzorcima tretiranim eteričnim uljem origana što potvrđuje činjenicu da zaštitna uloga pakovanja nije zanemarljiva.

Tabela 4. Prosečan BMK (log cfu/g) u nekontaminiranim uzorcima stelje upakovanim u PVC i modifikovanu atmosferu, sa i bez ulja origana

Table 4. Average number of lactic acid bacteria — LAB (log CFU/g) in uncontaminated bedding samples packaged in PVC and modified atmosphere, with and without oregano oil.

Grupe uzoraka	Dan ispitivanja			
	0	3	7	14
MAP	3,02 ±0,04	5,15±0,02	6,00 ±0,22	7,21±0,07
MAP+ 0,1% O	2,23 ±0,05	4,46±0,05	4,46 ±0,03	4,89 ±0,02
MAP+ 0,3% O	2,17 ±0,05	4,25 ±0,06	4,12 ±0,05	4,61 ±0,05
MAP+ 0,6% O	2,15 ±0,03	3,53 ±0,02	4,12 ±0,03	4,19±0,05
PVC	3,32±0,09	5,35±0,10	6,39 ±0,04	8,27±0,05
PVC+ 0,1% O	3,61±0,06	4,95±0,03	4,93 ±0,09	5,27±0,03
PVC+ 0,3% O	2,55 ±0,03	4,40±0,02	4,52±0,14	4,88 ±0,29
PVC+ 0,6% O	2,21±0,02	3,95±0,03	4,15 ±0,09	4,29 ±0,16

Ovakvi rezultati sreću se i po radovima, pri čemu potvrđuju blagu dominaciju BMK u mesu i proizvodima od mesa. Franz & Von Holy (1996) ističu dominantnost bakterijske populacije koje su izolovali iz vakuum-upakovanih bečkih kobasica, koje su bile pasterizovane i nepasterizovane, čuvane na temperaturi od 8 °C 128 dana. Većina (> 52%) izolata iz pasterizovane i nepasterizovane kobasice činile su najpre BMK, a zatim *Bacillus*, *Staphylococcus* i *Enterobacteriaceae*. Prema Doulgeraki i sar., (2012) BMK su dobri kompetitori i često predstavljaju dominantnu bakterijsku populaciju u mesu pakovanom u vakuum i modifikovanu atmosferu. Gill i Penney (1985) su u svom radu naveli najmanje 5 faktora koji doprinose usporavanju ili sprečavanju rasta kvarioca mesa koje je upakovano u vakuum ambalažu, a to su: smanjenje O₂, povišene koncentracije CO₂, niske pH-vrednosti mesa, niske temperature skladištenja i aktivnosti BMK. BMK mogu izazvati senzorne promene, kao i promene u fizičkom izgledu vakuum upakovanih suvih mesa, proizvodeći mlečnu i sirčetnu kiselinu u toku logaritamskog rasta, posebno u stacionarnoj fazi rasta (Korkeala & Bjorkroth, 1997). BMK formira glavnu komponentu mikrobne populacije na različitim tipovima vakuumskih upakovanih mesnih proizvoda (Jones, 2004).

Prihvatljivosti uzoraka proizvoda upakovanih u map i pvc ambalažu je bila uskladu sa Elaboratom za zaštitu oznake geografskog porekla sjenička ovčija stelja. Uzorci tretirani origano uljem imali su dominaciju ukusa i mirisa ulja posebno u koncentraciji od 0,6%, ovakva intenzivna promena ukusa i mirisa može biti preporuka za potrošače koji nisu ljubitelji karakterističnog ukusa i mirisa ovčijeg mesa

ZAKLJUČAK

U svim grupama eksperimentalno kontaminiranih uzoraka sjeničke ovčije stelje broj *Salmonella* spp. se smanjivao tokom ispitivanja i bio je statistički značajno manji kod uzoraka pakovanih u modifikovanoj atmosferi u odnosu na uzorke pakovane u pvc kesicama, kao i kod uzoraka sa dodatkom većom koncentracijom etarskog ulja origana. U svim istraživanim uzorcima stelje promena ukupnog broja aerobnih mezofilnih bakterija, enterobakterija kao i bakterija mlečne kiseline u toku skladištenja zavisila je od načina pakovanja (modifikovana atmosfera ili pvc kesica), dodate količine etarskog ulja. Povećanje ukupnog broja aerobnih mezofilnih bakterija, kao i bakterija mlečne kiseline, bilo je izraženije kod uzoraka pakovanih u pvc kesicama i uzoraka sa manjim sadržajem dodatog etarskog ulja u odnosu na analogne uzorke stelje pakovane u modifikovanoj atmosferi.

LITERATURA

- [1] Aquilanti, L., Garofalo, C., Osmani, A., & Clementi, F. (2016). Ecology of lactic acid bacteria and coagulase negative cocci in fermented dry sausages manufactured in Italy and other Mediterranean countries: an overview. *International Food Research Journal*, 23(2).
- [2] Petrović, T. Ž., Tomović, V. M., Kocić-Tanackov, S., Marković, K. G., Joković, N., Radojević, I. D., & Grujović, M. Ž. (2025). Microbial dynamics and quality evolution in the spontaneous fermentation of the traditional meat product Sjenica sheep stelja. *Fermentation*, 11(4), 221.
- [3] Bauman, F., Dumić, S. (2017). Elaborat za zaštitu oznake geografskog porekla "Sjenička Stelja" Agencije za privredne registre (APR) 2011 dana 17. 05. 2011. godine./ 8644:Republike Srbije pod brojem BU 2011/ 8644.
- [4] Stamenković, T., Dević, B. (2006). Senzorna svojstva ovčije stelje. *Tehnologija mesa*, 47 (3-4), 115-122.
- [5] Garcia-Lopez, M. L., Prieto, M., Otero, A. (1998). The physiological attributes of Gram-negative bacteria associated with spoilage of meat and meat products. *The microbiology of meat and poultry*, 1-34.
- [6] Campêlo, M. C. S., J. M. S. Medeiros, and J. B. A. Silva (2019). "Natural products in food preservation." *International Food Research Journal*, 26.1
- [7] Garcia, J. R., Reiber, C., Massey, S. G., Merriwether, A. M. (2012). Sexual hookup culture: A review. *Review of General Psychology*, 16(2), 161-176.
- [8] Arcila-Lozano, C. C., Loarca-Piña, G., Lecona-Urbe, S., González de Mejía, E. (2004). Oregano: properties, composition and biological activity. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 54(1), 100-111.
- [9] Chen, X., Luo, J., Lou, A., Wang, Y., Yang, D., & Shen, Q. W. (2021). Duck breast muscle proteins, free fatty acids and volatile compounds as affected by curing methods. *Food Chemistry*, 338, 128138.
- [10] CLSI, (1999). Clinical and Laboratory Standards Institute Methods for Determining Bactericidal Activity of Antimicrobial Agents; Approved Guideline., Volume 19 Number 18. CLSI publication M26-A. Clinical and Laboratory Standards Institute, Wayne, PA. 252
- [11] CLSI, (2006). Clinical and Laboratory Standards Institute Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically. Approved standard, 7th ed. CLSI publication M07-A7. Clinical and Laboratory Standards Institute, Wayne, PA.

- [12]Pathania, A., McKee, S. R., Bilgili, S. F., Singh, M. (2010). Inhibition of Nalidixic Acid–Resistant *Salmonella* on Marinated Chicken Skin. *Journal of Food Protection*, 73(11), 2072-2078.
- [13]SRPS EN ISO 6887-1:2008. Mikrobiologija hrane i hrane za životinje - Pripremanje uzoraka za ispitivanje, početne suspenzije i decimalnih razblaženja za mikrobiološko ispitivanje.
- [14]SRPS EN ISO 8589:2012. Senzorske analize - Opšte uputstvo za projektovanje
- [15]Wong, D. L. F., Hald, T., Van Der Wolf, P. J., Swanenburg, M. (2002). Epidemiology and control measures for *Salmonella* in pigs and pork. *Livestock Production Science*, 76(3), 215-222.
- [16]Cahill, R. A., Wang, J. H., & Redmond, H. P. (2007). Enteric bacteria and their antigens may stimulate postoperative peritoneal adhesion formation. *Surgery*, 141(3), 403-410.
- [17]Williamson, C. S., Foster, R. K., Stanner, S. A., Buttriss, J. L. (2005). Red meat in the diet. *Nutrition Bulletin*, 30(4), 323-355.
- [18]Cahill, R. A., Wang, J. H., & Redmond, H. P. (2007). Enteric bacteria and their antigens may stimulate postoperative peritoneal adhesion formation. *Surgery*, 141(3), 403-410.
- [19]McMillin, K. W. (2008). Where is MAP going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat. *Meat science*, 80(1), 43-65.
- [20]Cooksey K., 2014. Modified Atmosphere Packaging of Meat, Poultry and Fish. In: Jung H. Han (Ed.), Elsevier, *Innovations in Food Packaging (Second Edition)*, pp. 475-493.
- [21]Hayouni, E. A., Chraief, I., Abedrabba, M., Bouix, M., Leveau, J. Y., Mohammed, H., Hamdi, M. (2008). Tunisian *Salvia officinalis* L. and *Schinus molle* L. essential oils: Their chemical compositions and their preservative effects against *Salmonella* inoculated in minced beef meat. *International Journal of Food Microbiology*, 125(3), 242-251.
- [22]Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94, 223-253.
- [23]Govaris, A., Solomakos, N., Pexara, A., Chatzopoulou, P. S. (2010). The antimicrobial effect of oregano essential oil, nisin and their combination against *Salmonella* Enteritidis in minced sheep meat during refrigerated storage. *International Journal of Food Microbiology*, 137, 175-180.
- [24]Franz, C. M. A. P., & Von Holy, A. (1996). Bacterial populations associated with pasteurized vacuum-packed Vienna sausages. *Food Microbiology*, 13(2), 165-174.
- [25]Gill, C. O., & Penney, N. (1985). Modification of in-pack conditions to extend the storage life of vacuum packaged lamb. *Meat Science*, 14(1), 43-60.
- [26]Korkeala, H. J., & Björkroth, K. J. (1997). Microbiological spoilage and contamination of vacuum-packaged cooked sausages. *Journal of food protection*, 60(6), 724-731.
- [27]Jones, R. J., Hussein, H. M., Zagorec, M., Brightwell, G., & Tagg, J. R. (2008). Isolation of lactic acid bacteria with inhibitory activity against pathogens and spoilage organisms associated with fresh meat. *Food microbiology*, 25(2), 228-234.

Corresponding author:

Tanja Žugić Petrović

¹Bio-Food Viking, Sokobanja

tanja.zugicpetrovic@yahoo.com

REZULTATI REKONSTRUKCIJE EKONOMAJZERA PRVOG STEPENA KOTLOVSKOG SISTEMA U FABRICI KARTONA UMKA

RESULTS OF THE RECONSTRUCTION OF THE FIRST-STAGE ECONOMIZER OF THE BOILER SYSTEM AT THE UMKA CARDBOARD MILL

Milan Mitić, Pavle Milošević
Fabrika kartona Umka, Umka, Srbija

Izvod

Rekonstrukcija ekonomajzera ima za cilj povećanje energetske efikasnosti u pogonu Kotlarnica. Konstrukcija starih ekonomajzera je bila od glatkih cevi, dok je konstrukcija novih ekonomajzera od spiralno orebrenih cevi. Zamenom sistema ekonomajzera omogućena je veća temperatura napojne vode na ulazu u kotao, a samim tim je dobijena veća energetska efikasnost kotlovskog sistema. U radu su prikazani rezultati uštede energije nakon rekonstrukcije.

Ključne reči: ekonomajzer, kotao, proizvodnja pare, ušteda energije, proizvodnja kartona

Abstract

The economizer reconstruction aims to increase energy efficiency in the boiler house. The old economizers involved the use of smooth pipes, while the new ones are constructed from spiral finned tubes. The replacement of the economizer system enabled a higher feedwater temperature, thereby achieving greater energy efficiency for the boiler system. The paper presents the energy savings results following the reconstruction.

Keywords: economizer, boiler, steam generation, energy savings, cardboard production

UVOD

U savremenim industrijskim postrojenjima, energetska efikasnost predstavlja jedan od ključnih faktora za ekonomičan rad kotlovskih sistema. Zbog dugotrajnog rada i izloženosti visokim temperaturnim opterećenjima, pojedini elementi kotlovskog postrojenja vremenom gube projektovane karakteristike, što dovodi do smanjenja efikasnosti sistema i povećanja potrošnje energije. Jedan od značajnih elemenata za unapređenje toplotnog iskorišćenja jeste ekonomajzer, čija je osnovna funkcija iskorišćenje energije dimnih gasova za zagrevanje napojne vode. U ovom radu prikazana je rekonstrukcija ekonomajzera prvog stepena, na dva kotla u kotlarnici, sa posebnim osvrtom na tehnička rešenja i ostvarene efekte u radu sistema.

RAZLOZI REKONSTRUKCIJE

Rekonstrukcija ekonomajzera izvršena je usled dugogodišnje eksploatacije postojećih uređaja i njihovog postepenog gubitka efikasnosti. Na cevima starih ekonomajzera vremenom su se pojavljivala oštećenja u vidu perforacija i curenja, nastala kao posledica stalnog dejstva visokotemperaturnih dimnih gasova sa spoljne strane cevi i protoka vode sa unutrašnje strane. U cilju održavanja rada sistema, oštećene cevi su sukcesivno isključivane iz rada zatvaranjem, čime je dolazilo do smanjenja aktivne površine za razmenu toplote, a ujedno povećavanjem brzine strujanja napojne vode kroz preostale cevi. Takvo stanje je dovelo do pada efikasnosti ekonomajzera, odnosno smanjenja efikasnosti iskorišćenja toplote dimnih gasova i potrebe za rekonstrukcijom sistema.

OPIS FUNKCIONISANJA EKONOMAJZERA PRVOG STEPENA

Ekonomajzeri prvog stepena na kotlovskom sistemu, čija je primarna uloga dogrevanje napojne vode, mogu biti izrađeni sa glatkim cevima, na strani strujanja dimnih gasova, ali mogu biti izrađeni i sa orebrenim cevima. U prošlosti, kada su korišćeni različiti energenti za sagorevanje, poput mazuta, prirodnog gasa i drugih, uglavnom je

konstrukcija ekonomajzera bila sa glatkim cevima, zbog korišćenja mazuta, dok prelaskom gorionika na ekološki „čistije“ energete, kao što je prirodni gas, tečni prirodni gas ili tečni naftni gas, dolazi do promene konstrukcije i uglavnom se koriste ekonomajzeri sa spiralno orebrenim cevima (slika br. 1).



Slika br. 1 - Spiralno orebreni razmenjivač toplote
Figure 1. Heat exchanger with spiral fins.

Prednost orebrenih razmenjivača toplote je zauzimanje manjeg prostora pri istoj površini za razmenu toplotne energije, kao i manji pad pritiska kroz cevi, što je pogodnije naporu napojne pumpe. Zbog dužeg perioda eksploatacije ekonomajzera, uzimajući u obzir kvalitet fluida sa vazdušne strane (dimni gasovi), preporuka je da spiralno orebreni razmenjivač toplote bude pocinkovan. Na slici br. 2 je prikaz razmenjivača toplote sa glatkim cevima.



Slika br. 2 - Razmenjivač toplote sa glatkim cevima
Figure 2. Heat exchanger with smooth tubes.

UTICAJ REKONSTRUKCIJE EKONOMAJZERA NA EFIKASNOST KARTON MAŠINE

Poslednjih godina, većina industrija iz oblasti prerade i proizvodnje papira, vodi trku u modernizaciji svojih proizvodnih pogona, instalacijom efikasnije opreme, odnosno smanjenjem specifične potrošnje energenata. Uzimajući u vidu, da kotlarnice u fabrikama za preradu i proizvodnju papira, za proizvodnju tehnološke pare, utroše $85 \div 90\%$ ukupne potrošnje uglavnom prirodnog gasa, iz tog razloga su ekonomajzeri prvog stepena u kotlarnici, predloženi kao jedan od prioriteta rekonstrukcije u 2026 godini u Fabrici kartona Umka.

Na osnovu ulaznih parametara pre rekonstrukcije:

- Temperatura napojne vode (pre rekonstrukcije) 125 °C;
- Pritisak napojne vode 20 bar g;
- Pritisak pare na izlazu iz kotlova 17 bar g;
- Temperatura pare na izlazu iz kotlova 207 °C;
- Entalpija napojne vode pri 125°C ($i_{125^{\circ}\text{C}, 19\text{bar}}$) 525,2 kJ/kgK;
- Koeficijent efikasnosti kotlovskog postrojenja $\eta = 0,9$;
- Snaga na gorionicima 80%;

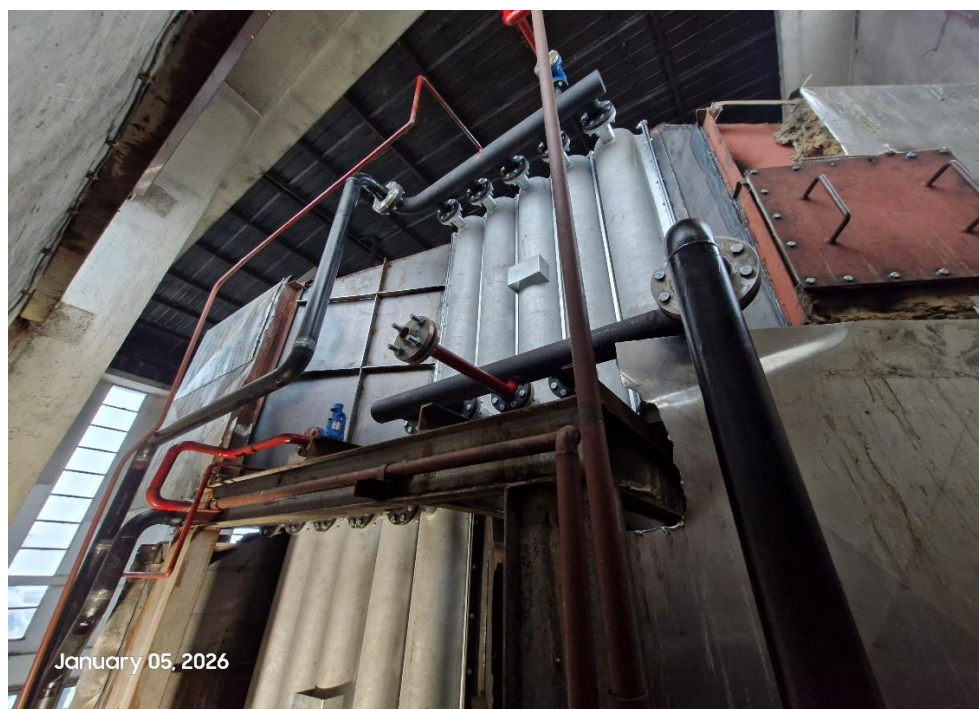
odnosno zahteva budućeg stanja nakon rekonstrukcije:

- Tip razmenjivača toplote voda/vazduh spiralno orebreni razmenjivač toplote;
- Materijal cevi razmenjivača toplote Č.1215 (P265GH);
- Temperatura napojne vode na ulazu u EKO 102°C;
- Temperatura napojne vode posle EKO 140°C;
- Temperatura dimnih gasova posle EKO (min.) 130°C;
- Radni pritisak sistema 22bar g;
- Poprečni presek postojećeg kanala EKO (AxB) 2600 x 1450 mm;
- Kvalitet prirodnog gasa (po izveštaju Srbijagas) 35.500 kJ/Nm³;
- Maksimalni pad pritiska sa vazdušne strane 150 Pa;
- Maksimalni pad pritiska sa vodene strane 13.000 Pa;
- Snaga na gorionicima 80%;

proračunom je dobijen rok otplate investicije **ROI = 8 meseci**.

Smanjenjem potrošnje gasa, ujedno smanjujemo uticaj na životnu sredinu, smanjenjem azotnih oksida, praškastih materija, ugljen monoksida i ostalih zagađujućih materija.

Nakon zamene ekonomajzera prvog stepena na kotlovima 1 i 2, u rekonstrukciji koja je trajala 10 dana, odmah je bio primetan efekat rekonstrukcije. Na slikama br. 4 i br. 5, prikazano je stanje ekonomajzera tokom i nakon rekonstrukcije.

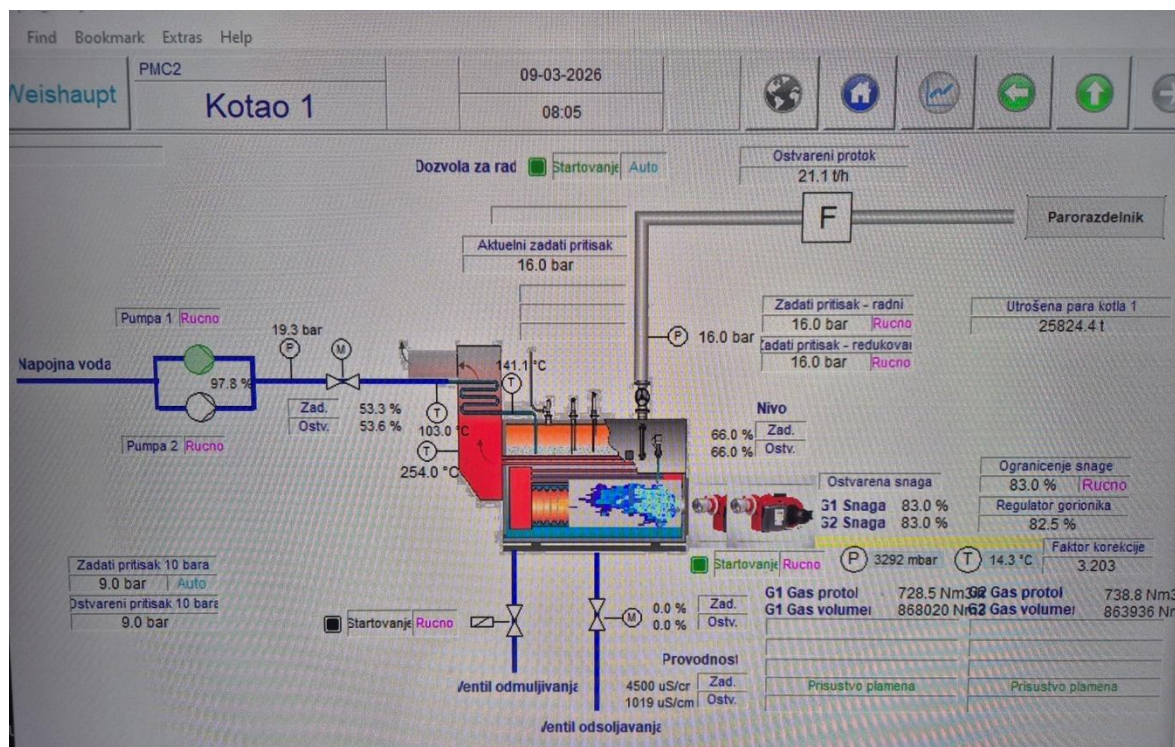


Slika br. 3 - Ekonomajzeri tokom rekonstrukcije – Umka
Figure 3. Economizers during reconstruction — Umka.



Slika br. 4 - Ekonomajzeri nakon rekonstrukcije – Umka
Figure 4. Economizers after reconstruction — Umka.

Na slici br. 5 prikazan je parametar temperature napojne vode, nakon rekonstrukcije ekonomajzera



Slika br. 5 - Parametri kotla nakon rekonstrukcije ekonomajzera
Figure 5. Boiler parameters after economizer reconstruction.

Tabelarni prikaz parametara pre i posle rekonstrukcije EKO

Table showing parameters before and after economizer reconstruction

	Pre rekonstrukcije	Posle rekonstrukcije
Temperatura dimnih gasova pre EKO (°C)	254	254
Snaga gorionika (%)	80	80
Temperatura napojne vode (°C)	125	140
Stepen korisnosti kotlova	88	92
Specifična potrošnja prirodnog gasa (Nm³/tp)	71 - 72,5	67,5 - 69,5

Na osnovu dobijenih parametara i analize četiri meseca rada sa novim ekonomajzerima prvog stepena, ušteda u potrošnji gasa iznosi 4% u odnosu na ukupnu potrošnju prirodnog gasa u kotlarnici, odnosno 3,5% u odnosu na ukupnu potrošnju prirodnog gasa u fabrici. Smanjenjem specifične potrošnje gasa, direktno utičemo na finansijski rezultat fabrike.

Rezultati uštede energije za april 2026, po osnovu novougrađenih EKO na kotlovskom sistemu iznosi:

- Potrošnja gasa za proizvodnju pare u aprilu 2025 (pre rekonstrukcije EKO): 71,09 Nm³/tp;
- Potrošnja gasa za proizvodnju pare u aprilu 2026 (nakon rekonstrukcije EKO): 68,48 Nm³/tp;

Predikcija ostvarenja ušteda u potrošnji gasa, u aprilu 2026:

- Razlika u potrošnji gasa po toni pare april 2025/april 2026: $71,09 - 68,48 = 2,61 \text{ Nm}^3/\text{tp}$ (3,7%).
- Proizvedena količina tehnološke pare u aprilu 2026: 24.001 tp;
- Cena prirodnog gasa u aprilu 2026: 52,17 din/ Nm³;
- Ušteda u potrošnji gasa u aprilu 2026:** $\text{ROI} = 2,61 \text{ Nm}^3/\text{tp} \times 22.500 \text{ tp} \times 52,17 \text{ din/ Nm}^3 = 3.063.683 \text{ din.} = 26.096 \text{ €};$

Na osnovu proračuna sa realnim podacima, dobijenih nakon rekonstrukcije, ROI iznosi 5 meseci;

ZAKLJUČAK

Rekonstrukcija ekonomajzera prvog stepena u kotlarnici, pokazala se kao uspešan projekat koji je doneo značajne benefite u pogledu energetske efikasnosti rada pogona kotlarnice:

1. Smanjenje potrošnje prirodnog gasa

Nakon rekonstrukcije, smanjena je specifična potrošnja prirodnog gasa za proizvodnju tehnološke pare u iznosu od 4%. Sagledavajući godišnji efekat uštede prirodnog gasa, s obzirom na to da pogon kotlarnica utroši 85% od ukupne utrošene količine gasa u fabrici, dolazimo do podatka uštede od 780.000 Nm³ prirodnog gasa za godinu dana.

2. Povećanje stepena efikasnosti kotlovskih jedinica

S obzirom na parametre pre i posle rekonstrukcije, efikasnost kotlovskih jedinica se značajno povećala, što je dovelo do rada kotlarnice sa dva kotla, jer smo ranije, zbog minimalnog nedostatka u kapacitetu, morali raditi sa tri kotla. Trenutni stepen efikasnosti kotlova 1 i 2 je oko 92%.

3. Rok otplate investicije (ROI)

Nakon završene rekonstrukcije i stavljanja ekonomajzera prvog stepena na kotlovima 1 i 2 u eksploataciju, sagledani su realni parametri (potrošnja prirodnog gasa po toni proizvedene tehnološke pare), a konačan rezultat rekonstrukcije je ROI = 5 meseci.

4. Uticaj na životnu sredinu

Smanjenjem potrošnje gasa, ujedno smanjujemo uticaj na životnu sredinu, smanjenjem azotnih oksida, praškastih materija, ugljen monoksida i ostalih zagađujućih materija. Takođe, strategijom niskougljeničnog razvoja, utičemo i na smanjenje emisija CO₂, imajući u vidu smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG).

Literatura

- [1] Termotehničar – Prof. dr. B. Todorović;
- [2] Grejanje i klimatizacija – Recknagel, Sprenger, Schramek, Čeperković;
- [3] Razmenjivači toplote – Boris Slijepčević;
- [4] Termodinamički priručnik – Branislav Živković, Zoran Stajić;
- [5] Dimni gasovi – Izvod iz proračuna količine, entalpije, koef. viška vazduha – Program Weishaupt

Corresponding author:

Milan Mitić

Šef energane

Fabrika kartona Umka d.o.o, 13. oktobra 1, 11260 Umka, Srbija

+381 63 36 43 42

<https://www.umka.rs>

milan.mitic@umka.rs

INFLUENCE OF DRYER FABRIC CONTAMINATION ON DRYING PERFORMANCE: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND PRACTICAL CLEANING SOLUTIONS

UTJECAJ KONTAMINACIJE SUŠNOG SITA NA EFIKASNOST SUŠENJA PAPIRA: EKSPERIMENTALNA ANALIZA I PRAKTIČNA RJEŠENJA ČIŠĆENJA

Nenad Milosavljevic^{1,3}, Claus Roberts², Mario Milosavljevic³

¹**Abo Akademi University**, Faculty of Science and Engineering, Laboratory of Process and Systems Engineering, Turku, Finland; ²**ProJet b.v.**, President ProJet b.v., Weerterveld 51, 6231NC, Meerssen, The Netherlands; ³**Sunnea Oy, Consulting & Engineering**, Air Systems, Drying & Runnability of Paper, Board and Tissue Machines, Jyskä, Finland

Abstract

Dryer fabrics in paper machines are essential for supporting the paper web and enabling efficient heat transfer during drying. Their performance strongly depends on air permeability, which decreases as contaminants accumulate during operation. This study compares new and used dryer fabrics of three types using controlled dynamic drying tests rig. Results show that contamination significantly reduces permeability, leading to lower specific evaporation and increasing drying time.

To connect the experimental findings with industrial practice, a case study using the ProJet fabric cleaning solution is presented. Continuous cleaning with the ProJet system helps maintain high fabric permeability, preventing contamination build-up while using minimal water, compressed air, and energy. Maintaining clean dryer fabrics improves available dryer capacity and overall machine performance across a wide range of paper grades.

Keywords: Dryer fabric; Paper machine drying; Fabric permeability; Fabric contamination; Heat transfer; Drying efficiency; Energy consumption; Moisture profile; ProJet cleaning system; Paper machine performance; Industrial case study.

Izvod

Sušna sita u papirnim strojevima ključni su za podupiranje papirne trake i omogućavanje efikasnog prijenosa topline tijekom sušenja. Njihova efikasnost u velikoj mjeri ovisi o propusnosti zraka, koja se smanjuje kako se tijekom rada nakupljaju nečistoće. Ovo istraživanje uspoređuje nove i korištene sušna sita triju tipova primjenom kontroliranog dinamičkog pilot stroja za sušenje papira. Rezultati pokazuju da kontaminacija značajno smanjuje propusnost, što dovodi do manjeg specifičnog isparavanja i produljenja vremena sušenja.

Kako bi se eksperimentalni rezultati povezali s industrijskom praksom, prikazana je studija slučaja koja koristi ProJet sustav za čišćenje sita. Kontinuirano čišćenje pomoću sustava ProJet pomaže u održavanju visoke propusnosti filca, sprječavajući nakupljanje nečistoća uz minimalnu potrošnju vode, komprimiranog zraka i energije. Održavanje čistih sušnih sita poboljšava raspoloživi kapacitet sušenja i ukupne performanse stroja u širokom rasponu vrsta papira.

Ključne riječi: Sušna sita; Sušenje na papirnom stroju; Propusnost sita; Kontaminacija sita; Prijenos topline; Efikasnost sušenja; Potrošnja energije; Profil vlage; ProJet sustav čišćenja; Performanse papirnog stroja; Industrijski case study.

INTRODUCTION

Drying fabrics in paper machines are essential for supporting the paper web and enabling efficient heat transfer during drying. Their performance depends strongly on permeability, which decreases as contaminants accumulate during operation. This study compares new and used fabrics of three types using a dynamic laboratory test rig to evaluate the impact of fabric condition on drying performance.

The results show that contamination significantly reduces fabric permeability, leading to lower drying rates, higher energy consumption, and uneven moisture profiles. In addition, non-uniform contamination can affect machine runnability by disrupting airflow and causing web instability, wrinkling, and sheet breaks. Industrial observations also confirm that replacing used fabrics with new ones improves drying efficiency and machine speed, although the benefits decline as contamination builds up over time. These findings highlight the importance of maintaining fabric cleanliness to ensure efficient drying and stable machine performance.

BACKGROUND OF RESEARCH

Several studies of the influence of the fabric on contact coefficient and drying rate have been made and plenty of results are available. However, the differences in the results leave room for more investigations. Most of the investigators have used laboratory-scale test rigs in determination of fabric influence on the contact heat transfer coefficient and drying rate. Laboratory-scale experiments have been conducted in static (Arhens, 1984, Wilhelmsson, 1994) or dynamic conditions (Lewyta, 1980). In the present study an attempt is made to simulate real drying section conditions as closely as possible, and thus the experimental measurements were performed on a dynamic paper drying test rig.

EXPERIMENTAL

The experimental study investigated the influence of fabric structure on paper drying under dynamic conditions using fabric tensions comparable to those in full-scale paper machines. A laboratory-scale dynamic drying test rig (Figure 1) was designed for the experiments.

The rig consisted of an air-heated cylinder, an inverter-controlled motor, fabric heating and ventilation systems, a fabric tension adjustment system, and a hood enclosure. The cylinder surface temperature was maintained at 96 °C, while the maximum running speed was 20 m/min. The lower half of the cylinder was covered by the fabric, and warm air was blown through a passage beneath the cylinder to preheat the fabric to approximately 80 °C, simulating real dryer section conditions.

Fabric tension was adjusted using a weighted movable guide roll to reproduce full-scale machine conditions. Paper inlet and outlet temperatures were measured with IR sensors, including a high-response sensor positioned close to the cylinder to minimize cooling effects after sheet release.

Measurement data were collected using a Hewlett Packard 34970 data acquisition system and transferred directly to a PC. The key fabric-related parameters studied were fabric tension and permeability against the paper web.

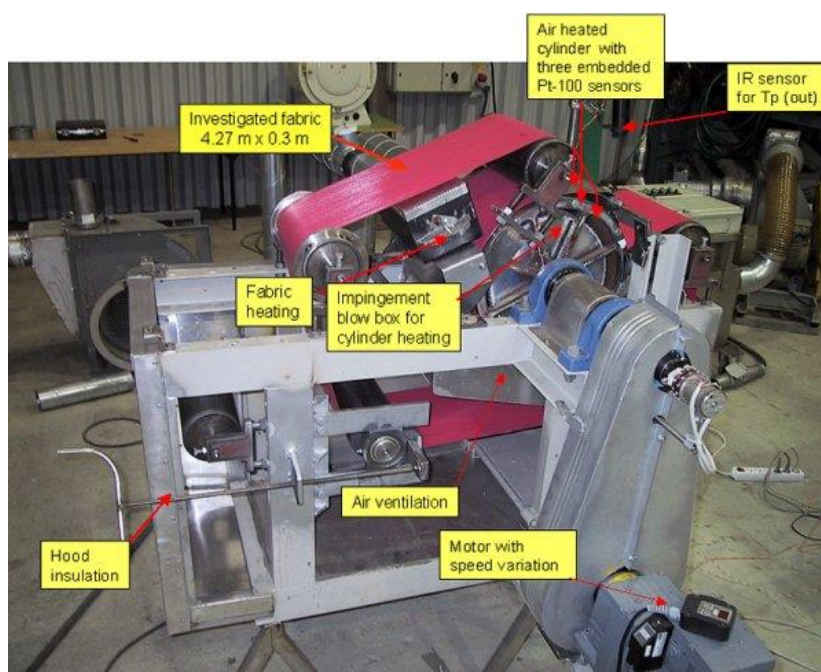


Figure 1. Dynamic paper drying pilot test rig

Slika 1. Pilot-postrojenje za dinamičko ispitivanje sušenja papira.

The most important fabric-related parameters affecting paper drying are fabric tension and permeability. The main characteristics of the investigated fabrics are presented in Table 2.

Table 2. Characteristics of the investigated fabrics**Tabela 2. Karakteristike ispitivanih tkanina.**

Fabric	Paper Machine	Exploitation Time (months)	Position	Reason of Change	Permeability of Clean Fabric (m ³ /m ² h)	Permeability of Used Fabric (m ³ /m ² h)	Decrease in Permeability (%)
A	PM-1	3	1	Accident	1800	1350	25.0
B	PM-2	16	6	Normal	4100	2400	41.5
C	PM-3	12	5	Normal	7000	4750	32.1

DRYING MEASUREMENTS

The influence of fabrics on drying rate and contact heat transfer coefficient was investigated using two methods:

1. Multi-cycle paper drying

The same paper sample was passed several times over the heated cylinder, with the number of cycles varying from 1 to 10. After each cycle, the sample was removed from the cylinder and immediately re-fed into the nip. The dryer speed was maintained at a maximum of 20 m/min, corresponding to a contact time of 1.9 s per cycle. Sample weight was measured before and after drying using a precision balance. Finally, the samples were dried in a laboratory oven at 105 °C for at least 8 h to determine their bone-dry weight.

2. Single-cycle paper drying

Paper samples were passed through the dryer only once. Dryer speed was varied between 1.2 and 20 m/min, corresponding to drying times of 1.9–32.6 s. These measurements were used to determine the contact heat transfer coefficient.

ANALYSIS OF THE RESULTS

The following equations were used to analyze the experimental results. Paper drying time was determined from the cylinder speed and the fabric–cylinder contact length.

Paper moisture content was calculated from the mass of the wet sample and the bone-dry sample.

The average drying rate from the initial to the final moisture content was defined as:

$$DR_{avg} = \frac{m_d(X_1 - X_2)}{A_p t_d} \quad (1)$$

where m_d is the bone-dry mass of the sample, X_1 and X_2 are the moisture contents before and after drying, A_p is the sample area, and t_d is the total drying time during cylinder contact.

The local drying rate, representing the instantaneous evaporation rate during drying, was calculated as:

$$DR_{local} = \frac{dm}{A_p dt} \quad (2)$$

The heat flux from the cylinder was calculated assuming negligible heat transfer between the paper and fabric:

$$q = \alpha(T_c - T_p) \quad (3)$$

When the heat flux and the temperatures of the cylinder surface and paper were known, the contact heat transfer coefficient was determined using:

$$\alpha = \frac{q}{T_c - T_p} \quad (4)$$

where q is the heat flux, T_c is the cylinder surface temperature, and T_p is the paper surface temperature in contact with the cylinder.

Fabric tension generates a compression pressure that presses the paper web against the cylinder. This pressure was expressed as:

$$p = \frac{T}{r}$$

where T is the fabric tension and r is the cylinder radius. Three compression pressures were used in the experiments: 2.19, 4.37, and 6.56 kN/m². The corresponding fabric tensions for a normal drying cylinder (Ø 1830 mm) and the test rig cylinder (Ø 400 mm) are presented in Table 3.

Table 3. Fabric compression pressure and corresponding fabric tension at test rig cylinder (Ø 400 mm) and production cylinder (Ø 1830 mm)

Tabela 3. Pritisak sabijanja tkanine i odgovarajuće zatezanje tkanine na cilindru ispitne instalacije (Ø 400 mm) i proizvodnom cilindru (Ø 1830 mm).

Compression Pressure, p (kN/m ²)	Fabric Tension at Test Rig Cylinder Ø 400 mm (kN/m)	Fabric Tension at Production Cylinder Ø 1830 mm (kN/m)
2.19	0.44	2.00
4.37	0.87	4.00
6.56	1.31	6.00

RESULTS AND DISCUSSION

Permeability measurements showed that the new fabric sections maintained stable and uniform permeability, whereas the used fabrics exhibited significant fluctuations in the machine direction (MD). The uneven permeability profiles and the rapid reduction in permeability confirmed the assumptions made at the beginning of the investigation.

In the second phase of the study, three different fabric types were analyzed to compare the drying performance of contaminated fabrics with that of corresponding new fabrics supplied directly by the manufacturer.

Based on the experimental results obtained from drying 180 g/m² paper under different fabric conditions, drying curves $X = f(t)$ and $R = f(\text{end dry content})$ were developed. The corresponding results are presented in Figures 2–4.

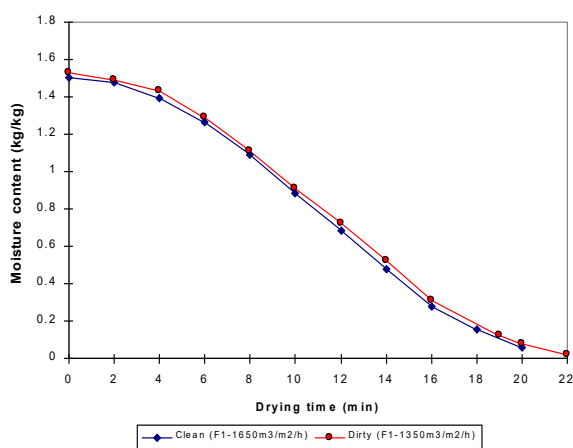


Figure 2a) Experimental results of $X=f(t)$ for the paper dried covered with fabric A

Slika 2a. Eksperimentalna zavisnost $X = f(t)$ za papir sušen uz prekrivanje tkaninom A.

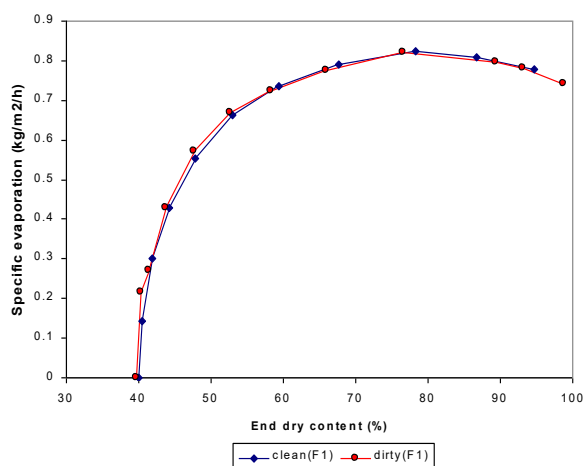


Figure 2b) Experimental results of specific evaporation $R=f(\% \text{ end dry content})$ for the paper dried covered with fabric A

Slika 2b. Eksperimentalna zavisnost specifičnog isparavanja R od konačne suvoće papira sušenog uz prekrivanje tkaninom A.

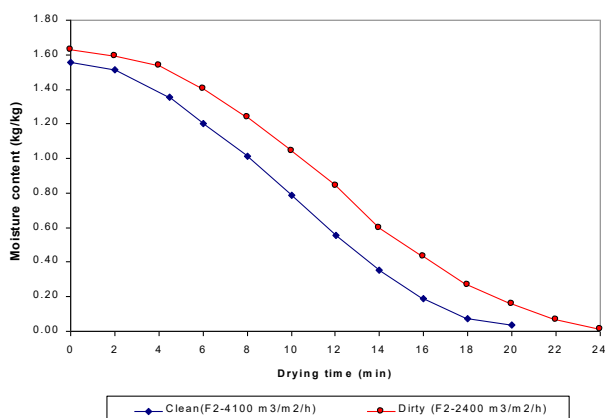


Figure 3a) Experimental results of $X=f(t)$ for the paper dried covered with fabric B

Slika 3a. Eksperimentalna zavisnost $X = f(t)$ za papir sušen uz prekrivanje tkaninom B.

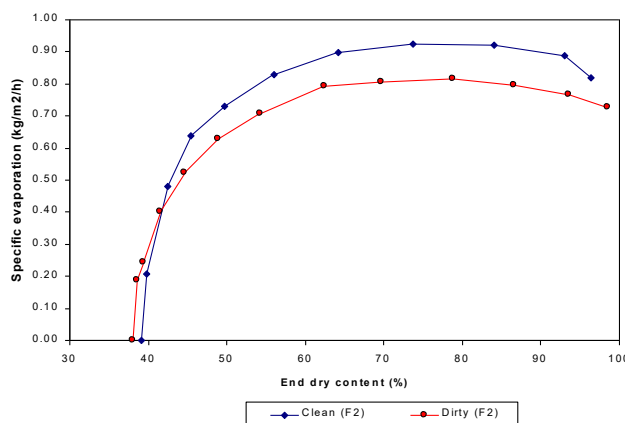


Figure 3b) Experimental results of specific evaporation $R=f(\% \text{ end dry content})$ for the paper dried covered with fabric B

Slika 3b. Eksperimentalna zavisnost specifičnog isparavanja R od konačne suvoće papira sušenog uz prekrivanje tkaninom B.

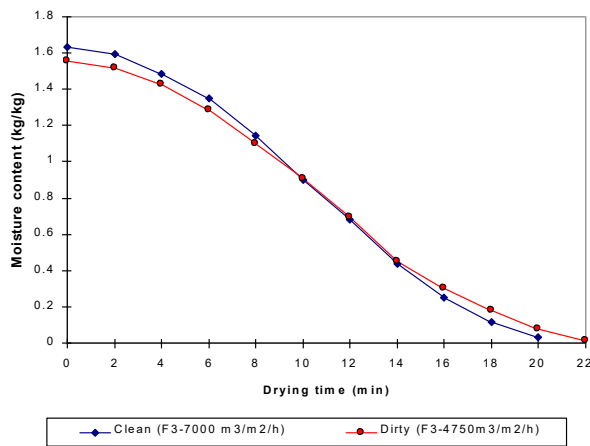


Figure 4a) Experimental results of $X=f(t)$ for the paper dried covered with fabric C

Slika 4a. Eksperimentalna zavisnost $X = f(t)$ za papir sušen uz prekrivanje tkaninom C.

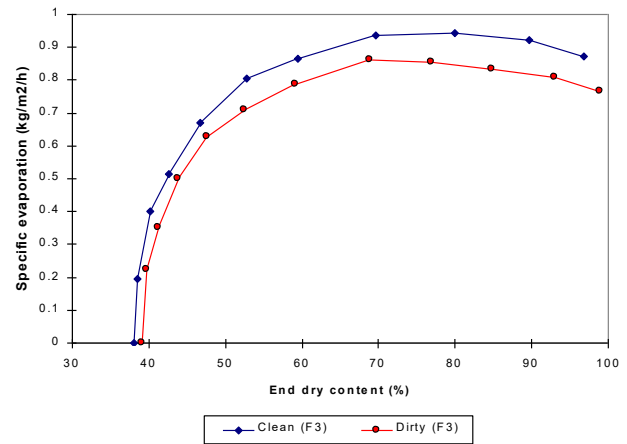


Figure 4b) Experimental results of specific evaporation $R=f(\% \text{ end dry content})$ for the paper dried covered with fabric C

Slika 4b. Eksperimentalna zavisnost specifičnog isparavanja R od konačne suvoće papira sušenog uz prekrivanje tkaninom C.

CONTACT HEAT TRANSFER COEFFICIENT

The contact coefficient was determined from single-cycle experiments only. It was assumed that this set is more suitable for determination of the contact heat transfer coefficient, because paper temperature during the drying is more constant. The contact coefficient has been calculated according to equation (4), when the heat flux q and the cylinder-paper temperature difference are obtained from the measurement results. The calculated contact heat transfer coefficients are illustrated in Figure 5.

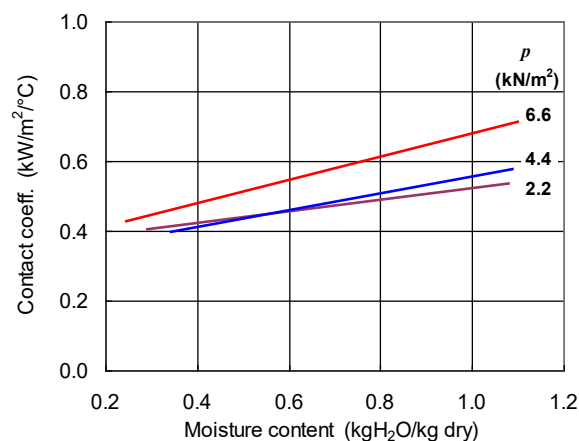


Figure 5. Contact coefficient for fabric A with three tension levels ($p = 2.2, 4.4$ and 6.6 kN/m^2).

Slika 5. Koeficijent kontakta za tkaninu A pri tri nivoa zatezanja ($p = 2,2; 4,4$ i $6,6 \text{ kN/m}^2$).

PROFESSIONAL HIGH PRESSURE WATER JET TECHNOLOGY – POWER CLEANER



Founded in 1998 in the Netherlands, ProJet has grown into an international company with subsidiaries in Japan, Indonesia, and the USA. The company provides local service and warehouse support while serving customers worldwide through its global sales and service network. ProJet specializes in high-pressure water cleaning and cutting solutions for continuous industrial processes and has successfully installed more than 2,500 high-pressure systems around the world (Figure 6).

CLEANERS FOR EVERY REQUEST (FROM WET END TO DRY END)

A clean dryer fabric, with consistently high air permeability, delivers important productivity and performance advantages for dryer section applications. The desired result, of a clean dryer fabric, is a substantial improvement in available dryer capacity. Dryer fabric contamination is on the rise due to the increasing use of secondary fibers, recycling of coated broke, increasing use of sheet fillers, an increased use of recycled mill water supplies, and the increased use of process chemicals. The ProJet system consumes very little water, compressed air, or electrical energy. This innovative cleaning system is being applied successfully to very low basis weight products as well as heavy weight paper board applications (Figure 6).

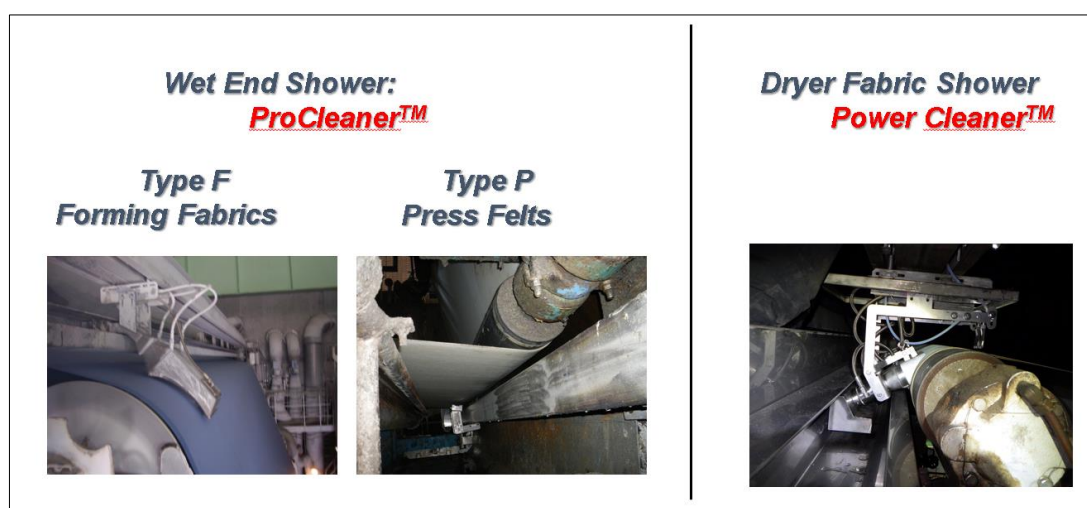


Figure 6. Wide range of ProJet cleaning applications
Slika 6. Širok opseg primene ProJet sistema za čišćenje.

Working principle

The Power Cleaner is a continuous, high-pressure traversing shower specifically designed for the dryer sections of paper, board, and tissue machines. The system continuously removes contaminants from dryer fabrics during operation, ensuring optimal fabric cleanliness without disrupting production.

Maintaining clean dryer fabrics with consistently high air permeability delivers significant operational and production benefits. By preventing the accumulation of fibers, fillers, stickies, and other contaminants, the Power Cleaner helps sustain efficient heat transfer and uniform drying performance throughout the fabric's service life.

The primary outcome of maintaining a clean dryer fabric is a substantial increase in available dryer capacity. Improved fabric permeability enhances drying efficiency, reduces energy consumption, supports higher machine speeds, and contributes to improved sheet quality and machine runnability.

The Power Cleaner operates in two distinct modes (Continuous and batch mode). The working principle of the Power Cleaner is illustrated in Figure 7.



Figure 7. High pressure Cleaner for Dryer Fabric
Slika 7. Visokopritisni sistem za čiščenje sušne tkanine.

Continuous Mode

The continuous cleaning mode is designed for 24/7 operation, ensuring uninterrupted performance during production. The system operates at a pressure of 350 bars and is equipped with six 0.2 mm nozzles. Despite its high cleaning efficiency, the system maintains low utility consumption, using only 1.2 liters of water per minute and 0.8 m³ of compressed air per minute.

Batch (Shock) Mode

The batch, or shock, cleaning mode operates only during production breaks and is designed to provide intensive cleaning when required. In this mode, an additional six nozzles are activated, bringing the total number of nozzles to twelve, each with a size of 0.8 mm. The system operates at a medium pressure of 80 bars and has a water consumption rate of 12.0 liters per minute during batch cleaning.

Installation position

Figure 8. illustrates the application of two ProJet Power Cleaners within a slalom dryer fabric system. The cleaners are strategically positioned to continuously remove contaminants from both sides of the dryer fabric during machine operation. The traversing high-pressure cleaning heads operate across the full fabric width, preventing the accumulation of fibers, fillers, stickies, and other deposits that can reduce fabric permeability.

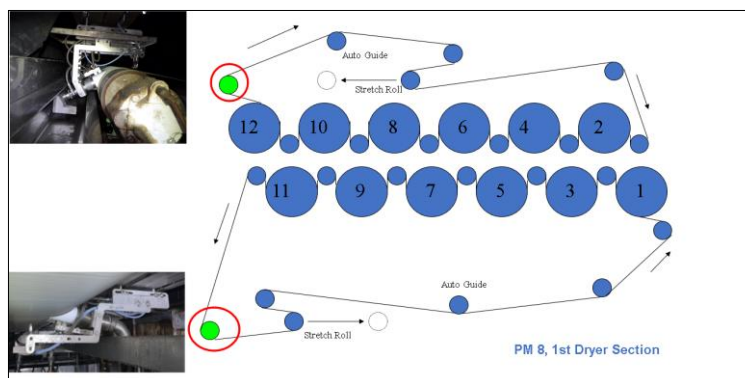


Figure 8. Installation position
Slika 8. Položaj instalacije.

This installation demonstrates how the ProJet Power Cleaner can be integrated into complex slalom fabric runs to provide effective online cleaning and sustained dryer section performance.

Proven Fabric Cleaning Performance

Excellent cleaning results were achieved through the continuous operation of the ProJet Fabric Cleaning System. Following installation, the dryer fabric's condition improved rapidly, with the fabric returning to an almost completely clean state within approximately **12 hours** of start-up.

The cleaning performance was demonstrated in the first dryer section of a machine producing Corrugated Medium (Figure 9). Continuous cleaning effectively removed accumulated contaminants, restoring fabric cleanliness and improving fabric permeability without the need for production interruptions or chemical cleaning.

This rapid restoration of fabric conditions highlights the effectiveness of the ProJet system in maintaining optimal dryer fabric performance, supporting improved drying efficiency, enhanced sheet quality, and extended fabric service life.



Figure 9. Corrugated Medium machine, 1st Dryer Section
Slika 9. Mašina za proizvodnju flutinga, prva sušna grupa.

Installation Benefits – Case Study: Indonesia PM3

Machine Details

- Product: Lightweight Packaging Grades (80 g/m²)
- Furnish: 100% OCC (Old Corrugated Containers)
- Operating Speed: Up to 700 m/min
- Machine Width: 5.8 m

Following the installation, the mill achieved significant operational, quality, and energy-performance improvements:

Key Results:

Water Consumption Reduction

Water usage per shower was reduced from 100 liters/minute to 5 liters/minute, delivering a 95% reduction in water consumption.

Lower Electrical Power Demand

Total installed electrical power decreased from 60 kW to 12 kW, resulting in an 80% reduction in power requirements.

Improved Paper Quality

The installation significantly enhanced the cross-direction (CD) profile while eliminating holes and sheet defects. As a result, reject sheets were reduced by 9.8%.

Fewer Sheet Breaks

Weekly breaks were reduced from 16 to 4, representing a 75% decrease in break frequency and contributing to improved machine efficiency and uptime.

Extended Press Felt Life

Press felt operating life increased from 48 days to 60 days, delivering a 25% improvement in felt longevity and reducing maintenance costs.

Higher Production Speed

Machine speed was successfully increased from 600 m/min to 670 m/min, achieving a 12% production increase while maintaining stable operation.

Restored Dryer Fabric Permeability

Dryer fabrics that had been in service for one year saw permeability restored from 75% to 90% within just one day of start-up, improving drying performance and fabric cleanliness.

Increased Drying Capacity and Energy Savings

Enhanced dryer section performance led to a 10% reduction in steam consumption in the sections where ProJet Cleaners were installed, contributing to lower energy costs and improved drying efficiency.

CONCLUSIONS

This article highlights the importance of fabric condition in paper drying by combining theoretical analysis with a practical case study.

The case study demonstrates that maintaining fabrics in a clean condition can generate significant benefits, including reduced water and energy consumption, fewer sheet breaks, and increased machine speed under real production conditions. Laboratory-scale evaluations validated these assumptions and quantified the improvements in drying time, evaporation efficiency, and heat transfer performance.

The results provide users with a clear understanding of the advantages of keeping fabrics clean during continuous production. Through its solutions, ProJet makes these improvements achievable in practice.

Notation

A	area m ²
c	specific heat J/kg/°C
Δh_{ev}	latent heat of vaporization J/kg
m_d	bone-dry weight of the sample kg
q	cylinder to paper heat flux W/m ²
r	cylinder radius m
R_w	average drying rate kg H ₂ O/m ² /h
t	times
T	temperature °C
T	fabric tension N/m
X	paper moisture content kg H ₂ O/kg dry

Greek Symbols

α_{cont}	cylinder-paper contact heat transfer coefficient W/m ² /°C
-----------------	---

Subscripts

c	cylinder
d	dry, drying
p	paper
w	water

Literature

- [1] Arhens, F., Kartsounes, G. and Ruff, D., (1984), A laboratory study of hot-surface drying at high temperature and mechanical loading, Pulp & Paper Canada, Vol. 85, No. 3, pp. 93-98.
- [2] Lewyta, J. and DeCrosta, E.F., (1980), The effect of dryer fabric characteristics on paper drying, A laboratory study, Tappi, Vol. 63, No.5, pp. 93-95.
- [3] Milosavljevic, N., Heikkilä, P., Ojanen, M. and Saari, J., (2000), Influence of Fabric Structure on the Drying Rate and Cylinder-Paper Contact Heat Transfer Coefficient, Proceedings of the 12th International Drying Symposium (IDS 2000) - Advances in Paper Dewatering 2000, August 28-31, Noordwijkerhout, The Netherlands.

- [4] Paltakari, J. and Karlsson, M., (1994), Effect of dryer fabric design and fabric-related parameters on drying intensity, 9th International Drying Symposium (IDS'94), Gold Coast, Australia, pp. 1247-1254.
- [5] Wilhelmsson, B., Fagerholm, L., Nilsson, L. and Stenström, S., (1992), The influence of the fabric contacts coefficient and heat transfer in paper drying, Drying '92, Elsevier Science, pp. 984-993.
- [6] Wilhelmsson, B., Fagerholm, L., Nilsson, L. and Stenström, S., (1994), An experimental study of contact coefficients in paper drying, Tappi Journal, vol. 77, No. 5, pp. 159–168.
- [7] Wilhelmsson, B. and Stenström, S., (1995), Experimental and computational evaluation of mass transfer resistance of paper dryer fabrics, Nordic Pulp and Paper Research Journal, No. 3, pp. 174-181.
- [8] ProJet B.V., n.d. Power Cleaner for Dryer Fabrics: Continuous & Batch Cleaning. Available at: <https://www.pro-jet.nl/products/power-cleaner-for-dryer-fabrics-continuous-batch-cleaning/> (Accessed: 8 June 2026).
- [9] ProJet B.V., 2022. Keryas Paper, Oman, awards order for Dryer Fabric Cleaners to ProJet. Available at: <https://www.pro-jet.nl/keryas-paper-oman-awards-order-for-dryer-fabric-cleaners-to-projet/> (Accessed: 8 June 2026).
- [10] ProJet B.V., 2022. PT Suparma, Indonesia, awards order for Dryer Fabric Cleaners to ProJet. Available at: <https://www.pro-jet.nl/pt-suparma-indonesia-awards-order-for-dryer-fabric-cleaners-to-projet/> (Accessed: 8 June 2026).

Corresponding author:

Nenad Milosavljevic

ProJet B.V., n.d. Professional High Pressure Water Jet Technology.

Available at: <https://www.pro-jet.nl/> (Accessed: 8 June 2026).

Nenad.Milosavljevic@abo.fi

PREPORUKE ZA PROJEKTOVANJE ENERGETSKI EFIKASNOG SISTEMA VENTILACIJE MAŠINSKE HALE U PAPIRNOJ INDUSTRIJI

RECOMMENDATIONS FOR ENERGY-EFFICIENT DESIGN OF PAPER MACHINE ROOM VENTILATION SYSTEM

Nikola Tanasić^{1a}, Mirjana Stamenić^{2b}, Goran Jankeš^{2c}

¹Akademija strukovnih studija Politehnika, Beograd; ²Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

^a(<https://orcid.org/0009-0005-9278-386X>)

^b(<https://orcid.org/0000-0002-7163-8584>)

^c(<https://orcid.org/0000-0003-3695-53979>)

Izvod

Vazduh u mašinskoj hali u jednoj tipičnoj fabrici papira sadrži značajnu količinu vodene pare i često je kontaminiran papirnim vlaknima i drugom sitnom prašinom. Najveća količina vodene pare i toplote se oslobodi u procesu termičkog sušenja papira u zatvorenoj haubi sušne sekcije mašine. Oslobođena vodena para delimično prodire u prostor mašinske hale kroz procepe i otvore u sušnoj haubi. Pored toga, značajne količine vodene pare se oslobode u mokrom delu papir mašine koji čine natok i sekcija formera, sita i presa.

U zavisnosti od termodinamičkog stanja vazduha često se stvaraju uslovi u kojima dolazi do kondenzacije vodene pare iz vazduha pri kontaktu sa hladnim površinama unutar hale. Ova pojava izrazito nepovoljno utiče na proces proizvodnje i može ugroziti kvalitet proizvedenog papira. Iz ovog razloga pravilno projektovan sistem ventilacije mašinske hale treba da obuhvati sve izvore toplote, vodene pare i čvrstih čestica pre nego što se zagrejan, vlažan i kontaminiran vazduh oslobodi u prostor hale. Vazduh koji se odvodi iz hale putem ventilacionog sistema sadrži značajnu količinu energije koju je potencijalno moguće iskoristiti. Sa druge strane svež vazduh koji se dovodi u mašinsku halu prethodno je potrebno zagrejati za šta se u zimskom periodu koriste značajne količine energije.

U ovom radu su date preporuke i primeri dobre prakse za projektovanje efektivnih i energetski efikasnih sistema ventilacije mašinske hale u papirnoj industriji, čime se obezbeđuju optimalni uslovi vazduha u hali koji su neophodni za pouzdan rad mašine uz smanjene troškova za energiju.

Ključne reči: papir mašina, mašinska hala, sistem ventilacije, energetska efikasnost

Abstract

Air in the machine hall of a typical paper mill contains a significant amount of water vapor and is often contaminated with paper fibers and other fine dust particles. The largest amount of water vapor and heat is released during the thermal drying process of paper inside the enclosed hood of the dryer section of the paper machine. The released water vapor partially flows into the machine hall through gaps and openings in the dryer hood. In addition, substantial quantities of water vapor are generated in the wet end of the paper machine, which includes the headbox, forming section, wire section, and press section.

Depending on the thermodynamic state of the air, conditions often arise in which water vapor condenses upon contact with cold surfaces within the hall. This phenomenon has a highly adverse effect on the production process and may compromise the quality of the paper being produced. For this reason, a properly designed machine hall ventilation system should capture and remove heat, water vapor, and particulate contaminants at their sources before the warm, humid, and contaminated air is released into the hall environment. The air exhausted from the hall through the ventilation system contains a considerable amount of energy that can potentially be recovered and reused. On the other hand, the fresh air supplied to the machine hall must be preheated, which requires significant amounts of energy during the winter period.

This paper presents recommendations and best-practice examples for the design of effective and energy-efficient ventilation systems for machine halls in the paper industry. Such systems ensure optimal indoor air conditions necessary for the reliable operation of paper machines while reducing energy consumption and operating costs.

Key words: paper machine, machine hall, ventilation system, energy efficiency

1. UVOD

Cene energenata su u stalnom porastu naročito u poslednjih godinu dana usled geopolitičkih neastbilnosti i sukoba u Ukrajni i na Bliskom istoku. Energija je bila i ostala jedan od ključnih činilaca u ukupnim troškovima proizvodnje u industriji papira. Pored visoke produktivnosti i strogih kriterijuma po pitanju kvaliteta papira naročito je važno voditi računa o energetske efikasnosti proizvodnog procesa. Potencijali za poboljšanje energetske efikasnosti postoje u svim fazama proizvodnje papira počev od procesa pripreme papirne mase od ulaznih sirovina pa do mehaničkog i termičkog sušenja, namotavanja i rezanja papira. Takođe, značajne količine energije se troše za aktivnosti u uređaje koji nisu direktno vezani za tehnologiju proizvodnje papira a koji su sastavni deo svake fabrike papira kao što su KGH sistemi, osvetljenje, unutrašnji transport, logistika i dr.

U procesu proizvodnje papira oslobađaju se značajne količine otpadne toplote. Vazduh u mašinskoj hali u jednoj tipičnoj fabrici papira sadrži značajnu količinu vodene pare i često je kontaminiran papirnim vlaknima i drugom sitnom prašinom. Najveća količina vodene pare i toplote se oslobodi u procesu termičkog sušenja papira u zatvorenoj haubi sušne sekcije mašine. Oslobodena vodena para delimično prodire u prostor mašinske hale kroz procepe i otvore u sušnoj haubi. Pored toga, značajne količine vodene pare se oslobode u mokrom delu papir mašine koji čine natok i sekcija formera, sita i presa.

Ventilacija mašinske hale u papirnoj industriji igra značajnu ulogu u proizvodnom procesu s obzirom da je za proizvodnju 1 t papira potrebno utrošiti 30 t vazduha [1]. Ventilacija hale je neophodna zbog poboljšanja i ujednačavanja uslova za sušenje papira u sušnoj sekciji papir mašine, poboljšanja radnih uslova u samoj hali, smanjenja troškova za održavanje građevinskog omotača hale, povećanja kvaliteta finalnog proizvoda i produženja radnog veka mašinske i elektro opreme u hali. Sistem za ventilaciju hale ima dva osnovna zadatka [2]:

1. Odvođenje vlažnog, kontaminiranog i zagrejanog vazduha iz hale,
2. Dovođenje svežeg vazduha za ventilaciju hale koji delimično učestvuje i u tehnološkom procesu (proces sušenja u sušnoj haubi ili kod vakuum sistema).

Vazduh koji se odvodi iz hale putem ventilacionog sistema sadrži značajnu količinu energije koju je potencijalno moguće iskoristiti. Sa druge strane svež vazduh koji se dovodi u mašinsku halu prethodno je potrebno zagrejati za šta se u zimskom periodu koriste značajne količine energije. U ovom radu su date preporuke i primeri dobre prakse za projektovanje efektivnih i energetski efikasnih sistema ventilacije mašinske hale u papirnoj industriji, čime se obezbeđuju optimalni uslovi vazduha u hali koji su neophodni za pouzdan rad mašine uz smanjene troškova za energiju.

2. SISTEMI ZA VENTILACIJU MAŠINSKE HALE U PAPIRNOJ INDUSTRIJI

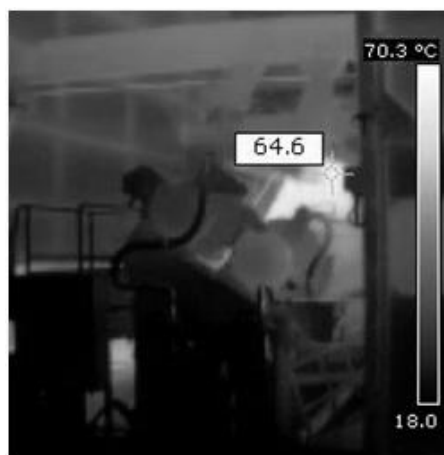
U papirnoj industriji uobičajeno je da se vazduh u mašinskoj hali kondicionira primenom KGH sistema. Najjednostavniji sistemi podrazumevaju zagrevanje svežeg spoljašnjeg vazduha tokom zimske sezone u parnim razmenjivačima toplote. Nešto složeniji sistemi pored zagrevanja svežeg vazduha parom imaju mogućnost rekuperacije otpadne toplote. U skandinavskim zemljama ovo se u značajnoj meri primenjuje tako da se deo otpadne toplote iz sušne sekcije papir mašine iskoristi za predgrevanje svežeg vazduha za ventilaciju hale. Najsofisticiraniji sistemi pored zagrevanja vazduha u klima komorama imaju mogućnost hlađenja i sušenja vazduha, stim da su ovakvi sistemi retki uzimajući u obzir velike količine vazduha koje je potrebno kondicionirati.

Topao vazduh koji sadrži značajnu količinu vodene para prodire u mašinsku halu najčešće kroz procepe i otvore na sušnoj haubi. Pored toga, značajne količine vodene pare se generišu u mokrom delu papir mašine koji čine natok i sekcija formera (slika 1), sita i presa (slika 2). Količina vodene pare koja se oslobodi u proizvodnom procesu je funkcija temperature (parcijalnog pritiska vodene pare), raspoložive površine za isparavanje i brzine mašine. Vodena para koja se oslobodi sa pomenutih izvora transportuje se po čitavoj hali prvenstveno konvekcijom i u izvesnoj meri difuzijom. Ukoliko je parcijalni pritisak vodene pare u vazduhu veći od pritiska zasićenja, koji zavisi od lokalne temperature vazduha, doći će do kondenzacije vodene pare iz vazduha i pojave magle i rošenja. Lokalna temperatura vazduha u hali je funkcija količine svežeg vazduha koji se uvodi u halu sistemom mehaničke ventilacije, dobitaka toplote od proizvodnog procesa i opreme, i gubitaka ili dobitaka toplote kroz građevinski omotač hale.



Slika 1. Formiranje magle u zoni mokrog dela papir mašine [3]
Figure 1. Formation of mist in the wet-end zone of the paper machine [3].

Dobici toplote u hali su uslovljeni tipom i stanjem mašinske i elektro opreme, a takođe zavise i od vrste papira koji se na mašini proizvodi. U odsustvu informacija o dobicima toplote i vodene pare u hali ranija praksa je bila da se ventilacioni sistem dimenzioniše prema preporučenom broju izmena vazduha, 10 h^{-1} u zimskim i 15 h^{-1} u letnjim uslovima [3].



Slika 2. Gubici toplote sa papir mašine u prostor proizvodne hale kod lajm prese
Figure 2. Heat losses from the paper machine to the production hall space at the lime press.

Ukoliko ventilacioni sistem ne zadovoljava željene uslove u hali tendencija je da se broj izmena vazduha poveća što neminovno dovodi do povećanja potrošnje energije. Okvirne vrednosti jediničnih dobitaka toplote, koje su prikazane u tabeli 1, mogu se uzeti kao polazna osnova pri projektovanju ventilacionih sistema. Maksimalni preporučeni jedinični dobici vodene pare iznose $326 \text{ kgH}_2\text{O/t}$, što odgovara latentnim dobicima toplote od 226 kWh/t [3].

Tabela 1. Okvirne vrednosti jediničnih dobitaka toplote od tehnološkog procesa [2]**Table 1. Approximate values of specific heat gains from the technological process [2].**

Oprema	Lokacija	Dobici toplote (kWh/t)
Priprema papirne mase		
Razvlaknjivanje	Radni nivo hale	13,7
Filtriranje	Radni nivo	3,15 kW/m ²
Pumpe i cevovodi	Podrumski nivo hale	5,3
Natok, sita i presa		
Vakuum sistem	Podrumski nivo hale	9,8
Pumpe i cevovodi	Podrumski nivo hale	19,9
Elektromotorni pogoni		
Natok, sita i presa	Radni nivo hale	13,7
Sušna sekcija	Radni nivo hale	4,9
Lajm presa	Radni nivo hale	0,9
Naknadna sušna sekcija	Radni nivo hale	1,7
Kalender	Radni nivo hale	3,9
Sekcija premaza	Radni nivo hale	7,2
Namotač	Radni nivo hale	2,3
Premotač i rezač	Radni nivo hale	11,8

Preporuke za minimalnu i maksimalnu temperaturu vazduha u mašinskoj hali i maksimalnu vlažnost vazduha u mašinskoj hali su sumirane u tabeli 2.

Tabela 2. Preporučene vrednosti temperature i vlažnosti vazduha u mašinskoj hali [2]**Table 2. Recommended values of air temperature and humidity in the machine hall [2].**

Lokacija		Minimalna temperatura vazduha (°C)	Maksimalna temperatura vazduha iznad ambijentalne (°C)	Maksimalna vlažnost vazduha iznad ambijentalne (gH ₂ O/kg _{sv})
Podrumski nivo hale		18	6	7
Radni nivo hale – manipulativna strana	Natok, sita i presa	24	3	7
	Ostale sekcije	18	3	7
Radni nivo hale – pogonska strana	Natok, sita i presa	24	6	7
	Ostale sekcije	18	6	7
Međusprat-nivo plafona sušne haube		18	12	14
Nivo plafona hale		27	14	21

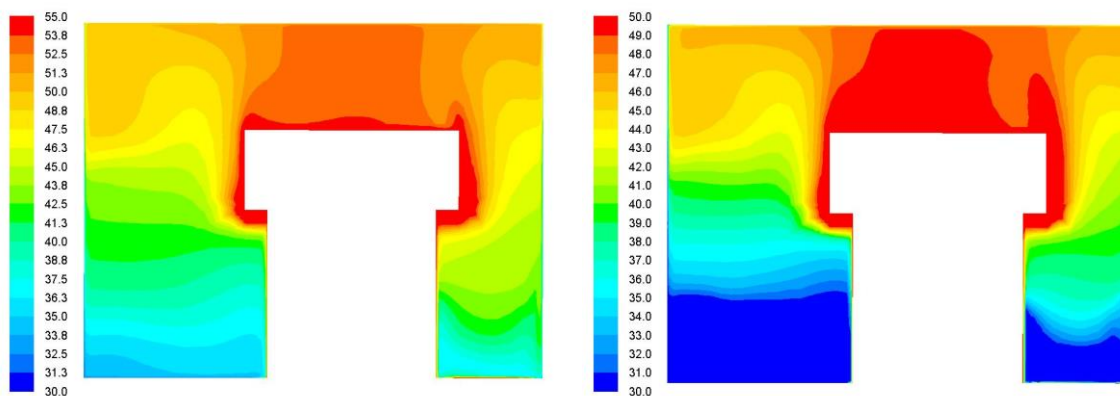
2.1 Strujanje vazduha u mašinskoj hali

Strujanje vazduha unutar mašinske hale je funkcija pritiska i gustine vazduha. U većini slučajeva vazduh struji linijom najmanjeg otpora iz zona sa povišenim pritiskom ka zonama sa nižim pritiskom. U slučaju kada se vazduh za ventilaciju distribuira preko ventilacionih kanala i distributivnih elemenata, njegov početni moment određuje karakter strujanja sve dok ne dođe do disipacije kinetičke energije nakon čega presudni uticaj na kretanje vazduha ima prirodna konvekcija, odnosno sila potiska.

Zbog razlike u gustini vazduha u hali i izvan nje dolazi do prodora hladnog i suvog vazduha iz okoline na nižim nivoima hale dok se sa druge strane zagrejan i vlažan vazduh (koji se odlikuje manjom gustinom) usled sile potiska

podigne do nivoa plafona hale. Ovakva raspodela vazduha u mašinskoj hali potvrđena je merenjima i numeričkim simulacijama, slika 3 [4].

Može se zaključiti da je u mašinskoj hali uvek prisutan gradijent temperature vazduha po visini hale. Ako se u halu dovodi i odvodi podjednaka količina vazduha za ventilaciju, ravnotežni nivo pritiska će biti pozicioniran u nivou plafona sušne haube sa nad pritiskom iznad i pod pritiskom ispod tog nivoa. Iznad ovog nivoa vazduh će težiti da izađe iz hale kroz otvore i procepe u građevinskom omotaču dok će ispod ovog nivoa spoljašnji vazduh prodirati unutar hale.



Slika 3. Numerički simulirano polje temperature (u °C) u dva karakteristična preseka mašinske hale
Figure 3. Numerically simulated temperature field (in °C) in two characteristic cross-sections of the machine hall.

2.2 Prašina u mašinskoj hali

Pri manipulaciji papira na suvom kraju mašine kao i pri namotavanju rolni papira generiše se značajna količina čestica prašine koje dospevaju u vazduh u hali. Emisije čvrstih čestica su veće kod papira sa manjom gramaturom kao što su konfekcijski papir ili ambalažni papiri sa velikim sadržajem recikliranih papirnih vlakana i punila kao i kod papira sa površinskim premazima.

Prašina u vazduhu, kada je prisutna u visokim koncentracijama, predstavlja rizik po zdravlje radnika i povećava rizik od nastanka požara. Glavni izvori prašine su nepravilno rukovanje otpadnim papirom, kao i tupe oštrice na rezačima i namotačima. Prekomerno sušenje papira takođe povećava količinu generisane prašine.

Treba izbegavati upotrebu vazdušnih mlaznica za čišćenje radnih površina jer one podižu prašinu u vazduh. Sprečavanje nastajanja prašine treba da bude primarni cilj, dok čišćenje i sakupljanje čestica treba da budu poslednja opcija kod redovnog održavanja.

Maksimalno dozvoljena koncentracija prašine zavisi od lokalnih propisa iz oblasti bezbednosti i zdravlja na radu, generalno se kreće do 15 mg/m³ za ukupnu prašinu i do 5 mg/m³ za respirabilnu prašinu.

2.3 Elementi ventilacionog sistema

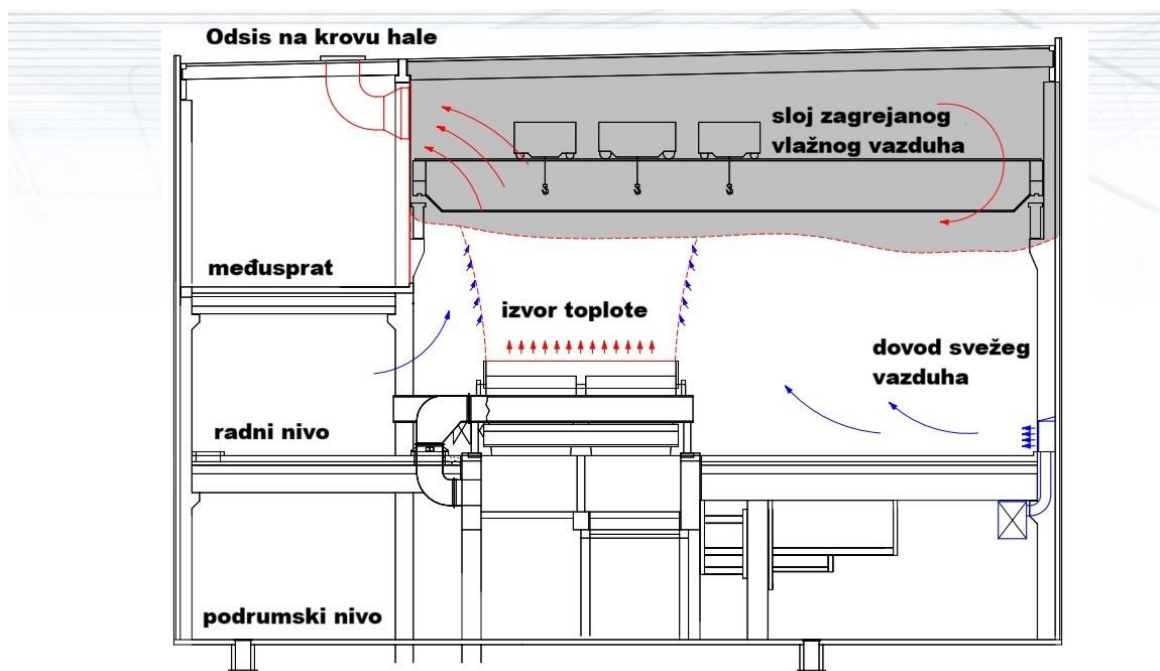
Pravilno dimenzionisan i projektovan sistem ventilacije mašinske hale treba da obuhvati sve izvore toplote, vodene pare i čvrstih čestica pre nego što se zagrejan, vlažan i kontaminiran vazduh rasprostire dalje po hali. Vodena para koja se oslobodi u mokrom delu papir mašine i iz haube sušne sekcije glavni je razlog loših radnih uslova u hali. Moderni sistemi za ventilaciju hale sadrže sledeće elemente [2]:

1. Lokalna ventilacija mokrog dela papir mašine,
2. Lokalna ventilacija sekcije za sušenje premaza,
3. Ventilacija hale (plafonski ventilatori).

Za lokalnu ventilaciju mokrog dela mašine koriste se usisni otvori, kanali i ventilatori koji su postavljeni iznad natoka, sita i presa. Oprema za ventilaciju se obično postavlja u okviru spuštenog visećeg plafona. Vazduh se usisava na pogonskoj strani hale kako bi se obezbedilo strujanje vazduha u smeru manipulativna strana–pogonska strana (slika 4). Otvori za usisavanje su postavljeni tako da vazduh struji iz oblasti sa niskom koncentracijom vodene pare ka oblasti sa visokom koncentracijom vodene pare. Nedovoljan kapacitet ventilacionog sistema dovodi do strujanja vlažnog vazduha prema plafonu hale u vertikalnom pravcu i prema drugim delovima hale u horizontalnom pravcu gde može doći do kondenzacije vodene pare na hladnim površinama.

Svi prekidi sušne haube, kao što su glet cilindar ili lajm presa, su potencijalni izvori toplote i vodene pare u mašinskoj hali. Ovi delovi mašine se opremaju lokalnim sistemima za ventilaciju na sličan način kao i kod mokrog dela papir mašine, sa spuštenim plafonom i usisnim haubama i otvorima na pogonskoj strani mašine.

Odvodni ventilacioni otvori na plafonu hale su neophodni da bi se odstranila vlaga koja nije obuhvaćena lokalnim sistemima ventilacije. Takođe, plafonski ventilatori se postavljaju u sekcijama sa značajnim dobicima toplote kao što su priprema papirne mase, sekcija za sušenje premaza i namotavanje papirne trake. Protok vazduha se dimenzioniše prema toplotnom opterećenju koje se javlja u podrumskom i radnom nivou hale uzimajući u obzir toplotne dobitke od motora, cevovoda i kanala. Plafonske ventilatore treba konfigurisati na taj način da se obezbedi strujanje vazduha u smeru suvi deo hale–mokri deo hale.



Slika 4. Konfiguracija sistema ventilacije (pozicije otvora za dovod svežeg i odvod vlažnog vazduha) [3]

Figure 4. Ventilation system configuration showing the positions of openings for fresh-air supply and moist-air exhaust [3].

Vazduh koji se odvodi iz hale prethodno mora da se dovede u halu i to preko sistema za pripremu i distribuciju svežeg vazduha ili/i infiltracijom spoljašnjeg vazduha kroz otvore u građevinskom omotaču hale. Zagrevanje vazduha za ventilaciju i grejanje hale vrši se u rekuperativnim tornjevima otpadnom toplotom iz sušne sekcije a po potrebi i u parnim ili toplotovodnim razmenjivačima toplote. U slučaju kada se vazduh samo odvodi iz hale, bez dovođenja svežeg zagrejanog vazduha, u zimskom periodu došlo bi do infiltracije hladnog spoljašnjeg vazduha kroz vrata, prozore i druge otvore u omotaču hale što bi lokalno dovelo do smanjenja temperature vazduha u hali, pojave magle i kondenzacije vodene pare.

Kod modernih sistema za ventilaciju hale u papirnoj industriji uobičajeno je da odnos dovedenog i odvedenog vazduha bude na nivou 100 do 105%, što znači da je potrebno kontrolisano obezbediti najmanje podjednaku količinu svežeg vazduha u odnosu na otpadni vazduh koji se odvodi iz hale. U toplijim klimatskim uslovima projektovani odnos je na nivou od 70 do 80% [2].

Za evaluaciju efikasnosti sistema za ventilaciju hale mogu se koristiti različiti pokazatelji. Međutim, treba naglasiti da ni jedan od pokazatelja samostalno ne garantuje dobru efikasnost ventilacionog sistema. Kao pokazatelji najčešće se koriste: (1) ukupna količina vazduha na izlazu iz hale prema produkciji papira (za ambalažni papir preporučene vrednosti su od 25 do 39,4 m³/kg proizvedenog papira), (2) broj izmena vazduha u hali i (3) broj izmena vazduha u mokrom delu mašinske hale [2].

Moguće su sledeće strategije ventilacije u hali papir mašine:

1. Ventilacija sa mešanjem (razblaživanjem) vazduha – svež vazduh se dovodi u prostor velikom brzinom, čime se obezbeđuje dobro mešanje svežeg vazduha sa vlažnim vazduhom u hali čime se smanjuje ili razblažuje koncentracija zagađivača i snižava temperatura i vlažnost vazduha. Vazduh se iz prostora odvodi kombinacijom lokalnih odsisnih rešetki u blizini izvora zagađenja ili putem opšte ventilacije objekta. Ovakva strategija ventilacije je manje efikasna u smanjenju nivoa zagađenja i toplote od drugih metoda. Stariji ventilacioni sistemi koji koriste ovu metodu postali su još manje efikasni jer se protoci vazduha (kapacitet ventilatora) retko povećavaju s porastom toplotnog opterećenja i povećanoj količini vodene pare koje su posledica povećanja proizvodnih kapaciteta.

2. Jednosmerna ventilacija (sa klipnim strujanjem vazduha) – svež vazduh se dovodi malom brzinom i u istom smeru kao i odsisni vazduh kako bi se otklonije nečistoće i toplota. Ovi sistemi su najefikasniji za uklanjanje zagađenja i najčešće se primenjuju u manjim prostorima gde se tokovi vazduha mogu kontrolisati.

3. Potisna ventilacija (pasivno termičko potiskivanje) – svež vazduh male brzine dovodi se pri nivou poda, konvekcijom se zagrejan vazduh i nečistoće potiskuju ka plafonu hale odakle se preko odsisnih otvora odvede u atmosferu. U ovom slučaju dominantan je mehanizam prirodne konvekcije usled niže gustine toplog i vlažnog vazduha u odnosu na svež vazduh. Potisna ventilacija je prvobitno našla primenu u skandinavskim fabrikama i postala je standard za nova postrojenja.

4. Lokalizovana ventilacija (tačkasto kondicioniranje vazduha) – manje koliline kondicioniranog vazduh se dovodi direktno u radne zone, stvarajući zone komfora za radnike.

3. PRORAČUN POTREBNE KOLIČINE VAZDUHA ZA VENTILACIJU

Količina vazduha koja je potrebna efektivnu i efikasnu ventilaciju mašinske hale u papirnoj industriji zavisi od više faktora, uključujući sledeće:

Veći intenzitet proizvodnje, tj. veći obim proizvodnje papira na mašini dovodi do generisanja veće količine pare i toplote što podrazumeva potrebu za velim protokom svežeg vazduha. Kapacitet sistema za ventilaciju takođe zavisi od tipa i gramature papira. Papiri manje gramature podložniji su vitoperenju tj. osetljivi su na velike brzine strujanja vazduha.

Pri većoj brzini mašine povećava se količina oslobođene pare i toplote u hali. Former sekcije sa gornjim sitom (*top wire*) i *gap* formeri zahtevaju veće količine odsisnog vazduha nego klasični cilindrični formeri. Povećanje temperature papirne mase u natoku pozitivno utiče na proces odvodnjavanja i sušenja ali dovodi do većeg intenziteta difuzije vodene pare u vazduh u hali. Otvorene i poluotvorene sekcije za sušenje papira podrazumevaju veće količine odsisnog vazduha nego sušne sekcije sa zatvorenom haubom.

Kod oblasti sa hladnijom klimom potrebne su veće količine svežeg vazduha. Oblasti sa toplijom klimom imaju potrebu za većim protokom vazduha tokom leta. Geometrija i konfiguracija objekta hale takođe može da utiče na rad sistema ventilacije. Vazduh se kreće putem najmanjeg otpora, što može dovesti do strujanja vazduha u kratkoj vezi između dovodnih i odvodnih otvora tako da se u hali stvaraju stagnantne zone vazduha u kojima se akumulira toplota i vlaga. Ova pojava se sprečava pravilnim izborom pozicije ubacnih i odsisnih otvora kao i pažljivom selekcijom tipa i konstrukcije distributivnih elementara (ventilacionih anemostata i rešetki).

Ukoliko u jednoj hali postoji više papir mašina zadatak koji se postavlja pred projektante sistema ventilacije je još više zahtevan i izazovan. Loša zaptivenost hale dovodi do nekontrolisanog prodora spoljašnjeg vazduha u halu čime se povećava rizik od kondenzacije vodene pare na slabije termički izolovanim delovima zidova i krova hale.

Prilikom određivanja potrebne količine vazduha za ventilaciju, za lokalnu ventilaciju na delovima sekcije formera, može se iskoristiti sledeća jednačina [2]:

$$\dot{V} = (\sum_i^n B_i + vw \sum_i^n F_i) C_t$$

gde su:

$\dot{V}$ – zapreminski protok vazduha, m³/s

v - brzina mašine, m/s

w – širina papirne trake, m

n – broj odsisnih otvora

C_t – koeficijent korekcije za temperaturu papirne mase u natoku ($C_t = 1$ pri $t=49^\circ\text{C}$; $C_t = 1,3$ pri $t=54,5^\circ\text{C}$, $C_t = 1,8$ pri $t=60^\circ\text{C}$)

$\sum_i^n B_i$ - zbir pojedinačnih protoka, m³/s

$\sum_i^n F_i$ - zbir faktora protoka vazduha prema tipu former sekcije i broju odsisnih otvora, m

Za former sekciju (*fourdrinier*) kod natočnog korita $F=0,04$ m, $B=5,2$ m³/s, kod gauč jame $F=0,04$ m, $B=0$ m³/s. Za gap former sekciju ukupno $F=0,4$ m, $B=0$ m³/s. Za ostale tipove former sekcija i pojedinačne lokacije odsisavanja podaci se mogu pronaći u tehničkim preporukama TAPPI TIP 0404-50 [2].

Vazduh iznad sekcije formera je blizu stanja zasićenja sa vodenom parom. Odsisni otvori koje se nalaze u blizini mlaznica ili u slučaju prevelike brzine vazduha na odsisnim otvorima po pravilu dovode do toga da odsisani vazduh sadrži kapljice vode i papirna vlakna. Pre odsisnog ventilatora kapljice vode i čvrste čestice se moraju odstraniti iz vazduha eliminatorima sa lamelama, ciklonskim ili vrtložnim eliminatorima kapljica. Važno je napomenuti da ni jedan sistem ne može da eliminiše pojavu magle u potpunosti već vlagu odvodi dalje od former sekcije.

Kako se u former sekciji generiše najveća količina vodene pare, iznad ove sekcije i sekcije presa (mokri deo papir mašine) primenjuje se sistem ventilacije sa odsisnim otvorima u spušenom plafonu. Odsisni ventilatori sa kanalima odvođaju vazduh i vodenu paru iz prostora iznad ovog dela papir mašine. Vodena para koju ne zahvati sistem odsisavanja na formerima povećava količinu vodene pare koju mora ukloniti sistem ventilacije u ostatku hale.

Spušteni plafon se obično postavlja iznad mokrog dela mašine u mašinskim halama sa čeličnom nosećom konstrukcijom pri čemu od predstavlja fizičku barijeru koja sprečava prodor vodene pare u prostor noseće rešetkaste konstrukcije. Vazduh se odsisava sa pogonske strane mašine. Barijera ili zavesa koja se proteže od donje ivice rešetkaste konstrukcije do ispod međusprata (mezanina), postavlja se duž cele dužine spušenog plafona kako bi se ograničila količina vazduha koja se uvlači sa pogonske strane mašine.

Spušteni plafon treba da se prostire u smeru kretanja mašine od natočnog korita do najudaljenije tačke sekcije presa. U poprečnom smeru mašine, spušteni plafon treba da se proteže od stuba dizalice na pogonskoj strani do izvan operatorske strane sita. Plafon treba da prelazi ivicu mašine za najmanje 1,1 m na svakih 6 m visine na kojoj se nalazi iznad radnog poda. Odsisavanje treba vršiti sa donje strane spušenog plafona uz ivicu pogonske strane ili duž gornjeg dela bočne zavesa.

Preporučeni protok vazduha za ventilaciju u spušenom plafonu iznad mokrog dela papir mašine iznosi [2]:

$$\dot{V} = [(0,0107v + B)AC_tC_w + nDw]E$$

gde su:

$\dot{V}$ – zapreminski protok vazduha, m³/s

v - brzina mašine, m/s

A – površina spušenog plafona iznad mokrog dela papir mašine, m²

$B=0,0322$ m³/s/m², konstanta

C_t – koeficijent korekcije za temperature papirne mase u natoku ($C_t = 1$ pri $t=49^\circ\text{C}$; $C_t = 1,38$ pri $t=54,5^\circ\text{C}$, $C_t = 1,87$ pri $t=60^\circ\text{C}$)

C_w – korekcija za površinu natoka ($C_w = 1$ za *fourdrinier* tip; $C_w = 1,25$ za top i gap formere i sita)

$D=3,1$ m³/s/m, konstanta za parnu kutiju i parne mlaznice

E – korekcija za protok odsisavanja ($E = 1$ sa primenom bočne vertikalne zavesa/barijere; $E = 1,25$ bez bočne vertikalne zavesa/barijere)

n – broj pranih kutija i/ili parnih mlaznica

w – širina papirne trake, m

Preporuke za protoke vazduha za druge delove mašinske hale mogu se pronaći takođe u tehničkim preporukama TAPPI TIP 0404-50 [2].

4. RAČUNSKI PRIMER

Primer je ograničen na sistem za ventilaciju hale u mokrom delu papir mašine. Na mašini sa gap former sekcijom i sekcijom presa ukupne dužine 32 m se proizvodi papir za kopiranje (80 g/m^2) pri produkciji $63,2 \text{ t/h}$. Širina papirne trake je $9,2 \text{ m}$, a brzina papirne trake $22,8 \text{ m/s}$. Former sekcija je bez parnih kutija. Temperatura papirne mase u natoku iznosi 49°C . Primenom metodologije koja je data u prethodnom poglavlju dobija se:

- Za lokalnu ventilaciju kod natočnog korita:

$$\dot{V} = (\sum_i^n B_i + vw \sum_i^n F_i) C_t = (0 + 22,8 \cdot 9,2 \cdot 0,4) \cdot 1 = 83,9 \text{ m}^3/\text{s} = 302.050 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Za ventilaciju spuštenog plafona iznad sekcije formera i presa, sa bočnom vertikalnom zavesom:

$$\dot{V} = [(0,0107v + B)AC_t C_w + nDw]E = [(0,0107 \cdot 22,8 + 0,0322) \cdot 9,2 \cdot 32 \cdot 1 \cdot 1,25 + 0 \cdot 3,1 \cdot 9,2] \cdot 1 = 101,6 \text{ m}^3/\text{s} = 365.850 \text{ m}^3/\text{h}$$

5. ZAKLJUČAK

Održavanje preporučenih parametara vazduha u mašinskoj hali u papirnoj industriji ključno je za obezbeđivanje optimalnih uslova za pouzdanu proizvodnju papira visokog kvaliteta. U ovom procesu sistem ventilacija mašinske hale igra ključnu ulogu. U radu su date preporuke za vrednosti temperature i vlažnosti vazduha u mašinskoj hali po pojedinim sekcijama mašine. Takođe su analizirane moguće strategije ventilacije i tipovi ventilacionih sistema koji se primenjuju u papirnoj industriji. U radu je još prikazana metodologija za proračun potrebne količine vazduha za ventilaciju dok je na konkretnom primeru određen potreban protok vazduha za ventilaciju mokrog dela papir mašine. Uzimajući u obzir velike količine vazduha koje se koriste za potrebe ventilacije naglašeno je da se pored efektivnosti od ovih sistema zahteva i energetska efikasnost rad u cilju smanjenja troškova za energiju.

Literatura

- [1] Tähti E., Niemelä R., Leimu J., Target levels and design methodology for paper machine room ventilation, in: Goodfellow H., Tähti E., ed. Ventilation '97: Global developments in industrial ventilation. Proceedings of the 5th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control, Sep. 14-17, 1997, Ottawa, Canada
- [2] TAPPI TIP 0404-50, Paper machine room ventilation guidelines, 2009
- [3] Nielsen, J., Paper machine room ventilation guidelines, TAPPI PaperCon'09 Conference, May 31-June 3, 2009, St. Louis, USA
- [4] Tanasić, N., Jankes, G., Skistad, H., CFD analysis and airflow measurements to approach large industrial halls energy efficiency: A case study of a cardboard mill hall, Energy and Buildings, Vol 43 (6), 2011, pp. 1200-1206, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.034

Corresponding author:

dr Nikola Tanasić, profesor strukovnih studija
Akademija strukovnih studija Politehnika
Katarine Ambrozić 3, 11000 Beograd, Srbija
ntanasic@politehnika.edu.rs

ULOGA I KOMPETENCIJE LICENCIRANIH ENERGETSKIH SAVETNIKA U SISTEMU ENERGETSKOG MENADŽMENTA REPUBLIKE SRBIJE SA OSVRTOM NA ENERGETSKI PREGLED OBVEZNIKA SISTEMA

MANDATORY ENERGY AUDITS FOR ENTITIES SUBJECT TO THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM IN THE REPUBLIC OF SERBIA: ROLE AND COMPETENCIES OF LICENSED ENERGY ADVISORS

Mirjana Stamenić^{1a}, Nikola Tanasić^{2b}

¹University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering; ²Academy of Applied Studies Polytechnic Belgrade, Serbia

^a(<https://orcid.org/0000-0002-7163-8584>)

^b(<https://orcid.org/0009-0005-9278-386X>)

Izvod

Energetska efikasnost predstavlja jedan od stubova savremene energetske politike Republike Srbije, čija uspešna implementacija zavisi od funkcionalnog sistema energetskeg menadžmenta. U tom kontekstu, licencirani energetski savetnici zauzimaju važnu ulogu u sprovođenju energetskih pregleda i pružanje stručne podrške obveznicima sistema.

Ovaj rad analizira pravni okvir, kompetencije i praktičnu ulogu energetskih savetnika u sistemu energetskeg menadžmenta, sa posebnim osvrtom na metodologiju sprovođenja energetskog pregleda. Zakonom o efikasnom korišćenju energije (ZEERUE) precizno su definisani uslovi za sticanje statusa licenciranog energetskog savetnika, a sistem obuke strukturiran je kroz tri oblasti – mašinsku tehniku, elektrotehniku i arhitekturu – obezbeđujući multidisciplinarni pristup. Program kombinuje teorijsku nastavu, praktične vežbe i izradu individualnih izveštaja pod mentorstvom, dok ispitna procedura uključuje testiranje i usmenu odbranu samostanog rada pred komisijom.

U okviru rada definisana je uloga i metodologija sprovođenja energetskog pregleda koji predstavlja osnovni instrument evaluacije energetskih performansi. U izveštaju o sprovedenom energetskom pregledu, licencirani energetskisavetnici identifikuju mere koje obezbeđuju ekonomske benefite (smanjenje troškova za energiju i energente) i ekološke efekte (smanjenje emisija gasova koji imaju negativan uticaj na životnu sredinu).

Rad zaključuje da uspeh sistema energetskeg menadžmenta zavisi od sinergije regulatornog okvira, stručnih kompetencija energetskih savetnika i spremnosti obveznika za implementaciju preporučenih mera, čime se doprinosi održivom razvoju energetskog sektora Republike Srbije.

Ključne reči: sistem energetskeg menadžmenta, energetski pregled, energetski saetnik, energetska efikasnost

Abstract

Energy efficiency is a key pillar of the Republic of Serbia's contemporary energy policy, and its successful implementation depends on a functional energy management system. In this context, licensed energy advisors play an important role in conducting energy audits and providing professional support to system obligors.

This paper analyzes the legal framework, competencies, and practical role of energy advisors in the energy management system, with particular emphasis on energy audit procedures. The Law on Efficient Use of Energy precisely defines the conditions for obtaining the status of licensed energy advisor, and the training system is structured through three areas – mechanical engineering, electrical engineering, and architecture – ensuring a multidisciplinary approach. The program combines theoretical training, practical exercises, and preparation of individual reports under mentorship, while the examination procedure includes testing and oral defense before a commission.

In the paper, the role and methodology of conducting energy audits, which are fundamental instruments for evaluating energy performance, are defined. In the energy audit report, licensed energy advisors identify measures that provide economic benefits (reduction of energy and fuel costs) and ecological effects (reduction of emissions of gases that have a negative environmental impact).

The paper concludes that the success of the energy management system depends on the synergy of the regulatory framework, professional competencies of energy advisors, and the willingness of obligors to implement recommended measures, thereby contributing to the sustainable development of the energy sector of the Republic of Serbia.

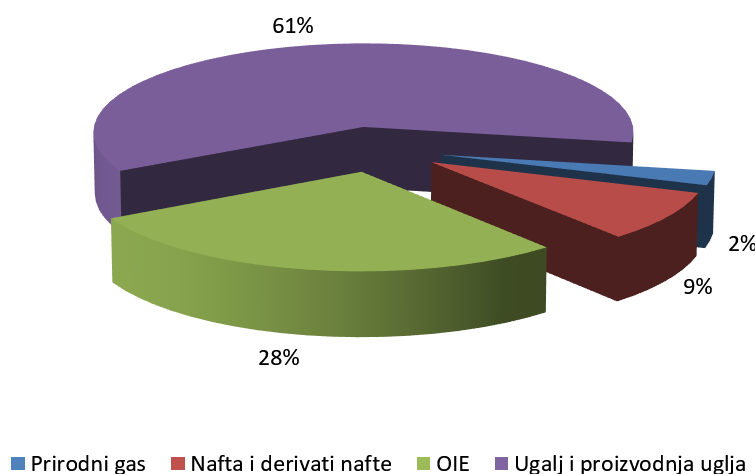
Keywords: energy management system, energy audit, energy advisor, energy efficiency

1. UVOD

Republika Srbija svoju energetska politiku sprovodi primenjujući Strategiju razvoja energetike Republike Srbije [2], implementacijom odredbi Zakona o energetici [1] i Zakona o energetska efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [3], kao i pratećih podzakonskih akata – uredbi i pravilnika. Godišnje potrebe za energijom i energentima koje treba obezbediti za sigurno i kvalitetno snabdevanje krajnjih kupaca/potrošača utvrđuju se Energetskim bilansom. Energetskim bilansom Republike Srbije utvrđuju se izvori obezbeđivanja potrebnih količina energije/energenata, kao i potreban nivo zaliha i rezervnih kapaciteta energetska objekata za sigurno snabdevanje kupaca.

Osnovni energetska resursi naše zemlje su ugalj, nafta, prirodni gas, uljni škriljci, kao i obnovljivi izvori energije. Rezerve kvalitetnijih energenata (nafta i prirodni gas) su simbolične i čine manje od 1 % geoloških rezervi, dok preostalih 99 % energetska rezervi čine različite vrste ugljeva sa najvećim udelom lignita (95 %).

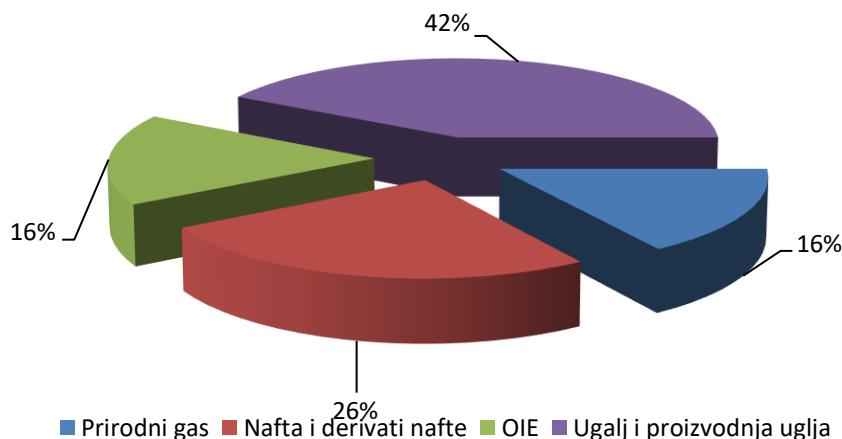
Saglasno podacima objavljenim u [4] u Republici Srbiji je u 2025. godini proizvedeno ukupno 9,566 Mten primarne energije. Struktura proizvodnje primarne energije je prikazana na slici 1.



Slika 1 Struktura proizvodnje primarne energije u 2025.

Figure 1. Primary energy production structure in 2025.

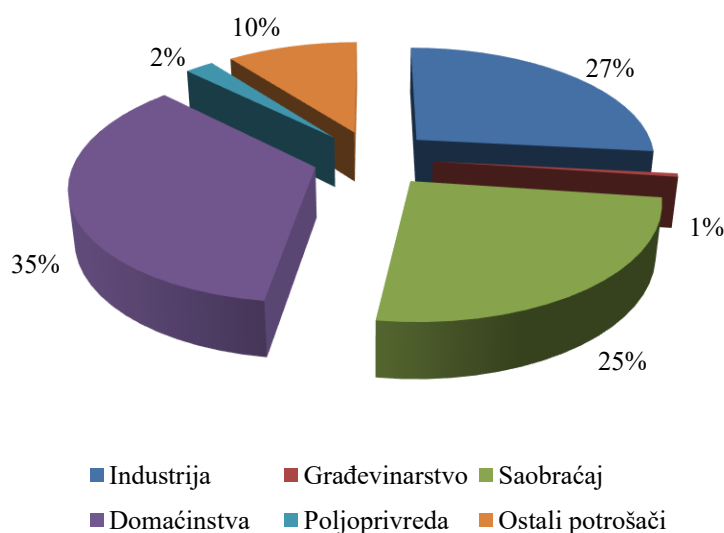
Republika Srbija je u 2025. godini ~40% primarne energije uvezla (53,7% nafte i derivata nafte, 27,1% prirodnog gasa, 11,5% uglja, 7,4% električne energije i 1% biomase). Udeli pojedinih energenata u raspoloživoj primarnoj energiji su prikazani na slici 2. U ukupnom neto raspoloživom miksu primarne energije dominira ugalj (42 %), zatim su tu tečna goriva sa 26 %, prirodni gas sa 16 % i OIE sa 16 %.



Slika 2 Udeli energenata u ukupno raspoloživoj primarnoj energiji za 2025.

Figure 2. Shares of energy sources in total available primary energy in 2025.

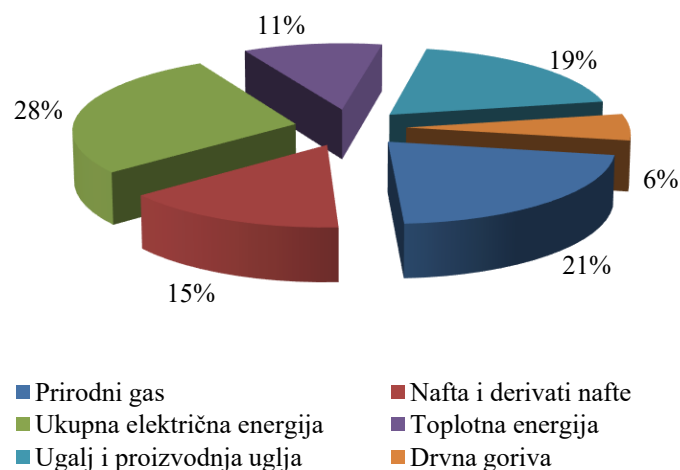
Prema energetsom bilansu za 2025.godinu ukupno 9,623 Mten (58,8 % od ukupno raspoložive primarne energije) je bilo raspoloživo za finalnu potrošnju (za energetske i neenergetske svrhe). Na slici 3 prikazana je struktura potrošnje finalne energije za energetske svrhe po sektorima potrošnje. Najviše finalne energije je potrošeno u sektoru domaćinstava (35 %), a zatim sledi industrijski sektor (27 %) i sektor saobraćaja sa (25 %).



Slika 3 Struktura potrošnje finalne energije za energetske svrhe u RS za 2025.

Figure 3. Final energy consumption structure for energy purposes in the Republic of Serbia in 2025.

Na slici 4 prikazani su udeli pojedinih vrsta energenata/energije koji su bili zastupljeni u konzumu industrijskog sektora u Republici Srbiji u 2025. godini. Dominantna je potrošnja električne energije i prirodnog gasa sa 28 i 21 %, zatim slede ugalj (19 %) i tečna goriva (15 %). Obnovljivi izvori energije u industrijskom sektoru su zastupljeni samo u obliku drvne biomase sa 6 % ukupno utrošene finalne energije.



Slika 4 Udeo pojedinih energenata u finalnoj potrošnji energije u industrijskom sektoru RS u 2025.

Figure 4. Shares of individual energy sources in final industrial energy consumption in the Republic of Serbia in 2025.

Kada se govori o efikasnom korišćenju energije u sektorima finalne potrošnje energije, Srbija ima nezavidan položaj u odnosu na zemlje članice Evropske zajednice. Način na koji se energija koristi opisan je indikatorom – energetske intenzitet. Na nivou države, energetske intenzitet se definiše kao odnos ukupno utrošene finalne energije i bruto domaćeg proizvoda. U poređenju sa zemljama Evropske zajednice, industrijski sektor Republike Srbije ima u proseku 1,5 do 2 puta veći energetske intenzitet. To znači da postoji značajan potencijal za uštedom, pri čemu je vrednost energije koja se uštedi primenom mera unapređenja energetske efikasnosti mnogo viša od vrednosti samih izvora primarne energije.

2. SISTEM ENERGETSKOG MENADŽMENTA U REPUBLICI SRBIJI

Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [3] koji je usvojen aprila 2021. uređuje oblast implementacije sistema energetskeg menadžmenta u sektorima potrošnje finalne energije. Cilj uspostavljanja šeme energetskeg menadžmenta je da u prvom koraku obaveže velike potrošače u industriji i komercijalnom i javnom sektoru da racionalno koriste energiju i ostvare uštede primenom mera za koje tehnološko-ekonomska analiza pokaže da mogu doneti maksimalne efekte uz minimalna ulaganja.

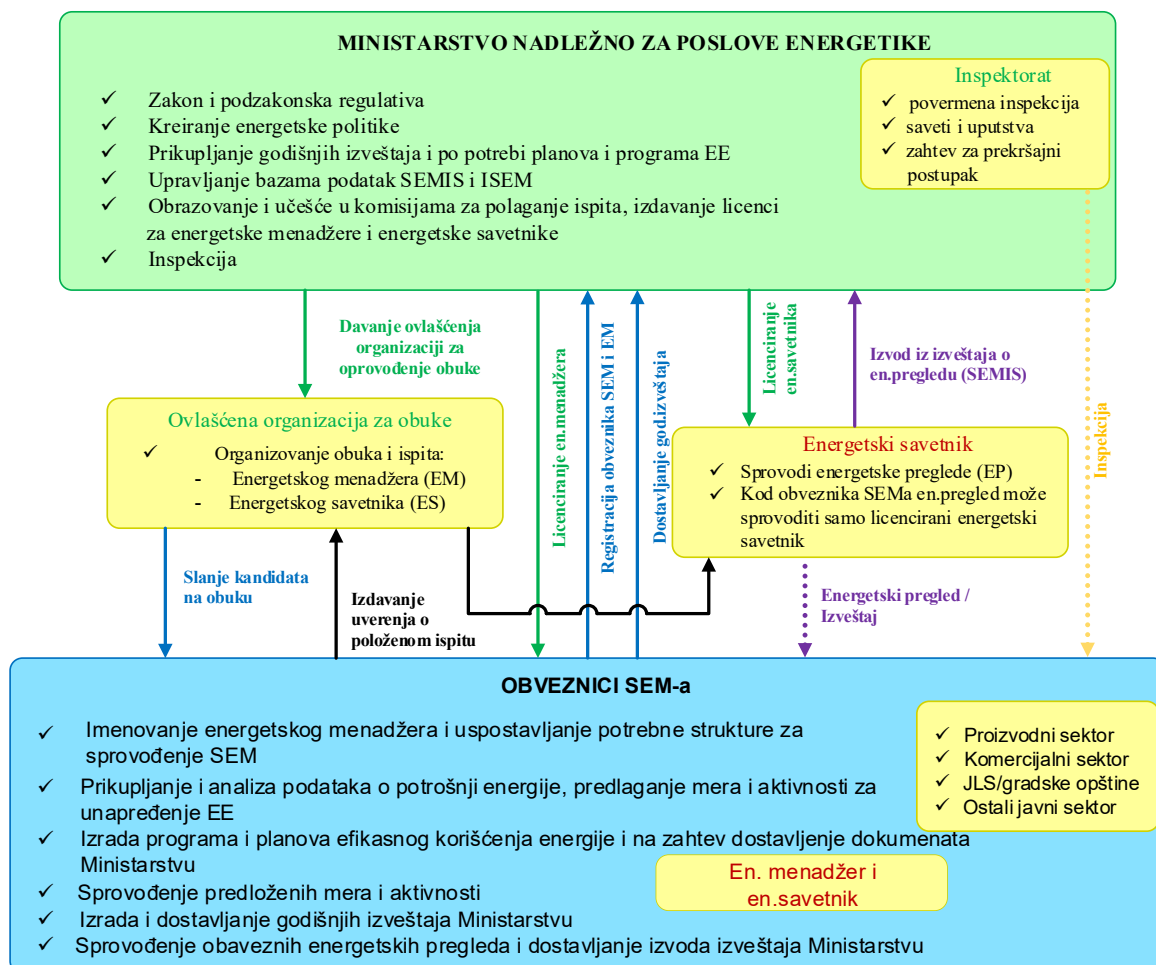
Sistem energetskeg menadžmenta (SEM) predstavlja sistem organizovanog praćenja i upravljanja energetskeim tokovima od mesta proizvodnje, preko sistema prenosa i distribucije, pa sve do krajnje potrošnje čiji je cilj optimizacija i racionalizacija korišćenja energenata i energije.

U oblasti industrijske energetike obveznici SEM-a su privredna društva koja na najmanje jednoj lokaciji koja se vodi na posebnoj adresi imaju objekte za obavljanje proizvodne delatnosti čija je ostvarena godišnja potrošnja primarne energije veća od propisanih graničnih vrednosti potrošnje primarne energije [5]. Godišnji cilj uštede energije privrednog društva za tekuću kalendarsku godinu iznosi 1 % od ostvarene potrošnje primarne energije u prethodnoj kalendarskoj godini, odnosno 5 % uštede za posmatrani period od pet godina.

Obveznici SEM-a su dužni da imenuju lice – energetskeg menadžera koje će biti odgovorno za poslove prikupljanja i analize podataka o načinu korišćenja energije, pripremem programa i planova energetske efikasnosti, pripreme godišnjih izveštaja o ostavrenim ciljevima i ostale aktivnosti i mere koje su propisane u [3].

Glavni subjekti SEM-a u Republici Srbiji su: ministarstvo zaduženo za poslove energetike, obveznici sistema energetskeg menadžmenta, ovlašćena organizacija za obuku, energetskei menadžeri i ovlašćeni energetskei savetnici.

SISTEM ENERGETSKOG MENADŽMENTA



Slika 5 Šema SEM u Republici Srbiji [8]

Figure 5. Scheme of the Energy Management System in the Republic of Serbia [8].

Šematski prikaz subjekata i njihovih relacija u SEM-u prikazan je na slici 5. Ministarstvo nadežno za oblast energetike uređuje politiku energetike i energetske efikasnosti države, donosi zakonska i podzakonska akta u vezi sa SEM-om, vodi registar obveznika SEM i imenovanih energetske menadžera (EM) i energetske savetnika (ES), prikuplja i proverava periodične godišnje izveštaje obveznika i formira bazu godišnjih izveštaja, prikuplja, ocenjuje i arhivira u bazu izveštaje o obaveznim energetske pregledima obveznika, izdaje licence energetske menadžerima i energetske savetnicima i sprovodi inspeksijski nadzor nad sprovođenjem odredbi Zakona u oblasti implementacije sistema energetske menadžmenta, vrši izbor i ovlašćuje organizaciju za obuku energetske menadžera i ovlašćenih energetske savetnika. Sa druge strane obveznici SEM-a su u obavezi da imenuju kvalifikovanog energetske menadžera i da ga ovlaste da sprovodi sve odredbe definisane Zakonom i pratećom podzakonskim regulativom, da redovno i u skladu sa predviđenim terminima podnosi redovne periodične (godišnje) izveštaje i izveštaje o sprovedenom obaveznom energetske pregledu, kao i da permanentno sprovodi sve aktivnosti sa ciljem unapređenja stanja u pogledu efikasnog korišćenja energije.

Ministarstvo nadležno za oblast energetike je 2015. donelo Rešenje kojim je ovlastilo Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu za obavljanje poslova obuke energetske menadžera i ovlašćenih energetske savetnika, a u skladu sa [7].

3. OBAVEZNI ENERGETSKI PREGLED KOD OBEVNIKA SISTEMA SEM-A

Prema [3] obavezu periodičnih sprovođenja energetske pregleda imaju obveznici SEM-a i velika pravna lica. Definicija velikih pravnih lica je precizirana Zakonom kojim se uređuje oblast računovodstva. Zakonom su definisane kategorije energetske pregleda za sledeće oblasti:

- industrijska energetika,
- energetika zgrada i
- energetika javnog sektora.

Postupak planiranja, način sprovođenja, sadržaj izveštaja, sadržaj i način dostavljanja izvoda iz izveštaja i rokovi u kojima su obveznici SEM-a dužni da sprovedu obavezan energetske pregled definisani su u [3] i pratećim podzakonskim aktima [5] i [6], koji donosi ministar nadležan za poslove energetike.

Pravilnikom [6] detaljno definisano koja pravna lica imaju obavezu da sprovedu određenu kategoriju energetske pregleda. Na primer, privredna društva ili javna preduzeća čija je pretežna delatnost u proizvodnom sektoru (energetske, industrijske, proizvodni procesi, odnosno tehnički sistemi i objekti, kao i sredstva za prevoz ili transport robe i sirovina u okviru lokacije) imaju obavezu da sprovedu energetske pregled za oblast industrijske energetike. Privredna društva ili javna preduzeća čija je pretežna delatnost u sektoru trgovine i usluga imaju obavezu da sprovedu energetske pregled za oblast energetike zgrada. Jedinice lokalne samouprave, gradske opštine, organi državne uprave, ustanove u oblasti obrazovanja, nauke, kulture, zdravstvene zaštite osnovane od strane Republike Srbije i Autonomne pokrajine, kao i druga privredna društva bliže opisana u aktu, imaju obavezu da sprovedu energetske pregled za oblasti energetike javnog sektora. Za velika pravna lica koja nisu obveznici SEM-a aktom ministra nadležnog za poslove energetike su bliže uređeni minimalni kriterijumi sprovođenja energetske pregleda i kategorija energetske pregleda. Velika pravna lica sprovedu energetske preglede na objektima koji troše godišnje najmanje 80% ukupno potrošene energije velikog pravnog lica.

Pravilnikom o rokovima, obimu i načinu sprovođenja energetske pregleda u sistemu energetske menadžmenta, kao i sadržaju i načinu dostavljanja izvoda iz izveštaja o sprovedenom energetske pregledu definisana je dinamika sprovođenja energetske pregleda kod obveznika sistema, prema kojem obveznici SEM-a sprovedu energetske pregled periodično i to jednom u šest godina. Prema ovom Pravilniku, obveznici sistema treba da sprovedu prvi energetske pregled najkasnije do 31. decembra 2027.

4. ENERGETSKI PREGLED

Energetske pregled predstavlja sistematsku evaluaciju energetske performansi organizacije kroz analizu potrošnje, funkcionalnosti sistema i identifikaciju mera unapređenja. Primena preporučenih mera obezbeđuje ekonomske (redukcija troškova) i ekološke benefite (smanjenje emisija).

Primarni cilj je utvrđivanje mera za poboljšanje energetske efikasnosti i smanjenje CO₂ emisija, uz očuvanje unutrašnjih uslova i kvaliteta proizvodnje. Analiza obuhvata proizvodne procese, održavanje opreme, energetski menadžment i planove modernizacije, identifikujući mogućnosti unapređenja od operativnog upravljanja do kapitalnih investicija.

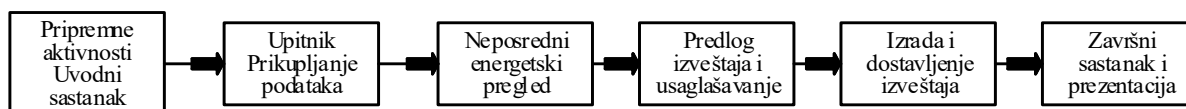
Prema obimu razlikuju se tri tipa energetskih pregleda:

- Preliminarni (walk-through) – osnovna procena minimalne kompleksnosti.
 - Kratak – standardna procedura srednjeg nivoa detaljnosti.
 - Detaljan – sveobuhvatna analiza sa ekstenzivnim podacima za izradu projektno-tehničke dokumentacije.
- Sve tri kategorije slede sličnu metodologiju, ali se razlikuju u nivou detaljnosti i kompleksnosti analiza.

Energetski pregled podrazumeva sledeće aktivnosti:

- pripremne aktivnosti i uvodni sastanak;
- prikupljanje podataka;
- neposredno izvođenje energetskog pregleda;
- izrada predloga izveštaja o sprovedenom energetskom pregledu i usaglašavanje izveštaja sa naručiocem pregleda;
- izrada i dostavljanje izveštaja o sprovedenom energetskom pregledu i
- završni sastanak sa prezentacijom najznačajnijih nalaza energetskog pregleda.

Slika 6 prikazuje dijagram toka procesa sprovođenja energetskog pregleda.



Slika 6 Dijagram toka procesa sprovođenja energetskog pregleda

Figure 6. Flow diagram of the energy audit procedure.

5. ENERGETSKI SAVETNIK

Prema zakonskoj regulativi, energetski savetnik je licencirano fizičko lice ovlašćeno za sprovođenje energetskih pregleda. Licencu izdaje Ministarstvo kandidatima koji ispunjavaju tri ključna uslova definisana Zakonom o energetske efikasnosti i racionanoj upotrebi energije: položen stručni ispit, tri godine relevantnog radnog iskustva i uplaćena administrativna taksa.

Ovlašćena organizacija sprovodi obuku u tri specijalizovane oblasti: mašinska tehnika, elektrotehnika i arhitektura. Obuka obuhvata opšti (četiri dana, šest časova dnevno) i specijalizovani deo, kombinujući teorijsku nastavu, praktične vežbe i izradu izveštaja pod mentorskim nadzorom.

Da bi mogli da polažu ispit za licenciranog energetskog savetnika kandidati moraju imati:

- master diplomu relevantne struke (60-120 ESPB),
- položen ispit za energetskog menadžera,
- odgovarajuću stručnu licencu (ovlašćeni projektant),
- odbranjen individualni izveštaj o energetskom pregledu,
- potvrdu o završenoj obuci,
- pismeni ispit.

Komisija koju formira nadležno ministarstvo sprovodi ispit kroz testiranje i usmenu odbranu individualnog izveštaja. Evaluacija obuhvata četiri aspekta: prezentacione veštine, dijagnostiku neefikasnosti, planiranje mera energetske efikasnosti i teorijsko znanje. Uslov za prolaz je pozitivna ocena tri člana komisije, uključujući eksperta iz relevantne oblasti.

6. ZAKLJUČAK

Republika Srbija se suočava sa izazovima u oblasti energetske efikasnosti, o čemu svedoči energetski intenzitet koji je 1,5 do 2 puta veći u odnosu na zemlje Evropske unije. Ova činjenica ukazuje na izuzetno visok potencijal za

unapređenje efikasnosti korišćenja energije, posebno u industrijskom sektoru koji je učestvovao u 2025. godini sa 27% u finalnoj potrošnji energije.

Uspostavljanje sistema energetskeg menadžmenta predstavlja ključni instrument za postizanje ciljeva definisanih Strategijom razvoja energetike Republike Srbije. Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije iz 2021. godine definiše pravni okvir koji obavezuje velike potrošače energije da implementiraju sistem kontinuiranog praćenja, analiziranja i optimizacije energetskih tokova, sa jasno definisanim ciljem godišnje uštede od 1% primarne energije.

U ovom sistemu, licencirani energetskei savetnici posebno značajnu ulogu – sprovođenje obaveznih energetskih pregleda. Rigorozan proces sticanja licence – koji obuhvata visoko stručno obrazovanje, položen ispit za energetskeg menadžera, relevantno radno iskustvo, specijalizovanu obuku i uspešnu odbranu pred komisijom – garantuje visok nivo stručne kompetentnosti i standardizaciju usluga.

Energetski pregled, kao važan instrument evaluacije energetskih performansi, omogućava identifikaciju mera koje donose višestruke benefite: ekonomske kroz sniženje troškova za energiju i energente, ekološke kroz smanjenje emisija štetnih gasova, i operativne kroz optimizaciju proizvodnih procesa. Veza između regulatornog okvira, stručnih kompetencija energetskih savetnika i spremnosti obveznika sistema da implementiraju preporučene mere predstavlja ključ uspešne transformacije ka održivom korišćenju energetskih resursa.

Implementacija obaveznih energetskih pregleda kod obveznika sistema energetskeg menadžmenta u Srbiji, čiji prvi ciklus treba da bude završen do kraja 2027. godine, predstavlja priliku za značajno unapređenje energetske efikasnosti i smanjenje zavisnost od uvoza energenata. Uspeh ovog sistema zavisiće od konzistentne primene zakonskog okvira, kontinuiranog usavršavanja energetskih savetnika i spremnosti privrednih subjekata/obveznika SEM-a da prepoznaju dugoročne benefite investicija u energetske efikasnost.

Literatura

- [1] Zakon o energetici, „Službeni glasnik RS“, br. 109/2025
- [2] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. sa projekcijama do 2050. godine, „Službeni glasnik RS“, br. 94/2024
- [3] Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, „Službeni glasnik RS“, br. 40/2021
- [4] Odluka o utvrđivanju energetskog bilansa Republike Srbije za 2025. godinu, „Službeni glasnik RS“, br. 19/2026
- [5] Uredbu o utvrđivanju graničnih vrednosti godišnje potrošnje energije na osnovu kojih se određuje koja privredna društva su obveznici sistema energetskeg menadžmenta, godišnjih ciljeva uštede energije i obrasca prijave o ostvarenoj potrošnji energije, „Službeni glasnik RS“, br. 59/2022
- [6] Pravilnik o rokovima, obimu i načinu sprovođenja energetskog pregleda u sistemu energetskog menadžmenta, kao i sadržaju i načinu dostavljanja izvoda iz izveštaja o sprovedenom energetskom pregledu, „Službeni glasnik RS“, br. 97/2025
- [7] Pravilnik o uslovima u pogledu kadrova, opreme i prostora organizacije koja sprovodi teoretsku obuku za energetske menadžere i ovlašćene energetske savetnike, „Službeni glasnik RS“, br. 12/2015

Corresponding author:

prof.dr Mirjana Stamenić, dipl.inž.maš.

Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet

Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

mstamenic@mas.bg.ac.rs

REGULACIJA VLAŽNOSTI VAZDUHA U INDUSTRIJI PAPIRA I KARTONA I ENERGETSKA EFIKASNOST

REGULATION OF AIR HUMIDITY IN THE PAPER AND CARDBOARD INDUSTRY AND ENERGY EFFICIENCY

Travica Milan

Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

(<https://orcid.org/0000-0003-1156-6563>)

ABSTRACT

The paper and cardboard industry is one of the most energy-intensive manufacturing sectors, where environmental conditions significantly affect product quality, process stability, and energy consumption. Due to the hygroscopic nature of cellulose fibers, paper continuously exchanges moisture with the surrounding air, making relative humidity a critical process parameter. Inadequate humidity control may lead to dimensional instability, sheet deformation, static electricity generation, printing defects, increased waste, and reduced productivity. This paper presents the principles of humidity control in the paper industry, discusses the influence of humidity on paper properties, analyzes available humidification and dehumidification technologies, and highlights the relationship between humidity regulation and energy efficiency. Industrial examples and best practices are also presented to demonstrate the benefits of optimized humidity control systems.

Keywords: relative humidity, paper industry, cardboard, HVAC systems, air humidification, adsorption dehumidification, Fisair.

IZVOD

Industrija papira i kartona jedan je od energetski najintenzivnijih proizvodnih sektora, gde uslovi okoline značajno utiču na kvalitet proizvoda, stabilnost procesa i potrošnju energije. Zbog higroskopske prirode celuloznih vlakana, papir kontinuirano razmenjuje vlagu sa okolnim vazduhom, što relativnu vlažnost čini kritičnim parametrom procesa. Neadekvatna kontrola vlažnosti može dovesti do dimenzionalne nestabilnosti, deformacije lista, stvaranja statičkog elektriciteta, defekata pri štampanju, povećanog otpada i smanjene produktivnosti. Ovaj rad predstavlja principe kontrole vlažnosti u industriji papira, razmatra uticaj vlažnosti na svojstva papira, analizira dostupne tehnologije vlaženja i odvlaživanja i ističe vezu između regulacije vlažnosti i energetske efikasnosti. Takođe su predstavljeni industrijski primeri i najbolje prakse kako bi se demonstrirale prednosti optimizovanih sistema za kontrolu vlažnosti.

Ključne reči: relativna vlažnost, papirna industrija, karton, HVAC sistemi, ovlaživanje vazduha, adsorpciono odvlaživanje, Fisair.

1. INTRODUCTION

The paper and cardboard industry represents one of the most important sectors within modern manufacturing. Paper products are widely used in printing, packaging, hygiene products, labeling, logistics, and publishing industries. The quality of these products is highly dependent on environmental conditions during production, storage, and processing.



Figure 1: Humidity Control in the Filling, Packaging, and Labeling Industry [1]

Slika 1. Kontrola vlažnosti u industriji punjenja, pakovanja i etiketiranja [1]

Unlike metals and many synthetic materials, paper is highly hygroscopic. Cellulose fibers absorb and release moisture depending on the surrounding air conditions. Consequently, variations in ambient humidity directly affect paper dimensions, mechanical properties, and processability. Modern paper production facilities operate at high production speeds, often exceeding 1,000 m/min. Under such conditions, even small fluctuations in humidity can result in significant production losses and quality defects. Humidity control has therefore become an essential component of industrial HVAC systems within paper mills, converting plants, printing facilities, and packaging factories.

2. FUNDAMENTALS OF HUMIDITY CONTROL

Humidity control requires understanding the psychrometric properties of air. Relative humidity is defined as the ratio of the actual water vapor pressure to the saturation vapor pressure at the same temperature. Relative humidity alone does not fully describe the moisture content of air. Additional parameters include:

- Absolute humidity;
- Specific humidity;
- Dew point temperature;
- Wet-bulb temperature;
- Enthalpy.

Among these parameters, dew point temperature is particularly important in industrial applications because it determines the risk of condensation on machinery, products, and building structures. Paper production facilities generally maintain indoor conditions between:

- Temperature: 20–24 °C
- Relative humidity: 50–55 %

These conditions provide the best compromise between dimensional stability, process efficiency, and worker comfort.

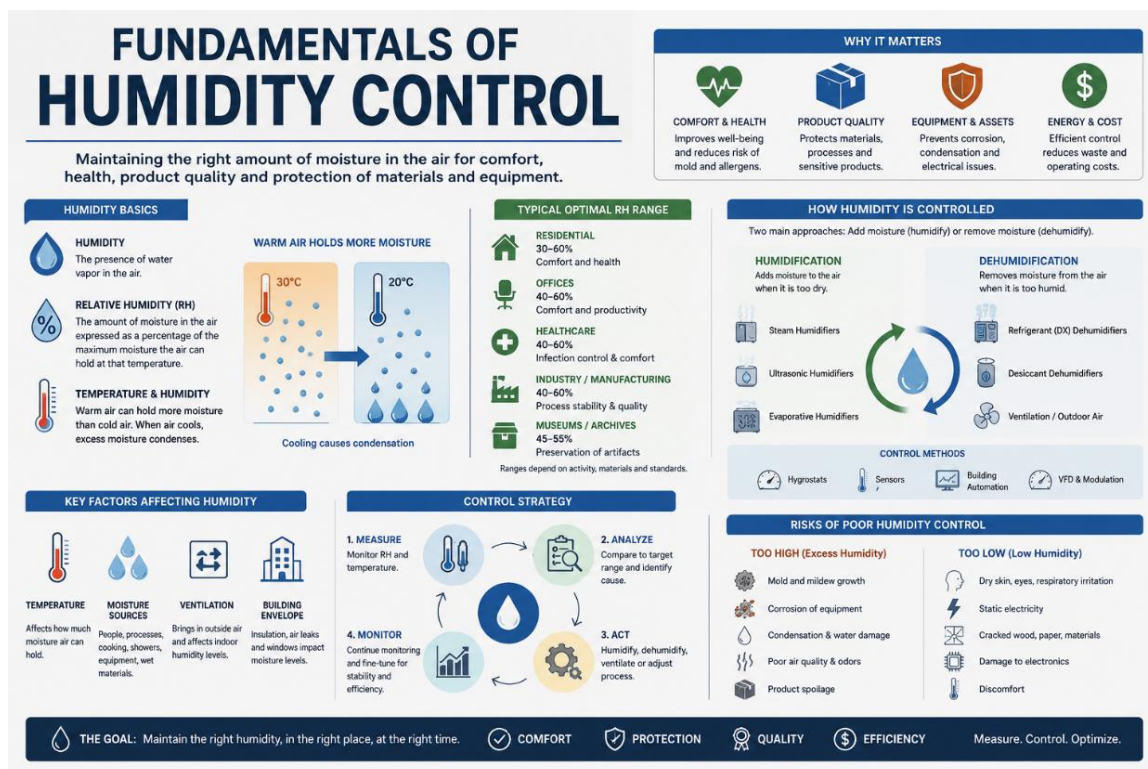


Figure 2: Fundamentals of humidity control
Slika 2. Osnove kontrole vlažnosti

3. INFLUENCE OF HUMIDITY ON PAPER PROPERTIES

3.1 Hygroscopic Behavior of Paper

Since cellulose makes up the majority of paper, it is inherently hygroscopic, so keeping the moisture content between 5 and 8% is essential to ensuring the required workability and quality. Direct and prolonged contact of paper with the air will adversely damage its properties if the relative humidity of the air is not appropriately regulated. According to the laws of physics, the difference in partial pressures between the paper's moisture content and the air's humidity tends to automatically balance. Paper consequently loses its properties as a result of either absorbing moisture from the surrounding air or releasing it.

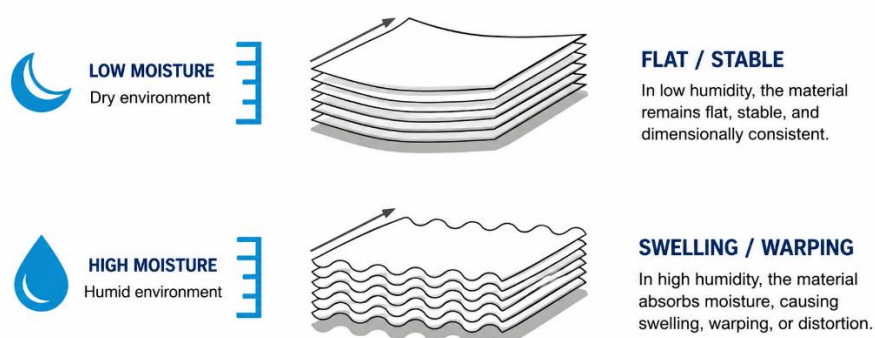


Figure 3: Influence of moisture content on paper deformation and dimensional changes
Slika 3. Uticaj sadržaja vlage na deformaciju papira i dimenzionalne promene

Each Cellulose fibers continuously interact with moisture present in ambient air. When humidity increases, fibers absorb water molecules and expand. When humidity decreases, fibers release moisture and shrink.

This behavior directly affects:

- Sheet dimensions;
- Flatness;
- Mechanical strength;
- Surface properties;
- Printability.

Dimensional Stability

Dimensional changes represent one of the most significant quality concerns in paper production.

Paper expansion and contraction can cause:

- Misalignment during printing;
- Registration errors;
- Poor cutting accuracy;
- Problems during converting operations.

Even dimensional variations smaller than 0.1 % can create significant quality issues in high-resolution printing applications.

Curling and Warping

When moisture distribution becomes uneven through the thickness of a paper sheet, differential expansion occurs.

As a result:

- Sheets curl;
- Boards warp;
- Packaging materials lose dimensional accuracy.

These problems are especially critical in corrugated cardboard production and packaging applications.

Static Electricity

Low humidity levels increase electrical resistance of paper surfaces.

When relative humidity drops below approximately 40 %, electrostatic charges accumulate rapidly, causing:

- Dust attraction;
- Feeding problems;
- Sheet sticking;
- Printing interruptions.

For this reason, humidity control is often used as an effective antistatic measure.

4. RELATIONSHIP BETWEEN HUMIDITY CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY

The pulp and paper industry ranks among the five largest industrial energy consumers worldwide. Production of one tonne of paper typically requires approximately 11.5 GJ of primary energy [2]. Paper production consists of several major stages:

- Stock preparation;
- Forming section;
- Press section;
- Drying section;
- Finishing operations.

The drying section is the most energy-intensive part of the process, accounting for more than 50 % of total energy consumption. Humidity control contributes to energy efficiency in several ways:

Reduced Re-Absorption of Moisture

After drying, paper exposed to wet air reabsorbs moisture. This additional moisture must eventually be removed again, increasing energy demand.

Improved Drying Efficiency

Research indicates that increasing dry solids content after the press section by only 1 % can reduce steam consumption in the dryer section by approximately 4 %.

Reduced Waste

Stable humidity conditions reduce production rejects and therefore reduce the energy required to manufacture replacement products.

Optimized Heat Recovery

Humidity control systems are frequently integrated with heat recovery units, allowing simultaneous optimization of moisture and thermal energy management.

4.1 HUMIDITY CONTROL TECHNOLOGIES

Steam Humidification

Steam humidifiers generate sterile steam and inject it directly into the air stream.

Advantages:

- High control accuracy;
- Hygienic operation;
- Fast response.

Disadvantages:

- High energy consumption;
- Significant maintenance requirements.



Figure 4: Isothermal self-producer steam humidifier [1]

Slika 4. Izotermni samoproizvodni parni ovlaživač [1]

Adiabatic Humidification

Adiabatic humidification systems atomize water into the air stream where it evaporates naturally.

Advantages:

- Lower operating costs;
- High efficiency;
- Large capacity.

These systems are widely used in paper production facilities.



Figure 5: Adiabatic humidification and cooling systems [1]
Slika 5. Adijabatski sistemi za hlađenje i regulisanje vlažnosti vazduha [1]

Refrigeration Dehumidification

Refrigeration systems remove moisture by cooling air below its dew point temperature.

Although suitable for comfort applications, they become less effective at lower temperatures and low humidity requirements.

Desiccant Dehumidification

Desiccant dehumidifiers utilize silica-gel rotors to adsorb water vapor directly from the air.

Advantages include:

- Low dew point capability;
- Year-round performance;
- Precise humidity control;
- Reliable operation under industrial conditions.

Desiccant dehumidification is a process in which moisture is removed from air by passing it through a hygroscopic material (desiccant) that attracts and retains water vapor. Unlike refrigeration-based dehumidifiers, which cool air below its dew point to condense moisture, desiccant systems remove water vapor directly from the air stream.

A. Process Air Stream (Dehumidification)

1. Wet air enters the dehumidifier.
2. The air passes through a slowly rotating desiccant rotor (typically impregnated with silica gel or lithium chloride).
3. Water vapor from the air is adsorbed onto the desiccant surface.
4. The air leaves the rotor significantly drier, but slightly warmer due to the heat released during adsorption.

Result: Low-humidity process air suitable for industrial applications, warehouses, pharmaceutical production, food processing, battery manufacturing, and cold storage facilities.

B. Regeneration Air Stream

1. The desiccant rotor cannot continuously absorb moisture without being regenerated.
2. A separate air stream (regeneration air) is heated.
3. The hot regeneration air passes through another section of the rotor.
4. Heat causes the desiccant to release the absorbed moisture.
5. The moist regeneration air is exhausted outdoors.

Result: The desiccant material is continuously regenerated and ready to absorb moisture again.

C. Continuous Rotor Rotation

1. The desiccant wheel rotates slowly (typically 8–20 revolutions per hour):
 2. Approximately 75% of the wheel is used for moisture adsorption.
 3. Approximately 25% is used for regeneration.
- This creates a continuous drying process without interruption.

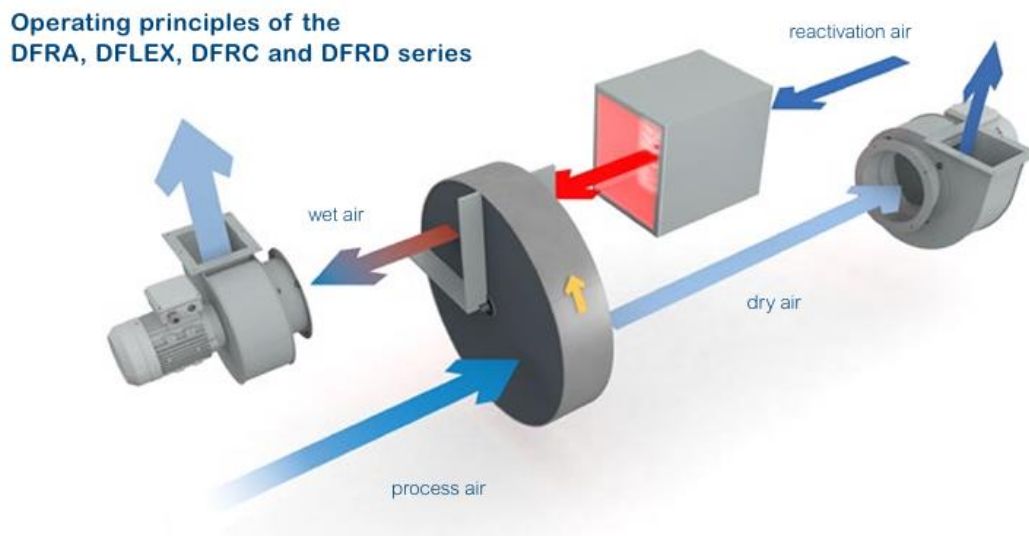


Figure 4: Operating principles of the dessicant dehumidification [1]
Principi rada adsorpcionog isušivanja vazduha [1]

5. INDUSTRIAL CASE STUDIES AND BEST PRACTICES

Implementation of energy-efficient technologies has demonstrated significant benefits in the paper industry.

Modern heat recovery systems installed in paper machine drying sections can recover up to 50 % of the supplied thermal energy [2].

Industry surveys have shown that:

- approximately 70 % of paper mills utilize recovered heat for drying air;
- approximately 40 % use recovered heat for white water heating;
- approximately 30 % use recovered heat for process water preheating.

A notable example is the Ranheim Paper & Board mill in Norway, where implementation of an advanced heat recovery system achieved:

- 14 % reduction in energy consumption;
- 15 % increase in production capacity;
- investment payback period of approximately one year.

These results demonstrate that climate control systems should not be viewed solely as quality assurance tools but also as strategic investments for improving energy performance.

According to Kilponen [3], modern heat recovery systems installed on paper machine drying sections can recover up to 50 % of the supplied thermal energy, corresponding to approximately 2.24 GJ/t of produced paper. The implementation of heat recovery systems not only reduces energy consumption but also contributes to lower greenhouse gas emissions and improved sustainability performance [4]. Economic

Benefits of Humidity Control Investments

Humidity control projects are frequently justified through measurable economic benefits. Typical benefits include:

- reduced production waste;
- lower energy consumption;
- reduced downtime;

- improved product quality;
- increased productivity.

Fleiter et al. [5] reported that implementation of energy-efficiency measures in paper mills frequently achieves payback periods shorter than three years.

Consequently, humidity control systems should be considered strategic investments that contribute directly to profitability, sustainability and competitiveness of paper manufacturing operations.

FUTURE TRENDS

The paper industry is increasingly adopting Industry 4.0 technologies. Future humidity control systems are expected to incorporate:

- Artificial intelligence;
- Predictive maintenance;
- IoT sensor networks;
- Cloud-based monitoring;
- Digital twins.

These technologies will enable real-time optimisation of environmental conditions while minimising energy consumption. Integration of humidity control with production planning systems may further improve efficiency and product quality.

6. CONCLUSIONS

Humidity control is one of the most important environmental parameters in the paper and cardboard industry. Due to the hygroscopic nature of cellulose fibers, variations in humidity directly affect dimensional stability, print quality, mechanical properties, and process reliability.

Modern humidification and dehumidification systems provide precise control of indoor conditions, reducing waste, improving productivity, and supporting energy-efficient operation. Furthermore, integration of humidity management with heat recovery and advanced HVAC technologies offers significant opportunities for reducing operational costs and improving sustainability.

As environmental regulations become stricter and production quality requirements continue to increase, humidity control will remain a critical element of modern paper manufacturing facilities.

Acknowledgements:

The results presented here are the result of research supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia under Contract 451-03-34/2026-03/200105 dated 05.02.2026."

References

- [1] Fisair Technical Documentation – Humidity Control for Paper and Cardboard Industry.
- [2] Tanasić N., Stamenić M., Good Practice Examples for Improving Energy Efficiency in the Paper Industry.
- [3] Kilponen, L. (2002), Improvement of Heat Recovery in Existing Paper Machines (Helsinki University of Technology, Finland)
- [4] Tobias Fleiter, Daniel Fehrenbach, Ernst Worrell, Wolfgang Eichhammer: Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials, *Energy*, Volume 40, Issue 1, 2012, Pages 84-99, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.025>.
- [5] Tobias Fleiter, Simon Hirzel, Ernst Worrell: The characteristics of energy-efficiency measures – a neglected dimension, *Energy Policy*, Volume 51, 2012, Pages 502-513, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.054>.

Corresponding author:

Milan Travica

University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Kraljice Marije 16

mtravica@mas.bg.ac.rs

ENERGETSKI EFIKASNA PROIZVODNJA PAPIRA I SMANJENJE CO₂ U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA U PAPIRNOJ INDUSTRIJI

ENERGY-EFFICIENT PAPER PRODUCTION AND CO₂ REDUCTION IN ELECTRIC MOTOR IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

Ivan Deletić

INNOMOTICS doo, Beograd, Srbija

Izvod

U industriji celuloze i papira, svaka mašina, svaki motor i svaki pogon predstavljaju deo mnogo veće priče — priče o neprekidnoj proizvodnji, zahtevnim uslovima rada i stalnoj potrebi za većom energetsom efikasnošću. Innomotics je važan deo te priče. Sa dugogodišnjim iskustvom u oblasti električnih motora, srednjenaponskih pretvarača i digitalizovanih pogonskih sistema, kompanija nudi rešenja prilagođena teškim industrijskim uslovima. Njihov portfolio podržava procese od pripreme vlakana do sušenja i završne obrade, pomažući fabrikama da smanje potrošnju energije, stabilizuju procese i modernizuju zastarelu opremu uz visok nivo pouzdanosti.

U tom širem kontekstu, dva ključna pogona su odabrana za modernizaciju. Prvi je bio pogon u pogonu za preradu celuloze, kritičan deo proizvodnog lanca. Rekonstrukcija je predstavljala više od tehničke nadogradnje — bila je to potpuna transformacija. Postojeći motor zamenjen je visokoefikasnim srednjenaponskim motorom, uparenim sa novim pretvaračem većeg kapaciteta i naprednih upravljačkih mogućnosti. Ova promena omogućila je povećanje proizvodnog kapaciteta, unapređenje bezbednosti rada i uvođenje kompenzacije koja smanjuje opterećenje na elektroenergetskoj mreži. Novi motor, zahvaljujući većoj efikasnosti, dodatno je smanjio potrošnju električne energije.

Druga modernizacija odnosila se na novi pogon turbo-duvaljke, gde su takođe ugrađeni srednjenaponski motor i pretvarač koji omogućavaju preciznu regulaciju brzine. Ova mogućnost prilagođavanja potrebama procesa, bez negativnog uticaja na mrežu, donela je dodatne uštede energije i stabilniji rad — što je od ključnog značaja u industriji celuloze i papira. Zajedno, ove modernizacije pokazuju kako savremena pogonska tehnologija, uz stručnost Innomotics-a, može značajno unaprediti energetske efikasnost, pouzdanost i održivost industrijske proizvodnje.

Ključne reči: ušteda energije, energetska efikasnost, frekventna regulacija, Innomotics, celuloza i papir

Abstract

In the pulp and paper industry, every machine, every motor, and every drive play a part in a much larger story — one of continuous production, demanding environments, and the constant push toward greater efficiency. Innomotics stand at the center of this story. With decades of experience in electric motors, medium-voltage drives, and digitalized motion systems, the company provides mills with solutions designed not only to withstand harsh industrial conditions but to elevate performance. Their portfolio supports everything from fiber processing to drying and finishing, helping plants reduce energy consumption, stabilize processes, and modernize aging assets with confidence.

Within this broader landscape, two key drive systems were selected for modernization. The first was the pulp-mill drive, a critical part of the production chain. Its reconstruction was more than a technical upgrade — it was a transformation. The existing motor was replaced with a high-efficiency medium-voltage machine, paired with a new drive offering increased power and advanced control. This change unlocked higher production capacity, improved operational safety, and introduced power-factor compensation that eased the load on the electrical network. The new motor's improved efficiency further reduced electricity consumption, turning energy savings into a daily operational reality.

The second modernization focused on a new fan drive, where a medium-voltage motor and drive were installed to provide smooth, precise speed regulation. This capability allows the fan to respond to process needs without disturbing the electrical grid, reducing energy use while maintaining stable airflow — an essential factor in pulp and paper operations. Together, these upgrades illustrate how modern drive technology, supported by Innomotics' expertise, can reshape industrial performance. They show how thoughtful modernization not only saves energy but strengthens reliability, sustainability, and long-term operational resilience.

Keywords: power saving, energy efficiency, frequency regulation, Innomotics, pulp and paper

DIZAJN SUTRA – UTICAJ AI NA DIZAJN AMBALAŽE: DESIGN TOMORROW – AI IN PACKAGING

Nikola Marinković
Smurfit Westrock Avala Ada, Beograd, Srbija

Abstract

The impact of AI on packaging design can be summarised in three key dimensions:

- *speed and efficiency of development*
- *optimisation of performance and costs*
- *acceleration of sustainable innovation*

For a company such as Smurfit Westrock, which already has a strong innovation base, global expertise and a focus on sustainability, AI represents the logical next step – a tool that enables ideas to be transformed into tangible, scalable and market-relevant solutions faster than ever before.

Izvod

Uticaj AI na dizajn ambalaže može se sažeti u tri ključne dimenzije:

- *brzina i efikasnost razvoja*
- *optimizacija performansi i troškova*
- *ubrzanje održivih inovacija*

Za kompaniju kao što je Smurfit Westrock, koja već ima snažnu bazu inovacija, globalnu ekspertizu i fokus na održivost, AI predstavlja logičan sledeći korak – alat koji omogućava da se ideje pretvore u konkretna, skalabilna i tržišno relevantna rešenja brže nego ikada pre.

Corresponding author:

Nikola Marinković
Smurfit Westrock Avala Ada
nikola.marinkovic@smurfitwestrock.rs

BUDUĆNOST GRAFIČKE TEHNOLOGIJE: UTJECAJ INTELIGENTNE AMBALAŽE I INFRAREDESIGN TIPOGRAFIJE NA SIGURNOST PROIZVODA

THE FUTURE OF GRAPHIC TECHNOLOGY: THE IMPACT OF INTELLIGENT PACKAGING AND INFRAREDESIGN TYPOGRAPHY ON PRODUCT SECURITY

Ivana Žiljak Stanimirović^{1, 2}

¹ University of Zagreb Faculty of Graphic Arts, Croatia; ² University North, Croatia

Abstract

Packaging technology and design are increasingly challenged by the growing need for counterfeit protection, while simultaneously implementing intelligent and active design elements alongside modern multimedia models of communication with the end user. This paper explores a new original approach to product protection by combining visible elements with hidden security systems. The research analyzes the integration of intelligent packaging systems and Infraredesign typography. Intelligent packaging utilizes multimedia systems to track and display product traceability and condition in real time. Concurrently, Infraredesign typography embeds dual textual information and micro-typography as protective graphics on the same surface in the form of a dual V/NIR image. One layer is visible to the naked eye under daylight (400–700 nm), while the hidden security text is revealed only in the infrared part of the spectrum (700–1000 nm). The synergy of these two methods creates a highly secure, multi-layered system for the design and protection of packaging products. It allows designers to maintain creative freedom in packaging design while offering a fast and reliable method for authenticity verification within the infrared wavelengths characteristic of packaging codes. This paper demonstrates that the future of product security lies in the seamless merging of design and functional intelligent packaging with advanced, hidden security graphic techniques, modern forms of coding, and communication with the end user.

Keywords: Future of Graphic technology, Infraredesign typography, Security graphics, Intelligent packaging, Packaging codes, AI (Artificial Intelligence), Multimedia.

Izvod

Tehnologija i dizajn ambalaže suočavaju se s rastućim izazovom zaštite od krivotvorenja uz istovremeno implementiranje inteligentnih i aktivnih elemenata dizajna te suvremenih multimedijских modela komunikacije s krajnjim korisnikom. Ovaj rad istražuje novi autorski pristup zaštiti proizvoda spajanjem vidljivih elemenata sa skrivenim sigurnosnim sustavima. Istraživanje analizira integraciju sustava inteligentne ambalaže i Infraredesign tipografije. Inteligentna ambalaža koristi multimedijске sustave za praćenje i prikaz sljedivosti i stanja proizvoda u stvarnom vremenu. Istodobno, Infraredesign tipografija ugrađuje dvostruke tekstualne informacije i mikrotipografiju kao zaštitnu grafiku na istu površinu u obliku dvostruke V/NIR slike. Jedan je sloj vidljiv golim okom na dnevnom svjetlu (400-700 nm), dok se skriveni zaštitni tekst otkriva samo u infracrvenom dijelu spektra (700-1000 nm). Sinergija ovih dviju metoda stvara visoko siguran, višeslojni sustav dizajna i zaštite ambalažnog proizvoda. Omogućuje dizajnerima da zadrže kreativnu slobodu u projektiranju ambalaže, dok istovremeno nudi brz i pouzdan način provjere autentičnosti unutar infracrvenih valnih duljina karakterističnih za kodove na ambalaži. Ovaj rad prikazuje da budućnost sigurnosti proizvoda leži u neprimjetnom spajanju dizajna, funkcionalne inteligentne ambalaže s naprednim, skrivenim tehnikama zaštitne grafike, suvremenih oblika kodiranja i komunikacije s krajnjim korisnikom.

Ključne reči: budućnost grafičke tehnologije, Infraredesign tipografija, zaštitna grafika, inteligentna ambalaža, kodovi na ambalaži, AI, multimedija

1. UVOD

U kontekstu teme 27. međunarodnog simpozijuma iz oblasti celuloze, papira, ambalaže i grafike (CPA&G) – „Transformacija CPA&G industrije: digitalizacija, cirkularnost i održive tehnologije“ – naglasak u ovom radu je na novim tehnologijama i budućnosti ambalaže. Prelazak s klasičnog tiskanja na pametne sustave spaja fizički i digitalni svijet. Ambalaža više nije samo zaštitna kutija određenog proizvoda, već postaje svojevrsni portal za digitalni sadržaj. Pomoću pametnih elemenata, QR kodova, proširene stvarnosti i skrivenih slika, kupac preko mobitela ulazi u

multimedijski svijet. Tamo može provjeriti autentičnost proizvoda, zaštitu od krivotvorenja, sljedivost (put proizvoda od tvornice do police) te putem inteligentnih i aktivnih sustava stanje i svježinu proizvoda u stvarnom vremenu. Današnje tržište suočava se s velikim problemom krivotvorenja proizvoda. To nanosi štetu tvrtkama i brendovima, ali i ugrožava sigurnost kupaca. Klasične kutije i naljepnice na mjestima otvaranja bez individualiziranih podataka više nisu dovoljno sigurne jer ih krivotvoritelji mogu lako kopirati. Zbog toga je u praksi izuzetno važno dokazati što je original, a što krivotvorina. Slijedom toga, dizajn ambalaže mora se unaprijediti. Ovaj rad predstavlja novi način obrane proizvoda spajanjem dvaju naprednih sustava u jednu cjelinu: Infraredesign® [1] koji koristi skriveni tisak za stvaranje nevidljivih dvostrukih informacija i Inteligentnu ambalažu koja prati stanje proizvoda i komunicira s korisnikom putem suvremenog GS1 Smart Packaging standarda kroz kodove na ambalaži. Cilj rada je pokazati kako ova dva sustava zajedno stvaraju ambalažu koju je nemoguće kopirati, a da pritom izgled proizvoda ostane prepoznatljiv, privlačan i funkcionalan. Inteligentna i aktivna ambalaža imaju dodatno ugrađene sustave koji prikupljaju podatke i šalju informacije [2]. Ti sustavi uključuju: pametne senzore koji prate temperaturu, vlagu ili svježinu unutar kutije. Zatim sadrži i multimedijske elemente: QR kodovi, NFC čipovi ili proširena stvarnost (AR) koji povezuju kupca s digitalnim svijetom. Ovi sustavi omogućuju provjeru stanja proizvoda u stvarnom vremenu. Kupac ili trgovac mogu odmah saznati je li proizvod ispravan i odakle dolazi.

Tehnologija Infraredesign® je posebna metoda dizajna i tiska koja koristi takozvane boje blizance. To su parovi boja koji ljudskom oku izgledaju potpuno isto pod običnim dnevnim svjetlom. Međutim, te boje različito reagiraju pod infracrvenim (NIR) svjetlom. Pomoću ove tehnologije na istu površinu tiskamo dva različita sloja: Vizualni spektar (V), koji sadrži dizajn ambalaže, logotip i nazive koje svi vidimo na dnevnom svjetlu (400–700 nm). Infracrvena skrivena grafika (Z - parametar) sadrži zaštitni tekst, mikrotipografiju ili kod koji se vidi samo pomoću posebne infracrvene kamere u bliskom infracrvenom spektru (1000 nm) [3]. Krivotvoritelji ne mogu kopirati skrivenu sliku i mikrotekst običnim skeniranjem ili fotokopiranjem. Čim se slika provuče kroz obični skener, skrivena infracrvena informacija se trajno gubi.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada izveden je redizajn ambalaže brenda Vegeta s integracijom pametnih elemenata i CMYKIR zaštite [4]. Glavni cilj ovog istraživanja bio je uspješno povezati tradicionalni vizualni identitet proizvoda s najmodernijim sustavima zaštite i interakcije na jednom odabranom primjeru pakiranja. Kao ključni element sigurnosti u ovom radu implementirana je infracrvena zaštitna tipografija i popratni mikrotekst. Ova tehnološka inovacija pokazala se iznimno ekonomski isplativom jer njezino uvođenje neće utjecati na ukupne troškove proizvodnje niti zahtijeva promjene u samom procesu tiska. Na taj način stvorena je napredna zaštitna grafika koju je moguće jednostavno ugraditi u dizajn a u praksi ju je nemoguće krivotvoriti. Prolaskom kroz standardni skener i postupkom kopiranja, grafika ostaje unutar uobičajenog RGB prostora, dok se skrivena infracrvena poruka nepovratno gubi, čime se jasno dokazuje originalnost proizvoda. Tijekom redizajna posebna je važnost posvećena očuvanju prepoznatljivosti brenda na tržištu. U dizajnu ambalaže dominira tradicionalna plava boja koja predstavlja temeljni vizualni simbol i jamstvo povjerenja za kupce. Uz očuvanje vizualnog identiteta, na pakiranje je ugrađen GS1 kod koji omogućuje optimizaciju i znatno lakše praćenje proizvoda unutar cijelog opskrbnog lanca. Dodatna marketinška vrijednost za krajnjeg potrošača ostvarena je integracijom pametnog multimedijskog koda za recepte. Skeniranjem tog koda putem mobilnog uređaja korisniku se izravno otvara pristup kreativnim receptima (Slika 1).



Slika 1: Prijedlog redizajna Vegete, vizualni spektar 400–700 nm

Figure 1. Proposed redesign of Vegeta in the visual spectrum range of 400–700 nm.

Priprema dizajna i CMYKIR odvajanje kanala prolazi kroz nekoliko faza [4]. U prvoj fazi rada osmišljen je cjeloviti vizualni izgled nove ambalaže, pri čemu su na primarni, vidljivi sloj postavljeni ime brenda i pripadajuća grafika. Nakon toga je kreiran skriveni tekst koji u sebi sadrži jedinstveni naziv proizvoda i inovacije. Pomoću specijaliziranih računalnih programa izvedena je računalna CMYKIR separacija (Slika 2).



Slika 2: Prijedlog redizajna Vegete, bliski infracrveni spektar 1000 nm

Figure 2. Proposed redesign of Vegeta in the near-infrared spectrum at 1000 nm.

U tom su postupku izračunati omjeri osnovnih tiskarskih boja, odnosno cijana, magente, žute i crne, kako bi se dobile savršene boje koje uspješno skrivaju tajnu poruku u infracrvenom dijelu spektra. Nakon računalne pripreme, ambalaža je otisnuta na standardnom tiskarskom stroju uz korištenje uobičajenih procesnih boja. Time je u praksi uspješno dokazano da za implementaciju ove visoke razine zaštite nisu potrebne skupe niti specijalne tinte. U dizajn ambalaže je integriran digitalni element u obliku QR koda koji vodi na naprednu aplikaciju za praćenje stanja i sljedivosti proizvoda. Provjera funkcionalnosti i učinkovitosti protoipa provodi se kroz dva ključna koraka testiranja. Prvi korak obuhvaćao je vizualni test ljudskog oka, koji je potvrdio da su pod običnim dnevnim svjetlom skriveni mikrotekst i zaštitna tipografija potpuno nevidljivi. Izgled same ambalaže ostao je besprijekorno čist s dominantnom plavom bojom, dok je osnovna tipografija bila jasna i čitljiva. Drugi korak testiranja proveden je pomoću infracrvene kamere. Osvjetljavanjem otiska infracrvenim svjetlom, omogućeno je jasno i precizno prikazivanje skrivenog zaštitnog teksta. Istovremeno, testiranjem i skeniranjem ugrađenih pametnih kodova uspješno su očitani svi podaci o proizvodu u stvarnom vremenu te je bez poteškoća ostvaren pristup multimedijском sadržaju s receptima. Za potrebe vizualizacije korišteni su napredni Artlist AI alati kroz programe i promptove. Napredni generativni AI alati korišteni su s ciljem doprinosa razvoja suvremenih tehnologija.

3. REZULTATI I RASPRAVA

U dizajnu ambalaže, uz detaljno opisanu Infraredesign® tipografiju kao dodana vrijednost su predviđeni pametni senzori koji prate temperaturu, vlagu i svježinu unutar kutije te izgledaju kao tanke, savitljive naljepnice s ugrađenim mikročipovima ili ekološkim kemijskim krugovima. Na primjeru redizajna Vegete predviđena je i ta mogućnost kao zaštita od vlage prilikom kuhanja i za kontrolu svježine.

Globalna tranzicija maloprodajnih sustava sa jednodimenzionalnih EAN u 2D kodove, QR kodove i Data Matrix u sklopu inicijative Sunrise 2027 dio su šire globalne inicijative pod nazivom Sunrise 2027, koju predvodi međunarodna organizacija GS1 [5,6,7,8]. Službeni planovi predviđaju da će napredni 2D kodovi 2027. godine u potpunosti zamijeniti tradicionalne linijske kodove na prodajnim mjestima (POS - Point of Sale). Kako bi sustav funkcionirao, trgovci moraju nadograditi svoje optičke čitače na slikovne skenere. Prisutnost ove oznake na ambalaži dokaz je tehnološke adaptacije proizvođača i potpune usklađenosti s budućim standardima digitalne trgovine. U eksperimentalnom dijelu rada upravo je dodan jedan takav tranzicijski kod prema pravilima GS1. Nažalost, s brojnim ograničenjima – samo kao crno-bijeli kod koji ne smije sadržavati logo ili dodatnu vizualnu poruku, te opet ima ograničenja s obzirom na dizajn i inovacije kao što su skriveni Infraredesign® kodovi.

Uporaba pametnog pakiranja utemeljenog na GS1 standardima zajedno sa dodanom vrijednosti zaštitne grafike predstavlja učinkovit alat koji suvremenom tržištu osigurava interoperabilnost, digitalnu transparentnost i brz pristup provjerenim podacima o hrani te originalnosti proizvoda [9,10].

4. ZAKLJUČAK

Spajanje inteligentne ambalaže, multimedijских kodova, generiranih AI kodova i Infraredesign® zaštitne grafike pokazalo se kao odlično rješenje za sigurnost proizvoda. Dobili smo više razina zaštite. Kupac može preko pametnih sustava pratiti ispravnost proizvoda, dok stručne osobe, forenzičari i kontrolori kvalitete mogu pomoću infracrvene kamere prepoznati original od krivotvorine.

Ova metoda ne utječe na dizajn ambalaže, a daje dodanu vrijednost u smislu oplemenjivanja i funkcionalnosti proizvoda te zaštitne grafike. Dizajneri i dalje imaju potpunu slobodu u stvaranju ali uz proširena znanja o inteligentnoj ambalaži, kodovima, multimediji, grafičkoj tehnologiji i zaštitnoj grafici. S obzirom na to da se koriste standardni tiskarski strojevi i boje, uvođenje ove zaštite ne podiže troškove proizvodnje što je također tema ove konferencije. Budućnost sigurne ambalaže leži upravo u ovakvim pametnim i oku nevidljivim sustavima zaštite, interdisciplinarnosti i otvorenosti ka novim standardima i sustavima komunikacije.

Reference

- [1] K. Pap, I. Žiljak, J. Žiljak Vujić: "Image Reproduction for near Infrared Spectrum and the Infraredesign Theory", The Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 54, No. 1, (2010.), p. 10502-1 - 10502-9, ISSN 1062-3701 WoS (CC, SCI-Expanded), Scopus, Inspec, IF 0.513, Q4/Q2.

- [2] Smithers. (2024). *The Future of Active and Intelligent Packaging to 2029*. Leatherhead: Smithers.
- [3] V. Žiljak, K. Pap, I. Žiljak Stanimirović, J. Žiljak Vujić: "Managing dual color properties with the Z - parameter in the visual and NIR spectrum", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 55, Elsevier B.V. (2012.), p. 326-336, ISSN 1350-4495 WoS (CC, SCI-Expanded), Scopus, Inspec, ScienceDirect, IF 1.364, Q2/Q2.
- [4] V. Žiljak, K. Pap, I. Žiljak: "CMYKIR Security Graphics Separation in the Infrared Area", *Infrared Physics and Technology*, Vol. 52., No. 2-3, Elsevier B.V. (2009.), p. 62-69, ISSN 1350-4495 WoS (CC, SCI-Expanded), Scopus, Inspec, ScienceDirect, IF 0.903, Q3/Q2.
- [5] GS1 Global. (2026). *GS1 Digital Link Standard: Architecture and Global Implementation Guidelines*. GS1 AISBL.
- [6] GS1 US. (2024). [*Sunrise 2027: The Global Transition to 2D Barcodes at the Point of Sale*](#). GS1 US Inc.
- [7] GS1 in Europe. (2025). [*Packaging and Circular Economy: Enabling Traceability through GTIN Standards*](#). GS1 Europe Policy Paper.
- [8] Optel Group. (2025). *GS1 Sunrise 2027: Supply Chain Transformation with 2D Barcodes and Traceability Systems*. Technical Report on Global Logistics.
- [9] Courtney, G. (2020). *Smart Packaging Standards for the 21st Century: Bridging the Physical and Digital Worlds*. International Packaging Institute / Industry Insights.
- [10] B_Link Digital. (2025). *Enhancing Food Safety and Supply Chain Mitigation with GS1 Digital Link Compliance*. *Journal of Food Supply Logistics*, 14(2), 112-118.

Corresponding author:

Professor Ivana Žiljak Stanimirovic, PhD
University of Zagreb Faculty of Graphic Arts, Croatia
University North, Croatia

Prof.dr.sc. Ivana Žiljak Stanimirović
Sveučilište u Zagrebu Grafički fakultet, Hrvatska
Sveučilište Sjever, Hrvatska