

**PTEP 2022**  **PTEP 2022**

# **ZBORNİK RADOVA**

---

**XXXIV NACIONALNA KONFERENCIJA  
PROCESNA TEHNIKA I  
ENERGETIKA U POLJOPRIVREDI  
PTEP 2022  
03-08. april, 2022.  
SOKOBANJA  
HOTEL "MORAVICA", SRBIJA**

**SCIENTIFIC COMMITTEE / NAUČNI ODBOR**  
(Scientific Committee conducted a review of conference proceedings)  
**INTERNACIONALNI ČLANOVI:**

**Prof. dr Marko Dalla Rosa**, Univerzitet u Bolonji, Italija  
**Prof. dr Margarida Cortez Vieira**, predsednik ISEKI – FA, Univerzitet Algarve, Portugal, Faro,  
**Prof. dr Harris Lazarides**, Aristotel univerzitet u Solunu, Grčka,  
**Prof. dr Tajana Krička**, Agronomski fakultet, Zagreb, Hrvatska,  
**Prof. dr Silva Cristina**, Portugalski katolički univerzitet, Porto, Portugal,  
**Prof. dr Zuzana Hlavačova**, Slovački poljoprivredni univerzitet, Nitra, Slovačka,  
**Prof. dr Zsuzsanna Fustos**, Korvin univerzitet, Budimpešta, Mađarska,  
**Prof. dr Vlasta Vozarova**, Slovački poljoprivredni univerzitet, Nitra, Slovačka,  
**Prof. dr Vangelče Mitrevski**, Tehnički fakultet, Bitola, BJR Makedonija  
**Prof. dr Dorota Kręgiel**, Tehnološki univerzitet u Lođu, Poljska,  
**Dr Branimir Šimić**, Poljoprivredni institut Osijek, Hrvatska,  
**Prof. dr Cosmin Salasan**, Banatski univerzitet poljoprivrednih nauka i veterinarske medicine, Temišvar, Rumunija,  
**Prof. Dr. Izabela Witońska**, Tehnološki univerzitet u Lođu, Poljska i  
**Prof. dr Neven Voća**, Agronomski fakultet, Zagreb, Hrvatska,

**ČLANOVI IZ SRBIJE:**

**Prof. dr Babić Mirko**, predsednik, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, nacionalni predstavnik u ISEKI - FA.  
**Prof. dr Filip Kulić**, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Generalni sekretar Društva PTEP.  
**Prof. dr Ivan Pavkov**, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad,  
**Prof. dr Milivoj Radojčin**, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad,  
**Prof. dr Milica Radosavljević**, Institut za kukuruz "Zemun Polje", Beograd,  
**Dr Jovanka Lević**, Univerzitet u Novom Sadu, Institut za prehrambene tehnologije, Novi Sad,  
**Dr Olivera Đuragić**, Univerzitet u Novom Sadu, Institut za prehrambene tehnologije, Novi Sad,  
**Dr Milka Vujaković**, Poljoprivredna stanica, Novi Sad,  
**Dr Goran Todorović**, Institut za kukuruz "Zemun Polje", Beograd,  
**Dr Lana Đukanović**, Institut za zaštitu bilja i životnu sredinu, Beograd,  
**Prof. dr Ljiljana Mojović**, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko metalurški fakultet, Beograd, nacionalni delegat u ISEKI -FA,  
**Prof. dr Maša Bukurov**, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad,  
**Prof. dr Aleksandra Dimitrijević**, Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd,  
**Prof. dr Nebojša Novković**, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad,  
**Prof. dr Jelena Pejin**, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad,  
**Prof. dr Siniša Bikić**, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad i  
**Dr Vladimir Bugarski**, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

---

**Publisher / Izdavač**

National Society of Processing and Energy in Agriculture, Novi Sad, Serbia  
Nacionalno društvo za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Novi Sad,  
Trg Dositeja Obradovića 8

**Co-publisher / Suizdavač**

Faculty of Agriculture, Novi Sad, Serbia  
Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8

**Editor in Chief / Glavni i odgovorni urednik:** Prof. Dr. Milivoj Radojčin

**Editors / Urednici**

Prof. Dr. Filip Kulić  
Prof. Dr. Ivan Pavkov

**For Publisher / Za izdavača:** Mr. Miladin Kostić

**Technical editor / Tehnički urednik:** Dr. Milivoj Radojčin, MSc. Krstan Kešelj

**Printed by / Štampa:** E- publishing, PTEP Society

**Edition / Tiraž:** 200

**ISBN:** 978-86-7520-551-7

**E-mail:** ptep@ptep.org.rs

**www.ptep.org.rs**

**CONFERENCE ORGANIZERS:**

- UNIVERSITY OF NOVI SAD, FACULTY OF AGRICULTURE, DEPARTMENT OF AGRICULTURAL ENGINEERING, NOVI SAD  
- NATIONAL SOCIETY OF PROCESSING AND ENERGY IN AGRICULTURE

**CONFERENCE CO-ORGANIZERS:**

Institute for Food Technology, Novi Sad,  
ISEKI - Food Association,  
Maize Research Institute  
"Zemun Polje", Zemun,  
Faculty of Technology, Novi Sad i  
Faculty of Technical Science, Novi Sad.

**CONFERENCE HONORARY COMMITTEE:**

Prof. Dr. Mirko Babić, Honorary president of National Society Of Processing And Energy in Agriculture, Faculty of Agriculture, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia  
Prof. Dr. Nedeljko Tica, Dean Faculty of Agriculture, University of Novi Sad, Serbia,  
Branko Ružić, Minister, Ministry of Education, Science and Technological Development, Serbia,  
Prof. Dr. Zoran Milošević, Provincial Secretary for Higher Education and Scientific Research,  
Prof. Dr. Margarida Cortez Vieira, University of Algarve, Portugal, President ISEKI–Food Association,  
Čedomir Božić, Provincial Secretary for Agriculture, Water Management and Forestry,  
Dr Jegor Miladinović, Director, Institute of Field and Vegetable Crops, Novi Sad,  
Prof. Dr. Biljana Pajin, Dean, Faculty of Technology, Novi Sad,  
Prof. Dr. Srđan Kolaković, Dean Faculty of Technical Science, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia,  
Mr. Miladin Kostić, President of National Society Of Processing And Energy in Agriculture, Institute of Field and Vegetable Crops, Novi Sad and  
Prof. dr Filip Kulić, General Secretary of National Society of Processing and Energy in Agriculture, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia.

**ORGANIZATORI KONFERENCIJE:**

-UNIVERZITET U NOVOM SADU, POLJOPRIVREDNI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA POLJOPRIVREDNU TEHNIKU, NOVI SAD  
- NACIONALNO DRUŠTVO ZA PROCESNU TEHNIKU I ENERGETIKU U POLJOPRIVREDI, NOVI SAD,

**SUORGANIZATORI KONFERENCIJE:**

Institut za prehrambene tehnologije, Novi Sad ISEKI – Food association, Beč, Austrija, Institut za kukuruz "Zemun Polje", Zemun,  
Tehnološki fakultet, Novi Sad i  
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

**POČASNI ODBOR KONFERENCIJE:**

Prof. dr Mirko Babić, Počasni predsednik Nacionalnog društva za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad.  
Prof. dr Nedeljko Tica, Dekan Poljoprivrednog fakulteta, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad,  
Branko Ružić, Ministar prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije,  
Prof. dr Zoran Milošević, Pokrajinski sekretar za visoko obrazovanje i naučnoistraživačku delatnost, APV,  
Prof. dr Margarida Cortez Vieira, Univerzitet Algarve, Portugal, Predsednik ISEKI–Food Association,  
Čedomir Božić, Pokrajinski sekretar za poljoprivredu, vodoprivredu i šumarstvo,  
Dr Jegor Miladinović, Direktor Instituta za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad,  
Prof. dr Biljana Pajin, Dekan Tehnološkog fakulteta, Novi Sad,  
Prof. dr Srđan Kolaković, Univerzitet u Novom Sadu, Dekan fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad,  
Mr. Miladin Kostić, Predsednik Nacionalnog društva za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Institut za ratarstvo i povrtarstvo Novi Sad i  
Prof. dr Filip Kulić, Generalni sekretar Nacionalnog društva za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

**SUPPORTERS:**

Ministry of Education, Science and  
Technological Development  
Government of the Autonomous  
Provincial Secretariat for Higher Education and Scientific Research,  
Secretariat for Agriculture, Water  
Management and Forestry

**CONFERENCE ORGANIZING  
COMMITTEE:**

Mr. Miladin Kostić, President of National Society Of  
Processing And Energy in Agriculture, Institute of Field  
and Vegetable Crops, Novi Sad, Serbia,  
Prof. Dr. Filip Kulić, General Secretary, Faculty of  
Technical science, University of Novi Sad, Novi Sad,  
Prof. Dr. Mirko Babić, Honorary president, University of  
Novi Sad, Faculty of Agriculture, Novi Sad, Serbia,  
Danka Dujović, BSc, "Al Dahra" Belgrade, Serbia,  
Dr Velimir Lončarević, Institute of Field and Vegetable  
Crops, Novi Sad, Serbia;  
Prof. Dr. Ivan Pavkov, Faculty of Agriculture, University  
of Novi Sad, Serbia,  
Marko Nenadić dipl.ing, Uljarice Bačka LLC Novi Sad  
Serbia,  
Snježana Pupavac, BSc.  
"EKO-Lab", Beograd, Serbia,  
Prof. Dr. Milivoj Radojčin, Faculty of Agriculture,  
University of Novi Sad, Serbia,  
Mirko Protić, ing. "Agromarket" "Agroseme", Kikinda,  
Serbia,  
Dr Olivera Đuragić, Institute for Food Technology,  
University of Novi Sad, Serbia,  
MSc. Krstan Kešelj, Serbia,  
Technical Secretary, Faculty of Agriculture, University of  
Novi Sad, Novi Sad, Serbia,  
Teodora Milićević, High school "Isidora Sekulić" Novi Sad,  
Serbia,  
Jovana Kulić, High school "Isidora Sekulić" Novi Sad,  
Serbia.

**POKROVITELJI KONFERENCIJE:**

Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja,  
Republike Srbije,  
Vlada AP Vojvodine:  
Pokrajinski sekretarijat za visoko obrazovanje i  
naučnoistraživačku delatnost,  
Sekretarijat za poljoprivredu, vodoprivredu i šumarstvo

**ORGANIZACIONI ODBOR  
KONFERENCIJE:**

Mr. Miladin Kostić, predsednik Nacionalnog društva za  
procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi, Institut za  
ratarstvo i povrtarstvo Novi Sad, Srbija,  
Prof. dr Filip Kulić, generalni sekretar skupa, Fakultet  
tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad,  
Srbija,  
Dr Mirko Babić, počasni predsednik, Poljoprivredni  
fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija,  
Danka Dujović, dipl.ing, „Al Dahra“ Beograd, Srbija,  
Dr Velimir Lončarević, Institut za ratarstvo i povrtarstvo  
Novi Sad,  
Prof. dr Ivan Pavkov, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u  
Novom Sadu, Novi Sad, Srbija,  
Marko Nenadić dipl.ing, Uljarice Bačka doo Novi Sad Srbi-  
ja,  
Snježana Pupavac, dipl. ing.  
"EKO-Lab", Beograd, Srbija,  
Prof. dr Milivoj Radojčin, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad,  
Srbija,  
Mirko Protić, ing. "Agromarket"  
"Agroseme", Kikinda, Srbija,  
Dr Olivera Đuragić, Naučni institut za prehrambene  
tehnologije, Novi Sad, Srbija,  
Krstan Kešelj, dipl.mast.  
tehn. sekretar, Poljoprivredni fakultet,  
Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija,  
Teodora Milićević, High school "Isidora Sekulić" Novi Sad,  
Srbija,  
Jovana Kulić, High school "Isidora Sekulić" Novi Sad,  
Srbija.

SPONSORS

**XXXIV NAUČNO - STRUČNI SKUP SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM  
PROCESNA TEHNIKA I ENERGETIKA U POLJOPRIVREDI**

**i**

**11. SEMINAR ZA TEHNOLOGE I RUKOVODIOCE  
SILOSA I DORADE SEMENA**

**BRONSE SPONZOR - BRONZANI SPONZOR**

LIBELA ELSI, Novi Sad  
BioSpin, Novi Sad

**PRECIOUS SPONSORS / DRAGOCENI SPONZORI**

**Agroseme - Agromarket, Kikinda**  
**PKB Agroekonomik, Beograd**  
**Institut za kukuruz "Zemun Polje", Beograd-Zemun**  
**Strahl Group, Treviso - Villorba, Italy**

**PTEP 2022**  
**ZBORNÍK RADOVÁ**

## SADRŽAJ

(po abecednom redu)

<b>Mirko Babić, Ljiljana Babić, SPECIFIČNOSTI REGULISANJA RADA SUŠARA ZA ZRNO KONTINUALNOG TIPA/ THE CONTROL PROCESS SPECIFICITIES OF THE CONTINUOUS TYPE GRAIN DRYERS. ....</b>	<b>1</b>
<b>Siniša Bikić, Milivoj Radojčin, Maša Bukurov, Ivan Pavkov, Milan Vraneš, Snežana Papović, Edin Berberović, MERENJE GUSTINE JONSKOG BIOFLUIDA/ DENSITY MEASUREMENT OF IONIC BIO FLUID.....</b>	<b>8</b>
<b>Violeta Gagu (Leocă), Mirela Gianina Calu, RESEARCH ON THE PERCEPTION OF CONSUMPTION OF COW'S CHEESE FORTIFIED WITH SPIRULINA PLATENSIS/ ISTRAŽIVANJE PERCEPCIJE POTROŠAČA O KONZUMIRANJU KRAVLJEG SIRA OBOGAĆENOG <i>Spirulinom Platensis</i>. ....</b>	<b>16</b>
<b>Krstan Kešelj, Ivan Pavkov, Milivoj Radojčin, Zoran Stamenković, Mladen Ivanišević, MATEMATIČKO MODELOVANJE KINETIKE SUŠENJA ZAMRZAVANJEM AMERIČKE VISOKOŽBUNASTE BOROVNICE / MATHEMATICAL MODELING OF FREEZE - DRYING KINETICS OF AMERICAN Highbush BLUEBERRY.....</b>	<b>21</b>
<b>Filip Kulić, BIOGASNE ELEKTRANE I TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE U REPUBLICI SRBIJI / BIOGAS POWER PLANTS AND THE ELECTRICITY MARKET IN THE REPUBLIC OF SERBIA.....</b>	<b>29</b>
<b>Valentina Nikolić, Slađana Žilić, Marijana Simić, Vesna Perić, Jelena Srdić, Marko Vasić, OPTIMIZATION OF ANTHOCYANINS EXTRACTION PROCESS FROM BLACK SOYBEAN SEED COAT FOR THE PREPARATION OF MAIZE-BASED FUNCTIONAL FOOD / OPTIMIZACIJA PROCESA EKSTRAKCIJE ANTOCIJANA IZ SEMENJAČE CRNE SOJE ZA PRIPREMU FUNKCIONALNE HRANE OD KUKURUZA.....</b>	<b>33</b>
<b>Ivan Pavkov, Milivoj Radojčin, Siniša Bikić, Milan Tomić, Maša Bukurov, Krstan Kešelj, Bojana Despotović, FIZIČKOHEMIJSKE OSOBINE HIDROČADI PROIZVEDENE OD POLJOPRIVREDNE BIOMASE / PHYSIOCHEMICAL PROPERTIES OF HYDROCHAR PRODUCED FROM AGRICULTURAL BIOMASS.....</b>	<b>39</b>
<b>Tanja Petrović, Jasna Vujinović, Marija Milivojević, Dragana Branković-Radojčić, Radmila Vukadinović, TREND ANALYSIS IN 1000 SEED WEIGHT TESTING USING A COUNTER / ANALIZA TRENDA U PROCESU ISPITIVANJA MASE 1000 SEMENA PRIMENOM BROJAČA. ....</b>	<b>48</b>
<b>Danijela Šuput, Senka Popović, Jovana Ugarković, Nevena Hromiš, COMPREHENSIVE REVIEW OF THE APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN THE PACKAGING SECTOR FOR POLYMER AND BIOPOLYMER MATERIALS / SVEOBUHVAATNI PREGLED PRIMENE PROCENE ŽIVOTNOG CIKLUSA U SEKTORU AMBALAŽE ZA POLIMERNE I BIOPOLIMERNE MATERIJALE.....</b>	<b>54</b>
<b>Slobodan Tašin, Vladan Mitrović, Maša Bukurov, Siniša Bikić, CENTRIFUGAL PUMPS AND NON-NEWTONIAN FLUIDS/ CENTRIFUGALNE PUMPE I NENJUTONOVSKI FLUIDI.....</b>	<b>61</b>

## SPECIFIČNOSTI REGULISANJA RADA SUŠARA ZA ZRNO KONTINUALNOG TIPa

*Mirko BABIĆ, Ljiljana BABIĆ*  
*Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8*  
[mbab@polj.uns.ac.rs](mailto:mbab@polj.uns.ac.rs)

### SAŽETAK

Regulisanje rada ili kontrola procesa može biti i jednostavan, ali i složen zadatak za inženjere koji se bave time. Sušenje zrnastih poljoprivrednih proizvoda u sušarama kontinualnog tipa je zahtevan zadatak. Pri ovom tehnološkom postupku glavna regulisana veličina je vlažnost materijala na izlazu iz sušare, ali su bitne kontrole i drugih parametara rada koji mogu bitno uticati na kvalitet proizvoda. To su pre svega temperature vazduha (agensa) za sušenje i sama temperatura materija koji se suši, tokom procesa i na izlasku iz postrojenja.

Dobar rukovaoc pažljivo prati promene vlažnosti i na ulazu i na izlazu, ali i na kraju zone sušenja, kako bi kvalitetno i na vreme uticao na regulisanu veličinu.

Savremeni tehnički sistemi treba da „imitiraju“ dobre rukovaoce sa iskustvom. Naime, „pametni“ regulatori (kontroleri) su uređaji koji nelinearnim dejstvom, koristeći dostignuća fazi logike (neuronskih mreža) mogu kvalitetno da zamene rukovaoca u priličnoj meri

**Ključne reči:** *automatsko upravljanje, sušare za zrno, sušenje, rukovanje sušarom*

### UVOD

Sušenje zrnastih poljoprivrednih proizvoda u sušarama kontinualnog tipa je zahtevan zadatak. Postrojenje za sušenje zrna sastavljeno je od zone sušenja, zone hlađenja, izuzimača, ventilatora raznih namena, generatora toplotne energije (najčešće ložišta), prečistača vazduha, transportera za dovod i odvod zrna i dr (Babić Ljiljana i Babić M, 2012). Rad svih ovih uređaja mora biti međusobno usklađen u cilju postizanja poslovnog zadatka - kvalitetnog i bezbednog sušenja zrna na zadatu vlažnost. Pri tome treba maksimizirati učinak, uz što veću energetska efikasnost. Na postrojenju za sušenje postoji potreba da se reguliše, odnosno da se kontroliše veliki broj parametara procesa. Pri ovom tehnološkom postupku glavna regulisana veličina je vlažnost materijala na izlazu iz sušare, ali su bitne kontrole i drugih parametara rada, koji mogu bitno uticati na kvalitet proizvoda.

### MATERIJAL

#### Zadaci ručnog i automatskog upravljanja

Kao što je nevedeno u uvodu, glavni zadatak postrojenja za sušenje zrna je tehnološka operacija sušenja zrnastih poljoprivrednih proizvoda na zadatu vrednost sadržaja vlage. Kao što je poznato, najčešći tip industrijskog postrojenja za sušenje zrna je vertikalna, gravitaciona sušara za zrno kontinualnog dejstva (tipa). Takva postrojenja se nalaze na svim srednjim i većim centrima za sušenje i skladištenje zrna. Zadana vrednost sadržaja vlage je povezana sa pojmom ravnotežne vlažnosti za pojedine vrste zrna. Podsećamo se da je vrednost ravnotežne vlažnosti povezana sa klimatskim karakteristikama skladištenja. Međutim, postoji niz drugih kriterijuma i ograničenja koji se moraju uvažavati, kako bi se posao sušenja uspešno obavio. Glavni kriterijumi su faktori očuvanja kvaliteta zrna, što manja potrošnja toplotne energije, bezbedan rad, dozvoljena emisija organskih čestica u



okolinu, potrebno rashlađivanje zrna nakon sušenja, kvalitetno sagorevanje goriva radi smanjenja emisije produkata nepotpunog sagorevanja i dr. Faktori očuvanja kvaliteta zrna su ograničenje pregrevanja zrna tokom sušenja i smanjenje mehaničkih oštećenja zrna manipulacijama u samoj sušari. Ovome se može pridodati eliminisanje pojava rezidua nepotpunog sagorevanja tečnih i čvrstih goriva (teški volatili) kod direktnih sušara.

Ručnim upravljanjem, automatskim upravljanjem ili kombinacijama ovih metoda usklađuje se rad postrojenja sa ciljem da se postignu gore navedeni ciljevi. Starije generacije ovih postrojenja su, uglavnom imale automatsku kontrolu nekih funkcija, ali je automatska regulacija vlažnosti zrna na izlazu iz sušare bila ugrađena u nekim od sušara.

Sušenje zrna na zadatu vrednost sadržaja vlage je glavni zadatak, koji se ostvaruje automatskom regulacijom ili ručnim upravljanjem. Međutim, pri radu moraju biti uvažena ograničenja, koja se veoma bitna. U zavisnosti od namene zrna postoji gornja dozvoljena granica temperature zrna  $t_{zdoz}$ , koja ne sme da se premaši. To se može izraziti na sledeći način:

$$t_{zdoz} \geq t_{zmax}$$

gde je  $t_{zmax}$  –maksimalna temperatura zrna koja se dostiže tokom sušenja. Dozvoljena temperatura zrna zavisi od namene zrna. Za semensko zrno i pivski ječam to je 42°C, jer se smatra da se klijavost može očuvati ako se ne premaši ova granica. Za očuvanje skroba u primarnom obliku, kakav se zahteva na tržištu žitarica, preporučuje se da temperatura zrna tokom sušenja ne bude viša od 60°C. Kod uljarica je to nešto niže, zbog termičke degradacije ulja. Osim semena i pivskog ječma, nisu date striktna ograničenja, ali postoje preporuke.

Temperatura zrna na ulazu u sušaru  $t_{z1}$  približno je jednaka temperaturi okolnog vazduha:

$$t_{z1} \approx t_{vo}$$

Tokom sušenja temperatura zrna raste u zavisnosti od temperature fluida za sušenje (vazduha, agensa...). Proizvođač sušara dužan je da preporuči temperaturu fluida za sušenje. Sa aspekta učinka sušare i energetske efikasnosti povoljnije je da je temperatura fluida za sušenje što viša, ali se time dovodi u opasnost kvalitet zrna. Nezbežan je kompromis. Temperatura fluida za sušenje može biti i različita po visini sušare. Tada se može dozvoliti nešto viša temperatura fluida za sušenje u gornjim delovima zone sušenja. Brzina fluida za sušenje utiče na temperaturu zrna. Ako je brzina strujanja fluida veća to se zrno brže zagreva. Isto tako faktori, koji utiču na temperaturu zrna, su početna vlažnost zrna kao i temperatura zrna na ulazu u sušaru.

Zrno se, nakon sušenja, transportuje u skladište. Da bi se omogućilo bezbedno skladištenje zrno mora biti rashlađeno. Rashlađivanje zrna obavlja se u zoni hlađenja sušare, a po potrebi može se dodatno rashladiti i u finom prečistaču zrna nakon sušare. I u jednom i u drugo slučaju ograničenje ovakvog rashlađivanja zrna je temperatura okolnog vazduha. Problem su letnji meseci kada su temperature okolnog vazduha visoke. Uslov za prihvatljiv rad sušare je da se u zoni hlađenja zrno rashladi efikasno tako da mu temperatura ne bude viša od temperature okolnog vazduha uvećane za 10°C. Ovo se može izraziti sledećim uslovom:

$$\Delta t_z = t_{z1} - t_{vo} < 8-10^\circ\text{C}$$

gde su:

$\Delta t_z$  – razlika temperature zrna na izlazu iz sušare i temperature okolnog vazduha,

$t_{z1}$  – temperatura zrna na izlazu iz sušare i

$t_{vo}$  – temperatura okolnog vazduha.

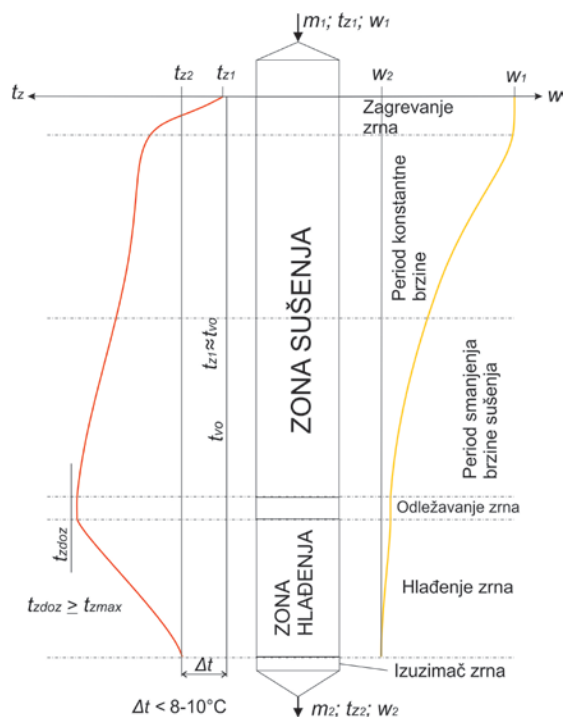
Vrednost razlike temperatura  $\Delta t_z$  može se regulisati/kontrolisati povećanjem zone hlađenja zrna, ako sušara ima tu mogućnost, i promenom brzine strujanja/protoka vazduha za hlađenje. Naravno, sporiji protok materijala kroz sušaru, odnosno sporije izuzimanje zrna, takođe poboljšava efekte hlađenja zbog produženja vremena hlađenja. Kao što je rečeno prethodno, naknadno pothlađivanje zrna može se postići na finom prečistaču sa ugrađeno vazdušnom separacijom prašine, plevice i drugih sitnih čestica.

### Prenosne funkcije

Razlike u matematičkom karakteru funkcija kinetike sušenja zrna na različitim sušarama nisu velike. Pri analizi i izboru tehnike kontrole procesa sušenja mora se voditi računa o vremenskoj koordinati kinetike sušenja. Kinetika sušenja zrnastih poljoprivrednih proizvoda veoma je istraživana i opisivina u velikom broju literaturnih izvora. Specifičnost prenosnih funkcija procesa sušenja je značajno veliko prenosno vreme kao i vreme zaleta. Ako se izazove skokoviti poremećaj vlažnosti zrna na ulazu u sušaru potrebno je dosta vremena da se počne menajti vlažnost na izlazu iz sušare (1-4 h). Promena sadržaja vlage na izlazu iz sušare nije skokovita, zbog opisanog karaktera prenosne funkcije.

Reč je o nelinearnim modelima prenosnih funkcija, a najčešće se prenosne funkcije opisuje eksponencijalnim modelima i polinomima. Analiza odziva na jedinični poremećaj se obavlja matematičkim linearizacijama nelinearnih prenosnih funkcija pomoću Laplasovih transformacija. Da bi se ovo uradilo potrebno je znati pouzdan matematički model kinetike sušenja, odnosno matematičke izraze prenosne funkcije procesa sušenja, odležavanja i na kraju hlađenja zrna. S obzirom da ovaj lanac (niz) čine jedinstven objekt regulacije stvar se usložnjava.

Promene vlažnosti i temperature zrna po visini u kontinualnoj sušari za zrno mogu se predstaviti na slici 1.



Sl.1. Promene vlažnosti i temperature zrna po visini sušare

Duga tradicija rukovanja sušarom bez automatske kontrole generisala je dobro iskustvo kod rukovaoca sušara. Dobar rukovaoc pažljivo prati promene vlažnosti i na ulazu i na izlazu, ali i na kraju zone sušenja, kako bi kvalitetno i na vreme uticao na regulisanu veličinu (*Babić Ljiljana i Babić M, 2021*). Neadekvatno rukovanje dovodi do presušivanja ili, još gore, do nedovoljno osušenog zrna i naknadnih ozbiljnih problema zbog toga. Pored nepotrebnog utroška energije i presušeno i nedosušeno zrno su faktori pogoršanja kvaliteta. Novi modeli regulisanja vlažnosti zrna na izlazu iz sušare su, praktično, zasnovani na opštem poznavanju karaktera prenosnih funkcija, odnosno modela kinetike sušenja sa jedne strane i iskustvenih podataka (stohastika). Uz sve ovo treba napomenuti da složenost procesa sušenja u celom stubu sušare dovodi do potreba da se poznaju parametri sušenja i “unatar” objekta regulacije, a ne samo na početku i na kraju postrojenja, kako se to često pogrešno radi. Da bi se proces pouzdano “držao” po kontrolom ugrađuju se senzori (na ulazu i na izlazu sušare ali i po visini stupa sušare) koji komandnom uređaju šalju informacije stanju parametara sušenja duž celog toka sušenja.

### **Senzori**

Razvoj automatske regulacije i automatskog upravljanja usko je povezan za razvojem tehnike i tehnologije merenja fizičkih veličina bitnih za postrojenje za sušenje. Na prvom mestu tu su: temperatura fluida, vlažnost materijala koji se suši, ali i drugi parametri, kao što su temperatura mase zrna, vlažnost vazduha, pojava dima, registrovanje nivoa zrna u bunkerima, pritisak vazduha, parametri električne struje i dr. Ovi tehnički elementi u praksi se zovu senzori ili sonde. Merenje temperature fluida je odavno kvalitetno razrešena elektrootpornim principom u standardnoj Pt100 sondi (senzoru). Savremene metode merenja ove veličine poboljšane su zahvajujući unapređenju elektronike koja obezbeđuje precizan i pouzdan analogni strujni signal, odnosno digitalizovanu informaciju o visini temperature. Za visoke temperature (ložišta) koriste se termopne sonde. Kritično je pitanje merenja vlažnosti materijala na bilo kom mestu po visini sušare. Obično se ovaj senzor (merilo vlažnosti) postavlja sasvim pri dnu izuzimajući zrna iz sušare. Ta pozicija je dobra kao kontrolna tačka, ali sa aspekta regulacije daleko je korisnije saznanje kolika je vlažnost zrna pri kraju zone hlađenja, jer se sa tom informacijom brže (efikasnije) menja pozicija izvršnog organa regulacije vlažnosti na izlazu. Principi merenja vlažnosti zasnovani su na električnim i elektromagnetnim osobinama vlažnog materijala. Poteškoće u ovim merenjima stvara nataložena ili nalepljena prašina na senzorske površine. Savremena senzorska tehnika je ovaj nedostatak korak po korak eliminisala, tako da danas funkcionišu dosta tačni senzori vlažnosti zrna. I dalje se koriste senzori temperature Pt100 jer postoji dosta čvrsta koreacija između temperature zrna i vlažnosti u samoj sušari.

Pojeftinjenje i mogućnost ugradnje velikog broja senzora može dovesti do “parcelizacije” kontrole procesa metodom konačnih elemenata (*Babić, M. i Babić, Ljiljana, 1987*).

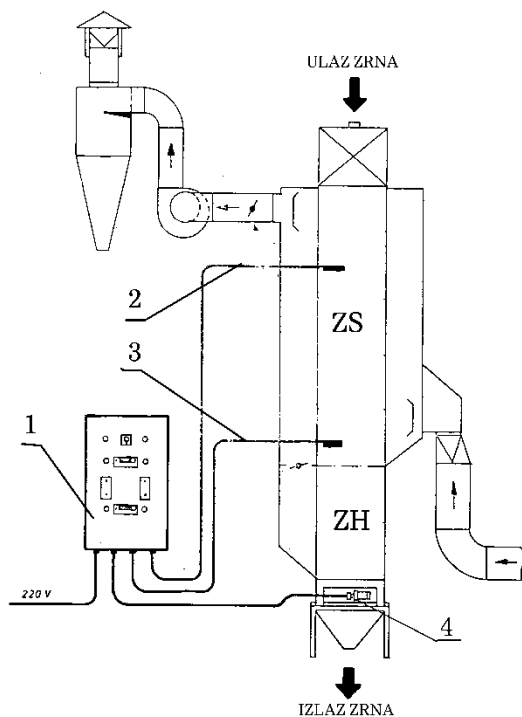
### **DISKUSIJA**

#### **Kontrola procesa**

Automatska regulacija vlažnosti zrna na izlazu iz sušare se klasično obavlja imitiranjem rada dobrog rukovaoca. Takav rukovaoc prati vlažnost zrna na izlazu iz zone sušenja, kao i vlažnost na ulazu u sušaru. Na osnovu tih podataka on donosi upravljačke odluke koje se manifestuju u radu izuzimajući zrna. Informacija za rukovaoca je potpunija i pouzdanija ako on ima više informacija o stanju materijala u celom stubu sušare. Savremeni tehnički sistemi treba da „imitiraju“ dobre rukovaoce sa iskustvom. Naime, „pametni“ regulatori (kontroleri) su uređaji koji nelinearnim dejstvom (kombinacija proporcionalnog, integralnog i diferencijalnog dejstva), koristeći dostignuća fazi logike (neuronskih

mreža) mogu kvalitetno da zamene rukovaoca u priličnoj meri. Ali, rukovaoc mora da bude uz sušaru i u slučaju ovakvih sistema, kako bi se izbegli rizici grešaka i neidealnosti startovanja i zaustavljanja rada sušare. Isto tako, sve diskontinualnosti tehnoloških parametara uzrokovane spoljnim dejstvima mogu dovesti do finansijskih gubitaka, ako nema rukovaoca da to primeti i interveniše.

Osnovni princip regulacije prikazan je na slici 2. Senzori koji šalju informacije upravljačkom uređaju su u gornjem delu zone sušenja (na kraju zone zagrevanja zrna) i pri dnu zone sušenja, kada je praktično završeno sušenje.



Sl. 2. Klasični model automatske regulacije vlažnosti zrna na izlazu iz sušare (Babić Ljiljana i Babić M, 2012).

Sušare poslednjih generacija su opremljene velikim brojem raznovrsnih senzora, sa ciljem da se upravljačkim i bezbednosnim funkcijama pruži što bolja podrška (Strahl group, 2020). Za dobro vođenje procesa bitno je poznavanje temperatura i vlažnosti zrna i vazduha po celoj visini stuba sušare.

### Upravljački ciklusi

Opisani sistemi funkcionišu u slučaju kada je sušara u režimu kontinualnog sušenja. Savremene sušare uvele su automatske procese i u drugim režimima/ciklusima. U primeru jedne savremene sušare (Strahl group, 2020) vidimo da su na raspolaganju četiri glavna ciklusa/režima koji se automatski ostvaruju:

1. Punjenje sušare;
2. Sušenje;
3. Hlađenje sušare i
4. Pražnjenje sušare.

U okviru ovih ciklusa proizvođač je razradio upravljačke detalje koji su posledica tehnoloških, ali i tehničkih iskustava. Proizvođači sušara, koji imaju ovako napredne upravljačke sisteme, su želeli da se

što je moguće više smanje rizici u procedurama ova četiri ciklusa. Rukovaoc sušare bira vrstu proizvoda koji se suši. Samim tim odabrao je postojeće iskustvo za tu zrnastu kulturu. Nakon toga startuje punjenje koje se ostvaruje ako su ispunjeni određeni uslovi. Kada je sušara napunjena startuje se sušenje i sušara će raditi tako da što pre dostigne parametre izlazne zadate vlažnosti. Naravno, start sušare treba da bude sa recirkulacijom u početku, dok se ne dostigne zadata vlažnost zrna. Kao alternativnu tehniku startovaja sušenja neki proizvođači sugerišu punjnje 2/3 visine sušare suvim zrnom, a ostatak vlažnim. Krajnji slučaj je startovanje sušare koja je napunjena suvim zrnom. U ovim prelaznim režimima rukovaoc je dosta bitan i treba da često kontroliše vlažnost izlaznog zrna. Kada je nestalo zrna na prijemu, a zna se da će ga uskoro biti ponovo, prelazi se na režim hlađenje sušare. Ovde je reč o bezbednosnim aspektima, jer nije isto da li će novo zrno stići za 2-3 sata ili stiže tek sutra. Raličite su automatske akcije. Kada se završava kampanja sušenja neke poljoprivredne zrnaste kulture pristupa se pražnjenju, ali takođe po propisanoj automatskoj proceduri.

### **ZAKLJUČAK**

Upravljanje sušarama za zrno doživelo je značajan napredak poslednjih godina, zahvaljujući razvoju različitih senzora. Naročito je bitno pojeftinjenje proizvodnje ovi senzora. Na ovaj način omogućeno je postavljanje velikog broja različitih senzora na sušaru u funkciji automatske regulacije automatskog upravljanja, bezbednosnih alarma i blokada, pravovremenih informacija i dr.

Treba imati na umu da je automatsko upravljanje postrojenjima za sušenje složen zadatak jer se usklađuje rad velikog broja pojedinačnih mašina, aparata i uređaja. Poalzište je teorija i eksperimenti kinetike sušenja. Ova saznanja nadograđuju se stohastičkim saznanjima u cilju postizanja poznavanja prenosnih funkcija i kvalitetnog predviđanja međudejstva faktora i parametara stanja zrna i vazduha tokom sušenja.

### **LITERATURA**

1. Babić, Ljiljana, Babić, M. (2012). Sušenje i skladištenje, II izdanje. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Srbija.
2. Babić, Ljiljana, Babić, M. (2021). Sušare za rukovaoce sušara u poljoprivredi, autoorizovana skripta, Poljoprivredni fakultet, 87.
3. Babić, M., Babić, Ljiljana (1987): Automatsko upravljanje procesima sušenja, III Savjetovanje tehnologa sušenja i skladištenja Fakulteta poljoprivrednih znanosti, Stubičke Toplice s.156-166,
4. Strahl group (2020). Uputstvo za rukovanje sušarom serije FRT, interna dokumentacija, Trevizo-Villorba, Italija

## THE CONTROL PROCESS SPECIFICITIES OF THE CONTINUOUS TYPE GRAIN DRYERS

*Mirko BABIĆ, Ljiljana BABIĆ*

*University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Trg Dositeja Obradovića 8, Novi Sad, Serbia*

*E-mail: [mbab@polj.uns.ac.rs](mailto:mbab@polj.uns.ac.rs)*

The process controlling can be a simple and a complex task for the engineers involved. Grain drying of agricultural products in dryers of the continuous type is a demanding task.

In this technological procedure, the main regulated value is the moisture content of the material at the outlet of the dryer, but there are important controls and other operating parameters that can significantly affect the quality of the product. These are primarily the temperatures of the air (drying agent) and the temperature of the material to be dried, during the process and at the exit from the plant. The dominant type of continuous dryer is the vertical gravity dryer with foof ducts as a filling, although a large number of historical dryers with a „honeycomb“ filling are still in use in Serbia. In dryers with "honeycomb", in addition to convective, there is also a conductive type of heat exchange. Regardless of this, the differences in the drying kinetics are not large, the analysis and selection of the process control devices must take into account the time parameters of the drying kinetics. This kinetics is highly researched and descriptive in a large number of literature sources. The specificity of the transfer functions of the drying process is the significant transfer time as well as the take-off time. If a sudden disturbance of grain moisture content is caused at the entrance to the dryer, it takes a long time to start changing this value at the exit of the dryer. The change in the moisture content of the dryer effluent is not abrupt, due to the described character of the transfer function.

A long tradition of the dryer handling without automatic control has generated a good experience for the dryer operators. A good operator carefully monitors changes in moisture content at both the inlet and outlet, but also at the end of the drying zone, in order to qualitatively and timely affect the regulated values. Inadequate handling leads to drying out or, worse, to insufficiently dried grain and subsequent serious problems due to that. In addition to unnecessary energy consumption, both dried and not dried grain are factors of deteriorating quality.

Modern technical systems should "imitate" good managers with experience. Namely, "smart" regulators (controllers) are devices that by non-linear action (combination of proportional, integral and differential action), using the achievements of fuzzy logic (neural networks) can qualitatively replace the operator to a large extent. However, the operator must be with the dryer in the case of such systems, in order to avoid the risk of errors and non-ideals of starting and stopping the dryer. Also, all discontinuities of technological parameters caused by external actions can lead to financial losses, if there is no operator to notice and intervene.

**Key words:** *automatic control, grain dryers, drying, dryer handling*

## MERENJE GUSTINE JONSKOG BIOFLUIDA

*Siniša BIKIĆ<sup>1\*</sup>, Milivoj RADOJČIN<sup>2</sup>, Maša BUKUROV<sup>1</sup>,  
Ivan PAVKOV<sup>2</sup>, Milan VRANEŠ<sup>3</sup>, Snežana PAPOVIĆ<sup>3</sup>, Edin BERBEROVIĆ<sup>4</sup>*  
<sup>1</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6,  
21000 Novi Sad, Republika Srbija  
<sup>2</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Trg Dositeja Obradovića 6,  
21000 Novi Sad, Republika Srbija  
<sup>3</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3,  
21000 Novi Sad, Republika Srbija  
<sup>4</sup>Univerzitet u Zenici, Politehnički fakultet, Fakultetska 1,  
72000 Zenica, Bosna i Hercegovina  
E-mail: \*bika@uns.ac.rs

### APSTRAKT

Predmet istraživanja u radu bila je gustina jonskog biofluida dobijenog suspendovanjem čestica poljoprivredne biomase u jonskoj tečnosti kao osnovnom fluidu. Cilj istraživanja bio je da se nastavi razvoj nove klase disperzija dobijenih korišćenjem poljoprivrednog otpada kao održiva zamena za jonske nanofluide. Stabljike suncokreta kao poljoprivredna otpadna biomasa korišćene su za proizvodnju čestica. Jonska tečnost (2-hidroksipropil)amonijum-formijat [2-OHC<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>][For] korišćena je kao osnovni fluid. Jonski biofluid pripremljen je uobičajenom metodom u dva koraka. U prvom koraku čestice su dobijene hidrotermalnom karbonizacijom i tretmanom u peći sa inertnom atmosferom. U drugom koraku čestice su suspendovane u jonskoj tečnosti. Gustina jonskog biofluida merena je pomoću piknometra, precizne vage i vodenog kupatila. Urađeno je merenje gustine jonskog biofluida različitih masenih udela (0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%) na različitim temperaturama (30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C i 70 °C). Utvrđeno je da gustina jonskog biofluida raste sa porastom masenog udela, a snižava se sa porastom temperature.

**Ključne reči:** jonski biofluid, jonska tečnost, poljoprivredna biomasa, nanočestice, nanofluidi

### UVOD

Disperzijom nanočestica veličine od 1 do 100 nm u konvencionalnim tečnostima dobijaju se napredni koloidi zvani nanofluidi (Qiu i dr, 2020). U okviru prvog istraživanja nanofluida suspendovane su fine čestice Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> i TiO<sub>2</sub> u vodi kao osnovnom fluidu (Masuda i dr, 1993). Utvrđeno je da se toplotna provodljivost nanofluida povećava sa povećanjem udela čestica Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i TiO<sub>2</sub> u vodi. Povećana toplotna provodljivost nanofluida u odnosu na osnovni fluid ukazala je na potencijalnu primenu nanofluida kao fluida za prenos toplote u izmenjivačima toplote. Od tog momenta pa do danas intezivno se radi na istraživanju i razvoju nanofluida. Voda, ulje i etilen glikol najčešće su korišćeni osnovni fluidi dok se kao čestice koriste metali, oksidi, nitridi, karbidi i alotropi ugljenika (grafit, dijamant, nanocevi i grafen) (Qiu i dr, 2020).

U poslednje vreme sve više se kao osnovni fluidi za formiranje nanofluida koriste jonske tečnosti (JT). Jonske tečnosti su inovativna klasa fluida koja se u potpunosti sastoji od jona (organski katjoni i organski/neogranski anjoni) (Rogers i Seddon, 2003), (Vraneš i dr, 2019). Postoji veliki potencijal za razvoj i sintezu novih tečnosti za prenos toplote prilagođavanjem strukture katjona i anjona kako bi se dobila željena fizičko-hemijska svojstva za specifične primene (Minea i Murshed, 2018). Grupa autora

(Castro i dr., 2010) uvela je novu klasu nanofluida pod nazivom jonski nanofluidi. Radi se o novim fluidima dobijenim suspendovanjem nanočestica u jonske tečnosti kao osnovnim fluidima.

Suspendovanjem čestica dobijenih iz poljoprivredne biomase u jonske tečnosti dobijena je podklasa jonskih nanofluida nazvana jonski biofluidi (Queirós, 2010). Grupa autora (Queirós i dr, 2019) suspendovala je lignocelulozne čestice biomase veličine manje od 180  $\mu\text{m}$  u mešavinu jonske tečnosti [EMIM [OAc] i vode ( $x_{\text{H}_2\text{O}}=0,099$ ) kao osnovnog fluida. Utvrdili su poboljšanje toplotne provodljivosti jonskog biofluida za 35% u odnosu na osnovni fluid pri masenom udelu čestica od 3 wt%. Porast toplotne provodljivosti od oko 12% i gustine od 16% pri masenom udelu čestica od 5 wt% zabeleženo suspendovanjem čestica biomase u jonsku tečnost [HMIM][NTf<sub>2</sub>] kao osnovni fluid (Radojčin i dr, 2022). Za formiranje jonske biotečnosti korišćene su čestice dobijene od stabljika suncokreta (frakcija <63  $\mu\text{m}$ ) primenom hidrotermalne karbonizacije i tretmanom u peći u inertnoj atmosferi, gde je intenzitet finih čestica sa srednjim prečnikom pika od 729,5 nm bio oko 20%.

Predmet istraživanja u radu bila je gustina jonskog biofluida dobijenog suspendovanjem čestica poljoprivredne biomase u jonskoj tečnosti kao osnovnom fluidu. Ispitan je uticaj temperature i udela čestica poljoprivredne biomase na gustinu predmetnog jonskog biofluida. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se gustina jonskih tečnosti (Fröba i dr, 2008), (Papović i dr, 2017), (Minea and Murshed, 2018) i jonskih nanofluida (Titan, 2014), (Titan i dr, 2015), (Xie, 2016), (Minea and Murshed, 2018), (Radojčin i dr, 2022) smanjuje sa temperaturom. Takođe, dosadašnja ispitivanja uglavnom su pokazala da sa porastom udela čestica dolazi do porasta gustine jonske nanotečnosti (Titan, 2014), (Titan i dr, 2015), (Xie, 2016), (Minea and Murshed, 2018), (Radojčin i dr, 2022). Postoje i istraživanja koja su pokazala da suspendovanjem nanočestica u jonske tečnosti dolazi do smanjenja gustine jonskih nanofluida (Shevelyova i dr, 2013), (Patil i dr, 2016). Grupa autora (Shevelyova i dr, 2013) smatra da je smanjenje gustine nastalo usled visoke viskoznosti jonskog nanofluida koja nije dozvolila prodiranje jona i uklanjanja gasova iz unutrašnjih delova višezidnih ugljeničnih nanocevi koje su suspendovane u jonskoj tečnosti. Grupa autora (Patil i dr, 2016) smatra da je do smanjenja gustine u njihovom slučaju došlo usled greške merenja jer je veoma mala količina nanočestica rutenijuma suspendovana u jonskoj tečnosti (0,003 mol/L). Autori rada su na osnovu predhodnih istraživanja prepostavili da će u slučaju predmetnog jonskog biofluida doći do smanjenje gustine sa porastom temperature i povećanja gustine sa porastom udela čestica. Cilj istraživanja bio je da se nastavi razvoj nove podklase disperzija dobijenih korišćenjem poljoprivrednog otpada kao održiva zamena za jonske nanofluide.

## MATERIJAL I METOD

Stabljike suncokreta kao poljoprivredna otpadna biomasa korišćene su za proizvodnju čestica. Jonska tečnost (2-hidroksipropil)amonijum-formijat [2-OHC<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>][For] korišćena je kao osnovni fluid. Jonski biofluid pripremljen je uobičajenom metodom u dva koraka.

U prvom koraku čestice su dobijene hidrotermalnom karbonizacijom i tretmanom u peći sa inertnom atmosferom. U procesu hidrotermalne karbonizacije korišćena je frakcija čestica  $\leq 63 \mu\text{m}$  gde je u reaktoru odnos destilovane vode i čestica bio 1:4 uz dodatak limunske kiseline od 1% mase vode. Proces hidrotermalne karbonizacije mešavine izveden je na temperaturi 260 °C i pritisku od 8 MPa u trajanju od 2 sata uz mešanje sa brojem obrtaja mešalice 229 o/min. Dobijena hidročađ je zatim tretirana u peći u inertnoj atmosferi azota čistoće 99,8% na konstantnoj temperaturi od 900 °C u trajanju od 1 sata. Rezultati dobijeni na skenirajućem elektronskom mikroskopu (SEM) pokazali su



postojanje mikro i nanočestica dok je energetska disperzivna spektroskopija (EDS) pokazala da se čestice uglavnom sastoje od ugljenika (77,5 wt%). Više o postupku dobijanja čestica i SEM i EDS rezultatima pogledati u radu (Radojčin i dr., 2022).

U drugom koraku čestice su suspendovane u jonskoj tečnosti. Masa čestica i osnovnog fluida mereni su na analitičkoj vagi, model ALS (Kern, Nemačka) sa preciznošću  $1 \cdot 10^{-4}$  g. Pripremljeni su uzorci bez dodataka surfaktanta sledećih masenih udela 0 wt%, 0,5 wt%, 1 wt%, 2,5 wt% i 5 wt%. Uzorci su mehanički mešani 10 minuta na vorteksu model Lab dancer (Ika, Nemačka). Uzorak je zatim tretiran ultrazvučnom sondom model Sonoplus mini 20 (Badelin, Germany) u trajanju od 45 min. Ultrazvučni talasi emitovani su amplitudom od 75 % sa sonde koja je bila direktno potopljena u uzorku. Na kraju su uzorci tretirani u ultrazvučnom kupatilu model Elmasonic P (Elma, Nemačka) u trajanju od 45 min sa frekvencijom ultrazvučnih talasa od 37 kHz.

Za potrebe merenja gustine jonskog biofluida korišćeni su piknometar, precizna vaga i vodeno kupatilo. Merenje gustine jonskog biofluida urađeno je na atmosferskim uslovima. Gustina uzoraka merena je piknometrom klase A sa čepom (Glassco, Indija). Proizvođač je deklarirao zapreminu piknometra od 10 mL na temperaturi od 20 °C. Pre merenja gustine uzoraka piknometar je kalibrisan gde je određena tačnija zapremina piknometra od 9,8 mL korišćenjem destilovane vode. Merenje mase uzoraka urađeno je na analitičkoj vagi model ALS (Kern, Nemačka). Konstantna temperatura piknometra sa uzorkom održavana je pomoću termo kupatila VCH-12 (Witeg, Nemačka) sa tačnošću održavanja temperature od +/- 0,1 %.

### RESULTATI I DISKUSIJA

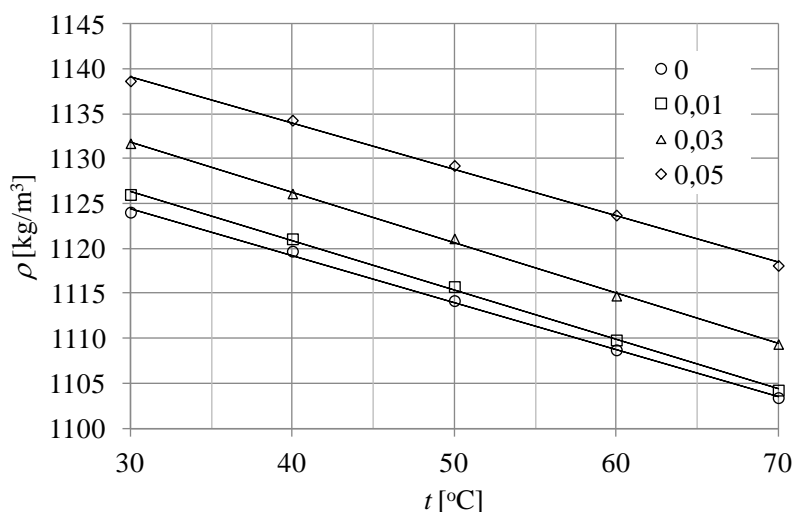
Na slici 1 prikazana je zavisnost gustine od temperature za različite vrednosti masenih udela čestica u jonskom biofluidu. Gustina jonskog biofluida linearno se smanjuje sa porastom temperature. Zavisnost gustine i temperature jonskog biofluida može da se prikaže sledećom linearnom funkcijom:

$$\rho = a \cdot t + b, \quad (1)$$

gde su:

$\rho$  – gustina jonskog biofluida [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] i  
 $t$  – temperatura jonskog biofluida [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Vrednosti parametara  $a$ ,  $b$  i  $R^2$  linearne funkcije (1) prikazane su u tabeli 1.

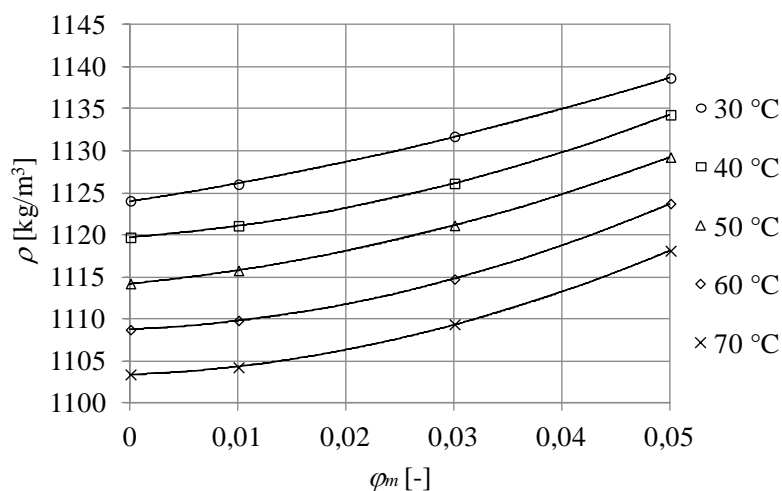


Slika 1. Zavisnost gustine jonskog biofluida od temperature za različite vrednosti masenih udela čestica

Tabela 1. Vrednosti parametara linearne funkcije (1)

$\varphi_m$ [-]	$a$ [kg/m <sup>3</sup> °C]	$b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$R^2$ [-]
0	-0,5231	1140,2	0,9983
0,01	-0,5485	1142,8	0,9989
0,03	-0,5611	1148,7	0,9989
0,05	-0,5169	1154,7	0,9976

Na slici 2 prikazana je zavisnost gustine od masenog udela čestica za različite vrednosti temperatura jonskog biofluida. Gustina jonskog biofluida nelinearno se povećava sa porastom masenog udela čestica. Porast gustine jonskog biofluida sa povećanjem masenog udela čestica se očekivalo jer čestice koje se suspenduju imaju veću gustinu od osnovnih fluida.



Slika 2. Zavisnost gustine jonskog biofluida od masenog udela čestica za različite vrednosti temperature

Zavisnost gustine i masenog udela čestica jonskog biofluida može da se prikaže sledećom polinomskom funkcijom:

$$\rho = c \cdot \varphi_m^2 + d \cdot \varphi_m + e, \quad (2)$$

gde je  $\varphi_m$  maseni udeo čestica [-]. Vrednosti parametara  $c$ ,  $d$ ,  $e$  i  $R^2$  polinomske funkcije (2) prikazane su u tabeli 2.

*Tabela 2. Vrednosti parametara polinomske funkcije (2)*

$t$ [°C]	$c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$e$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$R^2$ [-]
30	1961	196,23	1124	0,9998
40	3885,1	97,43	1119,7	1
50	3535,2	124,6	1114,2	1
60	4931,2	52,956	1108,8	1
70	4886,4	51,763	1103,3	0,9999

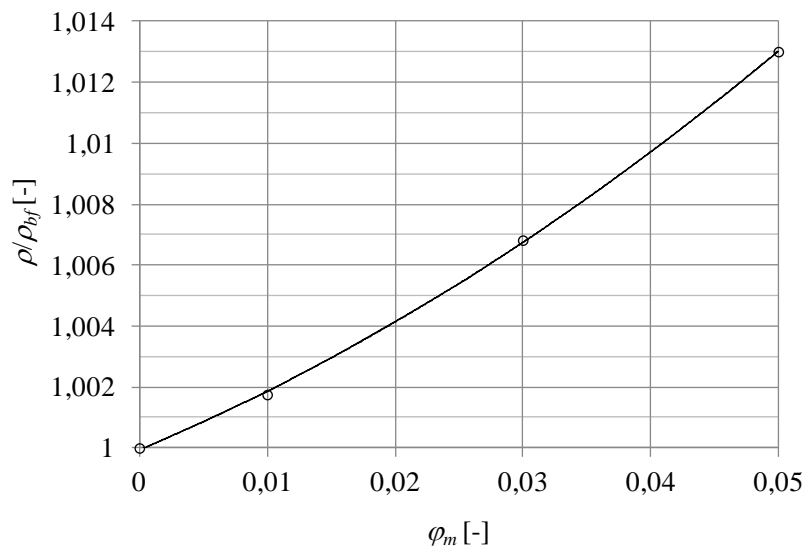
Na slici 3 prikazana je zavisnost porasta gustine jonskog biofluida u odnosu na osnovni fluid od masenog udela čestica za temperaturu jonskog biofluida od 30 °C. Vrednosti porasta gustine veoma su bliske za razmatrane temperature jonskog biofluida. Porast gustine jonskog biofluida nelinearno se povećava sa porastom masenog udela čestica. Zavisnost porasta gustine od masenog udela čestica jonskog biofluida može da se prikaže sledećom polinomskom funkcijom:

$$\frac{\rho}{\rho_{bf}} = f \cdot \varphi_m^2 + g \cdot \varphi_m + h, \quad (3)$$

gde je  $\rho_{bf}$  gustina osnovnog fluida [kg/m<sup>3</sup>]. Vrednosti parametara  $h$ ,  $g$ ,  $f$  i  $R^2$  polinomske funkcije (3) prikazane su u tabeli 3.

*Tabela 3. Vrednosti parametara polinomske funkcije (3)*

$t$ [°C]	$f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$g$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$h$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$R^2$ [-]
30	1,7445	0,1746	0,9999	0,9998



*Slika 3. Zavisnost porasta gustine tečnosti od masenog udela čestica na temperaturi od 30 °C*

## ZAKLJUČAK

Gustina jonske tečnosti [2-OHC<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>][For] povećava se suspendovanjem čestica dobijenih od stabljika suncokreta postupcima hidrotermalne karbonizacije i tretmana u peći sa inertnom atmosferom. Gustina dobijene jonske biotečnosti linearno se smanjuje sa porastom temperature i nelinearno raste sa porastom masenog udela čestica. Porast gustine jonske biotečnosti u odnosu na jonsku tečnost iznosi oko 13% pri masenom udelu čestica od 5 wt%. Autori planiraju da nastave istraživanje termofizičkih osobina predmetne jonske biotečnosti. U narednom periodu uradiće se merenje toplotne provodljivosti i viskoznosti jonske biotečnosti.

## ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat istraživanja na projektu “Research and development of ionic bio fluids - RIDIBF” koji se realizuje u okviru Programa za izvrsne projekte mladih istraživača - PROMIS finansiranog od strane Fonda za nauku Republike Srbije.

## LITERATURA

1. Fröba A.P., Kremer H. and Leipertz, A. (2008) Density, Refractive Index, Interfacial Tension, and Viscosity of Ionic Liquids [EMIM][EtSO<sub>4</sub>], [EMIM][NTf<sub>2</sub>], [EMIM][N(CN)<sub>2</sub>], and [OMA][NTf<sub>2</sub>] in Dependence on Temperature at Atmospheric Pressure, *The Journal of Physical Chemistry B*, 112, 12420-12430.
2. Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. (1993). Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles. *NetsuBussei*, 7, 227-233.
3. Minea A.A. and Murshed S.M.S. (2018) A review on development of ionic liquid based nanofluids and their heat transfer behavior. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 584-599.
4. Nieto de Castro C.A, Lourenço M.J.V, Ribeiro A.P.C, Langa E, Vieira S.I.C, Goodrich P, et al. (2010). Thermal Properties of Ionic Liquids and Ionanofluids of Imidazolium and Pyrrolidinium Liquids. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55(2), 653-661.
5. Papović S., Vraneš M., Armaković S., Armaković S.J., Szécsényia K.M., Rogač M.B., Slobodan G. (2017) Investigation of 1,2,3-trialkylimidazolium ionic liquids: experiment and density functional theory calculations, *New Journal of Chemistry*, 41, 650-660.
6. Patil V., Cera-Manjarre A., Salavera D., Rode C., Patil K., Nieto de Castro C.A., Coronas A. (2016). Ru-imidazolium halide Ionanofluids. Synthesis, structural, morphological and thermophysical properties. *Journal of Nanofluids*, 5, 191-208.
7. Radojčin M, Bikić S, Pavkov I, Bukurov M, Despotović B, Stamenković Z and Oluški N. (2022) Experimental investigation on thermophysical properties of iobiofluids. *Advances in Mechanical Engineering, Advanced Practices in Aerospace and Energy Engineering*, 14:(1), 1-15.
8. Rogers R.D., and Seddon K.R. (2003) Ionic Liquids-Solvents of the Future?, *Science*, 302(5646), 792-793.
9. Shevelyova M.P., Paulechka Y.U., Kabo G.J., Blokhin A.V., Kabo A.G., Gubarevich T.M. (2013) Physicochemical Properties of Imidazolium-Based Ionic Nanofluids: Density, Heat Capacity, and Enthalpy of Formation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117, 4782-4790.
10. Titan P.C., (2014) Investigation of thermal performance of nanoparticle enhanced ionic liquids (NEILs) for solar collector application, University of South Carolina, Ph.D. Thesis, USA.
11. Titan P.C., Morshed A.K.M.M., Fox E.B., Khan J.A. (2015). Thermal performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticle Enhanced Ionic Liquids (NEILs) for Concentrated Solar Power (CSP) applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 585-594.

12. Qiu L, Zhu N, Feng Y, Michaelides EE, Żyła G, Jing D, Zhang X, Norris PM, Markides CN, Mahian O. (2020). A review of recent advances in thermophysical properties at the nanoscale: From solid state to colloids. *Physics Reports*, 843, 1-81.
13. Queirós C.S.G.P. (2010) Estudo do aproveitamento de resíduos de frutos como novos materiais absorvedores térmicos, Master thesis in Technological Chemistry, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
14. Queirós C.S.G.P., Lourenço, M.J.V., Santos F.J.V. and Nieto de Castro C.A. (2019). IoBiofluids – A Sustainable Alternative to Current Heat Transfer Fluids, 1<sup>st</sup> International Conference on Nanofluids (ICNf2019), 2<sup>nd</sup> European Symposium on Nanofluids (ESNf2019), 26-28 June 2019, Castelló, Spain, Conference Proceedings, 452-455.
15. Vraneš M., Panić J., Tot A., Ostojić S., Četojvić-Simin D., Janković N., Gadžurić S. (2019). Synthesis and Thermophysical Characterization of New Biologically Friendly Agmatine-Based Ionic Liquids and Salts by Experimental and Computational Approach. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 7(12), 10773-10783.
16. Xie H., Zhao Z., Zhao J., Gao H. (2016). Measurement of thermal conductivity, viscosity and density of ionic liquid [EMIM][DEP]-based nanofluids, *Chinese Journal of Chemical Engineering* 24(2016), 331-338.

**DENSITY MEASUREMENT OF IONIC BIO FLUID**

*Siniša BIKIĆ<sup>1\*</sup>, Milivoj RADOJČIN<sup>2</sup>, Maša BUKUROV<sup>1</sup>,  
Ivan PAVKOV<sup>2</sup>, Milan VRANEŠ<sup>3</sup>, Snežana PAPOVIĆ<sup>3</sup>, Edin BERBEROVIĆ<sup>4</sup>*  
<sup>1</sup>*University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6,  
21000 Novi Sad, Republic of Serbia*  
<sup>2</sup>*University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Trg Dositeja Obradovića 6,  
21000 Novi Sad, Republic of Serbia*  
<sup>3</sup>*University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Trg Dositeja Obradovića 3,  
21000 Novi Sad, Republic of Serbia*  
<sup>4</sup>*University of Zenica, Politechnic Faculty, Fakultetska 1,  
72000 Zenica, Bosna and Hercegovina*  
*E-mail: \*bika@uns.ac.rs*

The subject of the research in this work was density of ionic bio fluid obtained by suspending of agricultural biomass particles in an ionic liquid as a base fluid. The aim of the research was to continue development of new class of dispersions obtained using agricultural waste biomass as a sustainable alternative to ionic nanofluids. Sunflower stalks as agricultural waste biomass were used to produce particles. The ionic liquid (2-hydroxypropyl) ammonium - formate [2-OHC<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>][For] was used as a base fluid. The dispersion was prepared using the most widely applied two-step method. In the first step particles were produced as dry powder utilizing hydrothermal carbonization and heat treatment in the oven with inert atmosphere. In the second step particles were dispersed into the ionic liquid. Density of ionic bio fluid was measured by pycnometer, analytical balance and thermal bath model. Measurements of density of ionic bio fluid with different mass concentration of particles (0 wt%, 1 wt%, 3 wt%, 5 wt%) at different temperatures (30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C and 70 °C) were conducted. The density of ionic bio fluid was found to be increasing with mass concentration of particles and decreasing with temperature.

**Keywords:** *ionic bio fluid, ionic liquid, agricultural biomass, nanoparticles, nanofluids*

## RESEARCH ON THE PERCEPTION OF CONSUMPTION OF COW'S CHEESE FORTIFIED WITH SPIRULINA PLATENSIS

*Violeta GAGU (LEOCĂ), Mirela Gianina CALU,  
"Dunărea de Jos" University of Galati, Faculty of Food Science and Engineering, 47 Domnească  
Street, RO-800008, Galati, Romania  
E-mail: mirelacalu@yahoo.com*

### ABSTRACT

In order to make decisions about the choice, purchase and consumption of food, it is necessary to analyze consumer behavior. It is necessary to study the consumer's perception in order to meet his requirements. The criteria on the basis of which consumers choose foods of high biological value are elements that can be used in obtaining protein-enriched foods, respectively cow's cheese with the addition of *Spirulina platensis* in powder form. Functional foods can bring many potential health benefits. *Spirulina platensis* is used as a dietary supplement, due to its function of stimulating the immune system and due to its antiviral activity. This research analyzed the consumer's perception of the ratio of consumption of functional foods and their quality, including the consumption of innovative food cow's cheese with the addition of *Spirulina platensis*. Exploratory research has shown that there is a favorable image among consumers of foods that can also contribute to improving or maintaining health. The SAIN-LIM questionnaire and method are the tools used in exploratory marketing research.

**Keywords:** *consumer perception, functional foods, health, quality*

### INTRODUCTION

Foods that can be eaten in the normal diet and that contain biologically active compounds with the potential to improve health or reduce the risk of disease are considered functional.

Cow's cheese with the addition of *Spirulina platensis* which is not normally present in food and which is not required as a macro- or micronutrient, but for whose beneficial effects it has been used has become a functional food.

### MATERIAL AND METHOD

In order to highlight the factors that act on the process of purchasing dairy products with high biological value, an exploratory marketing research was conducted through a pilot survey, consisting of 15 questions. The investigated group consisted of 74 people. The research was conducted in January-February of 2022. For the interpretation of the results were used in the research used qualitative variables expressed in words, such as: gender, environment, profession, assessments of a particular product Innovative food cow cheese with the addition of *Spirulina platensis*, consumer perception on the ratio of consumption of functional foods, intention to buy innovative food cow cheese with the addition of *Spirulina platensis*. The measurement of qualitative variables was performed using specially developed tools called scales. There are a number of qualitative variables that can only be evaluated in categorical form (by nominal scales), such as: gender, environment, profession, etc.

The evaluation of the nutritional profile of cow's cheese with the addition of *Spirulina platensis*, as well as the analysis of the ability to promote the nutritional balance of the innovative food product of cow's cheese with the addition of *Spirulina platensis* was performed by the SAIN-LIM method.

### RESULTS AND DISCUSSION

Out of a total of 74 respondents, 83.8% were women and 16.2% were men, of which 95.9% consumed dairy products. Considering the specifics of the investigated group, using the average calculated from the limit of unequal intervals by the current method, the average monthly income of the interviewees was over 1650 lei for 97.3%.

When the interviewees make the decision to purchase a food product, they take into account the following priorities: protecting the life and health of their and their families 61.6%; quality assurance of nutrition 31.5%; saving the family budget 5.5%; as natural as possible, without food preservatives 1.4%.

The way in which the environment where the respondents live (urban - 81.1% and rural - 18.9%) influences the decision to buy dairy products is shown below (figure 1):

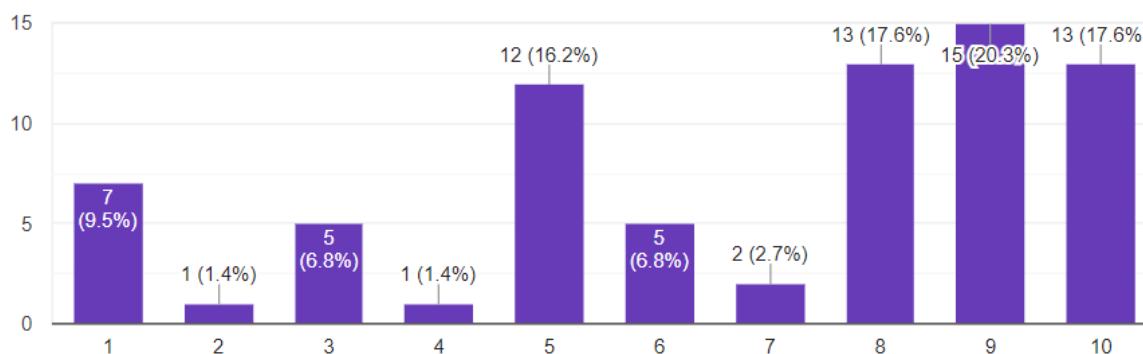


Figure 1. How it influences the environment where respondents live (urban / rural)

From the demographic data extracted from the questionnaire, it was identified that the environment of origin does not influence the consumption of dairy products.

Research conducted on a sample of 74 respondents aimed to identify which categories of products potentially beneficial to health are commonly consumed.

The following question was asked to the respondents:

Which categories of products below are the usual ones to consume? (more answers)

- with the addition of vitamins and minerals
- with the addition of dietary fiber
- without sugar
- no caffeine
- partially or totally degreased
- without salt
- without alcohol
- I am not used to consuming such products

Regarding the first objective of the research, the ratio of the consumption of functional foods and their quality, can be concluded:

- 23.3% consume food with the addition of vitamins and minerals, 20.5% with the addition of dietary fiber, 17.8% without alcohol, 15.1% without caffeine, 12.3% without sugar, 8.2% partially or totally defatted, 2.8% do not usually consume such products;
- because functional foods can bring many potential health benefits 75.7% of respondents believe that cow's cheese with spirulina is good for health and 100% would buy a product that brings a health benefit.



Regarding the second objective of the research - the evaluation of the extent to which consumers know what the notion of functional food means in the case of Spirulina Cow's Cheese and implicitly the consumption of this product can be observed:

- the majority of respondents can identify the correct term: 73% consider the composition, 12.2% marketing, 12% freshness, 1.4% do not know and only 1.4% have not heard of this product;
- 31.1% will recommend the consumption of innovative food cow's cheese with the addition of Spirulina platensis to family and friends.

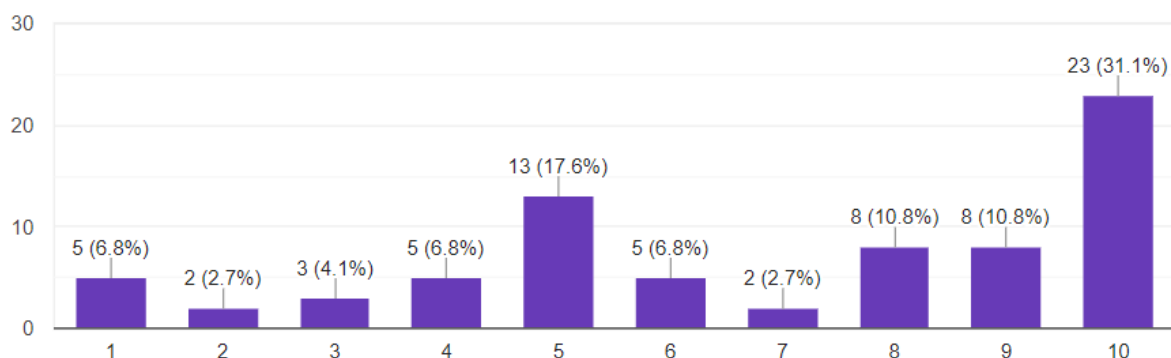


Figure 2. Graphic recommendation of spirulina cow's cheese to family and friends

### SAIN-LIM METHOD

The method offers the possibility to analyze the nutritional profile of foods and to compare them according to their ability to promote a balanced diet. The SAIN-LIM method is based on two indicators (SAIN and LIM), which summarize both the beneficial and unfavorable effects of food.

The SAIN score was an unweighted arithmetic mean of percentage adequacy for 5 positive nutrients (plus 1 optional nutrient). It has been calculated for 100 kcal of food, as follows:

$$SAIN_i = \frac{\sum_{p=1}^{p=5} ratio_{ip}}{5} \times 100 \quad (1)$$

The LIM score was the average percentage of the maximum recommended values for 3 nutrients, the intake of which should be limited in a healthy diet. The LIM score was calculated for 100 g of food as follows:

$$LIM_i = \frac{\sum_{l=1}^{l=3} ratio_{il}}{3} \quad (2)$$

Table 1. Nutritional profile of the analyzed product

Product	Nutrition profile and recommendations through the SAIN-LIM Method
Spirulina cow's cheese	Balanced profile, recommended for consumption

Source: written by the authors

## CONCLUSION

Exploratory research has shown that there is a favorable image among consumers of foods that can also contribute to improving or maintaining health.

The willingness to purchase functional products is not specific to a particular gender (male or female).

The profile of the buyer of functional foods must be understood strictly by reference to the investigated population, avoiding generalizations at the level of other population groups.

A trend in the current dairy market is to orient consumers towards functional, natural and healthy products.

In order to clarify the potentially health-enhancing or disease-reducing effect of functional food, spirulina cow's cheese, in-depth research is needed on the effect of active biologics on regular diet.

## REFERENCES

1. Barker J, Meletis C – Functional Foods for Childhood Development. *Alternativ & Complementary Therapies* 2004; 10(3); 131-134.
2. DARMON, N., VIEUX, F. (2009). Nutrient profiles discriminate between foods according to their contribution to nutritionally adequate diets: a validation study using linear programming and the SAIN - LIM system. In: *AJCN* [accessed February 24, 2022]. Available: <http://ajcn.nutrition.org/content/89/4/1227.full>.
3. Hurgoiu V – Alimente funcționale. *Revista Română de Pediatrie* 2004; LIII (1): 18-23.
4. ȚİMIRAȘ, LAURA C. (2016). Cercetări de marketing : aplicații și studii de caz / Laura Cătălina Țimiraș ; ref. șt.: prof. univ. dr. Eugenia Harja, conf. univ. dr. Diana Prihoancă. - Bacău : Alma Mater, 2016 ISBN 978-606-527-542-3
5. Williams P. Consumer understanding and use of health claims for foods. *Nutr Rev* 2005;63:256–64.

## ISTRAŽIVANJE PERCEPCIJE POTROŠAČA O KONZUMIRANJU KRAVLJEG SIRA OBOGAĆENOG *Spirulinom Platensis*

*Violeta GAGU (LEOČĂ), Mirela Gianina CALU,*  
"Dunărea de Jos" Galati Univerzitet, Fakultet prehrambenih nauka i inženjerstva, 47 Domnească  
ulica, RO-800008, Galati, Rumunija  
E-mail: mirelacalu@yahoo.com

Za donošenje odluka o izboru, kupovini i potrošnji namirnica potrebno je analizirati ponašanje potrošača. Neophodno je proučiti percepciju potrošača kako bi se zadovoljili njegovi zahtevi. Kriterijumi na osnovu kojih potrošači biraju namirnice visoke biološke vrednosti su elementi koji se mogu koristiti za dobijanje namirnica obogaćenih proteinima, odnosno kravljeg sira sa dodatkom *Spiruline platensis* u obliku praha. Funkcionalna hrana može doneti mnoge potencijalne zdravstvene benefite. *Spirulina platensis* se koristi kao dodatak ishrani, zbog funkcije stimulisanja imunog sistema i zbog antivirusne aktivnosti. Ovo istraživanje analiziralo je percepciju potrošača o odnosu potrošnje funkcionalnih namirnica i njihovog kvaliteta, uključujući i potrošnju inovativnog prehrambenog kravljeg sira sa dodatkom *Spiruline platensis*. Naučna istraživanja su pokazala da među potrošačima postoji povoljan tip namirnica koje takođe mogu doprineti poboljšanju ili očuvanju zdravlja. SAIN-LIM upitnik i metoda su alati koji se koriste u istraživačkim marketinškim istraživanjima.

**Ključne reči:** *percepcija potrošača, funkcionalna hrana, zdravlje, kvalitet*

## MATEMATIČKO MODELOVANJE KINETIKE SUŠENJA ZAMRZAVANJEM AMERIČKE VISOKOŽBUNASTE BOROVNICE

Krstan KEŠELJ, Ivan PAVKOV, Milivoj RADOJČIN, Zoran STAMENKOVIĆ, Mladen IVANIŠEVIĆ  
Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Srbija  
E-mail: [krstan.keselj@polj.uns.ac.rs](mailto:krstan.keselj@polj.uns.ac.rs)

### APSTRAKT

Sušenje zamrzavanjem voćarskih proizvoda još uvek nije dovoljno istražena oblast. U dostupnoj naučnoj literaturi nema dovoljno radova na temu matematičkog modelovanja kinetike sušenja zamrzavanjem. Cilj ovog rada bila je aproksimacija kinetika sušenja zamrzavanjem primenom pet matematičkih modela na dve početne temperature uzorka.

Sveža borovnica je zamrzavana na -20 u komercijalnom zamrzivaču i na -40 °C u laboratorijskom zamrzivaču za duboko zamrzavanje. Sušenje je izvedeno u unapređenom laboratorijskom liofilizatoru proizvođača Martin Christ oznake Alpha 2-4 LDplus, kapaciteta 4kg leda. Zahvaljujući unapređenju, koje se ogleda u dodavanju senzora mase i sedam sondi za merenje temperature, omogućeno je praćenje promene mase i temperature tokom sušenja. Senzor mase i temperaturne sonde povezane su sa računarnom preko akvizicije što omogućuje praćenje promena mase i temperature svake sekunde tokom merenja. Masa uzorka za svaku eksperimentalnu jedinicu iznosila je  $300 \pm 15$  g, zamrznute borovnice. Sušenje je izvedeno pri apsolutnom pritisku od 300 Pa. Pre sušenja pokožica svake borovnice je mehanički zarezana, jer je ustanovljeno da pokožica oteževa proces sušenja. Na osnovu pregledane referentne literature odlučeno je za primenu pet matematičkih modela. Na osnovu statističkih pokazatelja  $R^2$ ,  $X^2$ , S i RMSE dolazi se do zaključka da model Page najbolje aproksimuje kinetiku sušenja zamrzavanjem američke borovnice. Iako model Page najpreciznije odgovara eksperimentalnim podacima i drugi modeli mogu se primeniti, jer na osnovu primenjenih statističkih pokazatelja i oni odgovaraju sa visokim preciznošću.

**Ključne reči:** Matematičko modelovanje, američka borovnica, sušenje zamrzavanjem, kinetike sušenja

### UVOD

Plod američke borovnice bogata je nutrijentima kao što su ugljeni hidrati, antocijani, vitamini A i C, masti, taninom, a pored toga i gvožđem i kalcijumom. Zbog svog sastava borovnicu je najbolje konzumirati u svežem stanju. Međutim to je teško ostvarivo jer se berba kod većine sorti odvija u periodu od 6 do 8 nedelja tokom godine. Obezbeđivanje borovnice u svežem stanju tokom cele godine bilo bi gotovo neostvarivo ili vrlo skupo. Iz tog razloga borovnica se često zamrzava ili prerađuje. Jedan od načina prerade je sušenje različitim tehnikama.

Tehnika sušenja primenjavana u ovom radu naziva se sušenje zamrzavanjem ili kako je poznata pod drugim imenom liofilizacija. Sušenje zamrzavanjem je dobar način konzerviranja hrane i očuvanja hemijskog i nutritivnog sastava kod toplotno osetljivih materijala. Posebnu primenu nalazi u farmaciji, biotehnologiji, finih hemikalija, a u poslednje vreme i sve više kod sušenja voća i povrća. U odnosu na konvektivne tehnike, sušenjem zamrzavanjem bolje se očuvaju vitamini, antocijani, fenoli itd. i zbog toga je u svetu poznata kao tehnika sušenja koja daje proizvod najvišeg kvaliteta. Glavni nedostatak sušenja zamrzavanjem je značajno veća potrošnja energije u odnosu na druge tehnike. U odnosu na konvektivni metod troši se od 2 do 10 puta više energije (Krstan et al., 2017; Bhatta et al., 2020; Nowak et al., 2020).

## MATERIJAL I METOD

### Materijal

Sveže borovnice sorte Duke pribavljene su od lokalnog prodavca u Novom Sadu. Kod sušenja zamrzavanjem borovnice su skladištene na temperaturi od -20°C i -40°C. Na temperaturi od -20°C borovnice su skladištene u komercijalnom zamrzivaču proizvođača Beko. Na -40°C maline su skladištene u zamrzivaču za duboko zamrzavanje proizvođača Artico, oznake ULUF 120.

### Metod

Sušenje zamrzavanjem izvedeno je u unapređenom liofilizatoru proizvođača Martin Christ, oznake Alpha 2-4 LDplus. Pored osnovnih funkcija sušenja, liofilizator je modifikovan da meri promenu mase tokom vremena, ugradnjom senzora mase proizvođača HBM sa oznakom S2M. Senzor mase je povezan na računar primenom akvizicije proizvođača HBM, oznake MVD2555. Pored toga ugradnjom sedam termoparova tipa K, omogućeno je merenje promene temperature tokom sušenja u sedam tačaka. Termoparovi su povezani na računar preko akvizicije proizvođača National Instruments, oznake NI USB-9162 (možda ubaciti sliku liofilizatora).

Promena mase tokom vremena beležena je na računaru na svakih 100 sekundi, primenom softvera Catman Data Acquisition Software, proizvođača HBM. Promena temeperature beležena je takođe na svakih 100 sekundi, primenom softvera LabVIEW, proizvođača National Instruments. Akvizicije za beleženje vrednosti promene mase i temperature povezane su na računar gde su zabeleženi podaci sačuvani u Microsoft Excel tipu datoteke. Sušenje zmarzavanjem je izvedeno pri apsolutnom pritisku od 300 Pa i dužini trajanja od 48 sati. Borovnice su pažljivo odabrane i podjednako raspoređene na tri police. Police su fiksirane sa donje strane senzora mase. Masa svežeg uzorka borovnice iznosila je 350 g ± 15 g borovnica, dok je vlažnost iznosila 86% u odnosu na vlažnu bazu.

Izmereni rezultati tokom sušenja zamrzavanjem izraženi su preko bezdimenzionalne veličine MR (Moisture Ratio) prema jednačini (Pavkov et al., 2017; Ratti et al., 2001; Stamenković et al., 2019):

$$MR = \frac{\omega_t - \omega_{eq}}{\omega_0 - \omega_{eq}}$$

Gde je:  $\omega_t$  - sadržaj vlage izmeren u datom trenutku (kgv/kg<sub>sm</sub>);  $\omega_0$  - početna vlažnost uzorka (kgv/kg<sub>sm</sub>);  $\omega_{eq}$  - ravnotežna vlažnost od 13% (kgv/kg<sub>sm</sub>).

Na osnovu pregleda literature odlučilo se za primenu pet matematičkih modela na dobijene krive sušenja (MR). Primenjeni modeli dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Primenjeni matematički modeli na krive sušenja

No.	Name of model	Model	References
1.	Newton	$MR = \exp(-k\tau)$	Lewis, (1921)
2.	Page	$MR = \exp(-k\tau^n)$	Page, (1949)
3.	Modified Page	$MR = \exp(-(k\tau)^n)$	Overhults, (1973)
4.	Logarithmic	$MR = a \exp(-k\tau) + b$	Yagcuoglu, (1999)
5.	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-k\tau)$	Henderson and Pabis, (1961)

\*  $k$  - drying constant;  $n$  - model exponent;  $b$  - model coefficient;  $\tau$  - drying time;

Za utvrđivanje modela koji najbolje odgovara primenjeni su sledeći statistički pokazatelji: koeficijent korelacija (R), koeficijent determinacije (R<sup>2</sup>), hi-kvadrat (X<sup>2</sup>), srednja greška kvadrata (RMSE), standardna greška regresije (S) i srednja greška pristrasnosti (MBE). Kada se posmatra koeficijent

korelacije i koeficijent determinacije, težnja je da model bude što bliži vrednosti 1. Kod hi-kvadrat je obrnuto i niža vrednost označava veću preciznost modela. Model sa standardnom greškom regresije sa vrednostima manjim od 0,025 ili 2,5 % predstavlja precizan matematički model. Niža vrednost srednje greške kvadrata prikazuje manju devijaciju između eksperimentalnih i modelom predviđenih podataka. Srednja greška pristrasnosti predstavlja srednju vrednost greške između eksperimentalno dobijenih vrednosti i vrednosti predviđenih matematičkim modelom, pri čemu vrednost srednje greške pristrasnosti može biti i negativna (*Megnes and Ertekin, 2006 Pavkov et al., 2012; Doymaz, 2008; Menges et al., 2006, Naderinezhad et al., 2016; Lee and Hsieh, 2008*).

### REZULTATI I DISKUSIJA

U tabeli 2, prikazani su statistički pokazatelji preciznosti aproksimacije kinetike sušenja borovnice zamrzavanjem, pri prethodnom zamrzavanju borovnice u temperaturnom okruženju od -20°C. Od ispitanih 5 matematičkih modela prema statističim pokazateljima  $R$ ,  $R^2$ ,  $\chi^2$ ,  $S$ ,  $RMSE$  i  $MBE$ , Page model se pokazao kao najprecizniji pri aproksimaciji kinetike sušenja borovnice zamrzavanjem. Koeficijent korelacije eksperimentalnih podataka i podataka dobijenih Page matematičkim modelom kinetike sušenja iznosi  $R=0,9997$ , koeficijent determinacije  $R^2=0,9995$ , Hi kvadrat  $\chi^2=0,0001$ ,  $S$  statistik  $S=0,00107$ , root mean square error  $RMSE=0,0101$  i mean bias error  $MBE=0,0027$ . Pored Page modela visok stepen preciznosti ostvaruje se i Logarithmic modelom sa koeficijentom korelacije  $R=0,9970$ . Matematički model sa najnižom preciznosti aproksimacije kinetike sušenja borovnice zamrzavanjem je Newton ( $R= 0.9917$ ).

*Tabela 2. Statistički pokazatelji matematičkih modela kinetika sušenja zamrzavanjem za početnu temperaturu uzoraka od -20°C*

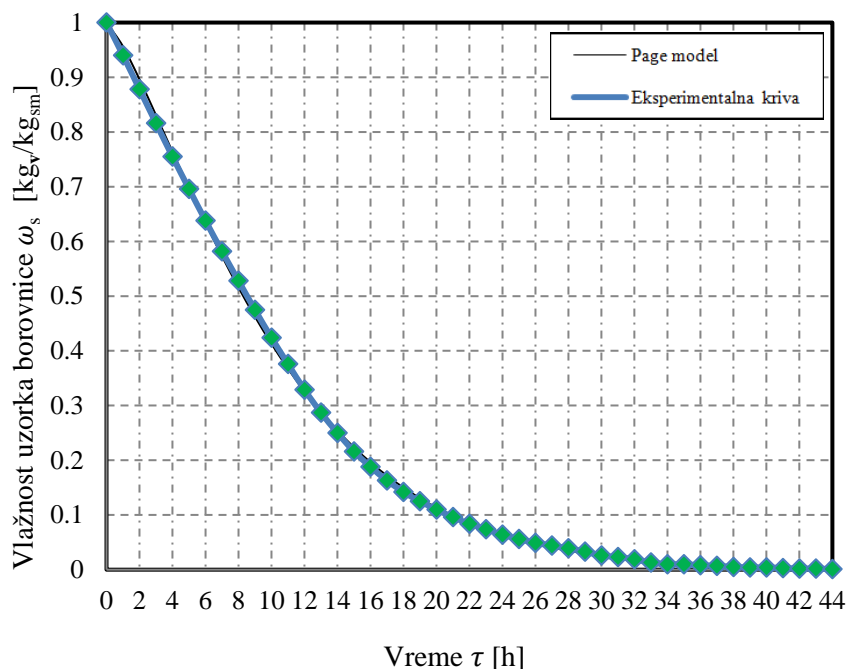
Naziv modela	$R$	$R^2$	$\chi^2$	$S$	$RMSE$	$MBE$
Newton	0,9917	0,9835	0,0036	0,0597	0,0581	0,0137
<b>Page</b>	<b>0,9997</b>	<b>0,9995</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0107</b>	<b>0,0101</b>	<b>0,0027</b>
Modified Page	0,9917	0,9835	0,0038	0,0614	0,0581	0,0137
Logarithmic	0,9970	0,9940	0,0015	0,0383	0,0351	0,0000
Henderson and Pabis	0,9949	0,9897	0,0024	0,0485	0,0459	0,0222

U tabeli 3, prikazani su koeficijenti svih ispitanih matematičkih modela kinetike sušenja zamrzavanjem borovnice koja je prethodno zamrznuta pri temperaturi od -20°C.

*Tabela 3. Koeficijenti matematičkih modela kinetika sušenja zamrzavanjem za početnu temperaturu uzoraka od -20°C*

Naziv modela	$a$	$b$	$k$	$n$
Newton			0,0953	
<b>Page</b>			<b>0,0446</b>	<b>1,2977</b>
Modified Page			0,3086	0,3086
Logarithmic	1,1063	-0,0420	0,0912	
Henderson and Pabis	1,0866		0,1028	

Na slici 1, prikazan je dijagram promene vlažnosti i krive dobijene Page matematičkim modelom, prilikom sušenja borovnice zamrzavanjem koja je prethodno zamrznuta pri temperaturi od  $-20^{\circ}\text{C}$ .



Slika 1. Kriva promene vlažnosti tokom sušenja zamrzavanjem borovnice zamrznuta pri temperaturi okruženja od  $-20^{\circ}\text{C}$

Za postizanje ravnotežne vlažnosti prilikom sušenja borovnice koja je prethodno zamrznuta temperaturom vazduha od  $-20^{\circ}\text{C}$ , potrebno je 36-40h. Pri tome vlažnost borovnice snižena je sa početnih  $\omega_{sm}=2.509$  g/g<sub>sm</sub> ( $\omega=71\%$  vlažnost u odnosu na suhu bazu) na  $\omega_{sm}=0.153$  g/g<sub>sm</sub> ( $\omega=13\%$  vlažnosti u odnosu na suhu bazu). Prvih 12h odlikuje ujednačena (koeficijent determinacije linearne regresije opadanja vlažnosti materijala iznos  $R^2=0,9978$ ) promena vlažnosti materijala, dok se nakon 12h uočava postepeno opadajući trend brzine sušenja materijala sve do postizanja ravnotežne vlažnosti materijala. U prvih 12h vlažnost materijala opadne sa početnih  $\omega_{sm}=2.509$  g/g<sub>sm</sub>, ( $\omega=71\%$ ;  $MR=1$ ), do  $\omega_{sm}=0.928$  g/g<sub>sm</sub>, ( $\omega=48\%$ ;  $MR=0,329$ ).

U tabeli 4, prikazani su statistički pokazatelji preciznosti aproksimacije kinetike sušenja borovnice zamrzavanjem, pri prethodnom zamrzavanju borovnice u temperaturnom okruženju od  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Page model se takođe pokazao kao najprecizniji pri aproksimaciji kinetike sušenja borovnice zamrzavanjem pri prethodnom zamrzavanju borovnice od  $-40^{\circ}\text{C}$ . Zbog oscilacije eksperimentalnih podataka koji su prikazana na slici 2 svi statistički pokazatelji niži su u odnosu na prethodni slučaj kada je borovnica zamrznuta pri temperaturi okruženja od  $-20^{\circ}\text{C}$ . Koeficijent korelacije sa podacima dobijenih Page matematičkim modelom kinetike sušenja iznosi  $R=0,9977$ , koeficijent determinacije  $R^2=0,9953$ , Hi kvadrat  $\chi^2=0,0010$ , S statistik  $S=0,0313$ , root mean square error  $RMSE=0,0296$  i mean bias error  $MBE=-0,0167$ . Sa druge strane isti modeli visoke preciznosti potvrđeni su u oba ispitana slučaja. Logarithmic model ima visok koeficijent korelacije od  $R=0.9967$ . Takođe, matematički model sa najnižom preciznosti aproksimacije kinetike sušenja borovnice zamrzavanjem u ovom slučaju je Modified Page ( $R=0,9949$ ).

Tabela 4. Statistički pokazatelji matematičkih modela kinetika sušenja zamrzavanjem za početnu temperaturu uzoraka od  $-40^{\circ}\text{C}$ 

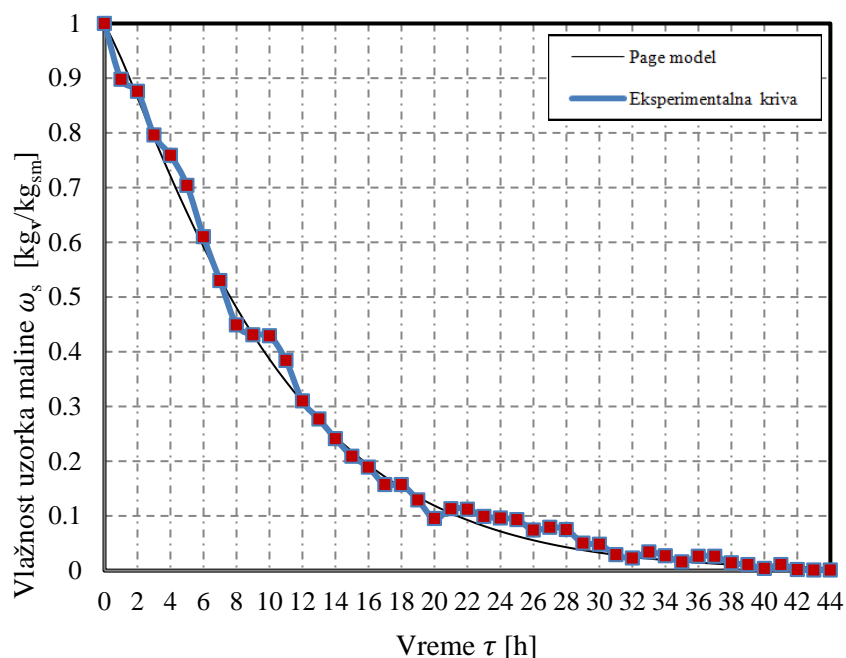
Naziv modela	$R$	$R^2$	$\chi^2$	$S$	$RMSE$	$MBE$
Newton	0,9949	0,9899	0,0020	0,0448	0,0436	0,0052
<b>Page</b>	<b>0,9977</b>	<b>0,9953</b>	<b>0,0010</b>	<b>0,0313</b>	<b>0,0296</b>	<b>-0,0167</b>
Modified Page	0,9949	0,9899	0,0021	0,0461	0,0436	0,0057
Logarithmic	0,9967	0,9935	0,0015	0,0381	0,0350	0,0000
Henderson and Pabis	0,9962	0,9925	0,0016	0,0397	0,0376	0,0100

U tabeli 5, prikazani su koeficijenti svih ispitanih matematičkih modela kinetike sušenja zamrzavanjem borovnice koja je prethodno zamrznuta pri temperaturi od  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Tabela 5. Koeficijenti matematičkih modela kinetika sušenja zamrzavanjem za početnu temperaturu uzoraka od  $-40^{\circ}\text{C}$ 

Naziv modela	$a$	$b$	$k$	$n$
Newton			0,0959	
<b>Page</b>			<b>0,0651</b>	<b>1,1646</b>
Modified Page			0,3095	0,3095
Logarithmic	1,0623	-0,0196	0,0948	
Henderson and Pabis	1,0542		0,1007	

Na slici 2, prikazan je dijagram eksperimentalne kinetike sušenja i kinetike sušenja dobijene Page matematičkim modelom, prilikom sušenja zamrzavanjem borovnice koja je prethodno zamrznuta pri temperaturi od  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Slika 2 Kriva promene vlažnosti tokom sušenja zamrzavanjem borovnice zamrznuta pri temperaturi okruženja od  $-40^{\circ}\text{C}$



Za postizanje ravnotežne vlažnosti prilikom sušenja borovnice koja je prethodno zamrznuta temperaturom vazduha od  $-40^{\circ}\text{C}$ , potrebno je 40h, što je relativno više u odnosu na prethodni slučaj gde je potrebno 36-40h. Ova razlika u vremenu postizanja ravnotežne vlažnosti može se pripisati i povišenoj početnoj vlažnosti uzoraka borovnice koji su sušeni uz prethodno zamrzavanje u temperaturnom okruženju od  $-40^{\circ}\text{C}$ , koje je iznosilo  $\omega_{sm} = 3.311 \text{ g/g}_{sm}$  ( $\omega = 76 \%$  vlažnost u odnosu na suhu bazu). Ravnotežna vlažnost borovnice pri sušenju zamrzavanjem u ovom slučaju iznosila je takođe  $\omega_{sm} = 0.153 \text{ g/g}_{sm}$  ( $\omega = 13 \%$  vlažnost u odnosu na suhu bazu).

Isto kao i u prvom slučaju može se primetiti ujednačena promena vlažnosti materijala u prvih 12h procesa sušenja, dok se nakon 12h uočava postepeno opadajući trend brzine sušenja materijala sve do postizanja ravnotežne vlažnosti materijala.

### ZAKLJUČAK

Za oba slučaja ( $-20$  i  $-40^{\circ}\text{C}$ ) matematički model Page najbolje aproksimira krive sušenja. Nema značajnih razlika u brzini sušenja između uzoraka sa početnom temperaturom od  $-20$  i uzoraka sa  $-40^{\circ}\text{C}$ . Međutim pre donošenja zaključka u pogledu boljeg načina pripreme uzorka za sušenje neophodno je sprovesti još neka istraživanja. Buduća istraživanja, gde bi se izmeđuostalog odredio koeficijent difuzije, uradilo modelovanje krivih primenom drugih modela, uradile mehaničke osobine osušenog materijala, proverila promena boje, uradile hemijske analize sadržaja antocijana, flavenoida, vitamina i dr, dodatno bi doprinelo u odabiru kvalitetnijeg metoda pripreme materijala za sušenje..

### ZAHVALNICA

Ovaj rad je rezultat istraživanja koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (broj ugovora: 451-03-68/2022-14/200117).

### LITERATURA

1. Bhatta, Sagar; Stevanovic-Janezic, Tatjana; Ratti, Cristina (2020). Freeze-Drying of Plant-Based Foods. *Foods*, 9, 87.
2. Doymaz, I. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing*, 47, 914–919.
3. Henderson, S.M., Pabis, S. (1961). Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6 (3), 169–174.
4. Kešelj, Krstan; Pavkov, Ivan; Radojčin, Milivoj; Stamenković, Zoran (2017) Comparison of Energy Consumption in The Convective and Freeze Drying of Raspberries. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 21, (4), 192-196.
5. Lee, G., Hsieh, F. (2008). Thin-layer drying kinetics of strawberry fruit leather. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51 (5), 1699–1705.
6. Lewis, W.K. (1921) The Rate of Drying of Solid Materials. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 13, 427-432.
7. Menges, O.H., Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling od thin layer drying od Golden apples. *Journal of Food Science*, 77, 119-125.
8. Naderinezhad, S., Etesami, N., Najafabady, P., A., Falavarjani, G., M. (2016). Mathematical modeling of drying of potato slices in aforced convective dryer based on important parameters. *Food Science & Nutrition*, 4 (1), 110–118.

9. Nowak, Dorota and Jakubczyk, Ewa (2020). The Freeze-Drying of Foods—The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials. *Foods*, 9, 1488.
10. Overhults, D. G., H. E. White, H. E. Hamilton, I. J. Ross, (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 16, 112–113.
11. Page, C. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layer. Unpublished M.S. Thesis, Purdue University, Lafayette, IN.
12. Pavkov, I. (2012). Kombinovana tehnologija sušenja voćnog tkiva. Doktorska disertacija. Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, Srbija.
13. Pavkov, I., Babić, Ljiljana., Babić, M., Radojčin, M., Stamenković, Z. (2013). Mathematical modelling of convective drying nectarinehalves (*Pyrus Persica L.*). *Savremena poljoprivredna tehnika*, 39 (2), 103-112.
14. Pavkov, Ivan; Stamenković, Zoran; Radojčin, Milivoj; Babić, Mirko; Bikić, Siniša; Mitrevski, Vangelče; Lutovski, Monika., (2017) Convective and Freeze Drying of Raspberry: Effect of Experimental Parameters on Drying Kinetics, Physical Properties and Rehydration Capacity. *Proceedings of Fifth International Conference Sustainable Postharvest and Food Technologies - INOPTep 2017*, pp. 261-267.
15. Pavkov, Ivan; Stamenković, Zoran; Radojčin, Milivoj; Kešelj, Krstan; Bikić, Siniša; Lutovski, Monika; Ponjičan, Ondrej., (2019) Air Drying of Blueberry Fruits: Drying Kinetics, Mathematical Modeling and Physical Properties. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 23, (4), 151-157.
16. Ratti, C., (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49, 311–319.
17. Stamenković, Zoran; Pavkov, Ivan; Radojčin, Milivoj; Kešelj, Krstan; Vakula, Anita; Novaković, Tihomir (2019) Mathematical Modeling Of The Kinetics Of Strawberry Pulp Convective Drying and The Effect of Ascorbic Acid on Strawberry Pulp Color Preservation. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 23, (4), 170-175.
18. Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., & Cagatay, F. (1999). Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions. In 7th International congress on agricultural mechanization and energy, 26–27 May, Adana, Turkey (pp. 565–569).

## MATHEMATICAL MODELING OF FREEZE - DRYING KINETICS OF AMERICAN Highbush BLUEBERRY

*Krstan KEŠELJ, Ivan PAVKOV, Milivoj RADOJČIN, Zoran STAMENKOVIĆ, Mladen IVANIŠEVIĆ*  
*University of Novi Sad, Faculty of Agriculture, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Serbia*  
*E-mail: [krstan.keselj@polj.uns.ac.rs](mailto:krstan.keselj@polj.uns.ac.rs)*

Freeze-drying of fruit products is still not a sufficiently researched area. There is still not enough papers in the available scientific literature on the topic of mathematical modeling of freeze-drying kinetics. Researching the drying kinetics helps to better understand the drying process, which results in process optimization.

The blueberry was supplied by a local producer from the Novi Sad area. After that fresh blueberries were frozen at -20 in a commercial freezer and at -40 °C in a laboratory freezer for deep freezing. Drying was performed in an improved Martin Christ laboratory freeze dryer, marked Alpha 2-4 LDplus, with a capacity of 4 kg of ice. Drying is performed in two stages, where the first stage is primary drying or sublimation drying and the second stage or desorption stage. During the primary drying, between 92 and 95% of the moisture evaporates, the remaining moisture evaporates during the desorption stage, where the temperature of the material rises. Thanks to the improvement, which is reflected in the addition of a mass sensor and seven probes for measuring temperature, it is possible to monitor changes in mass and temperature during drying.

The mass sensor and temperature probes are connected to the computer via an acquisition that allows changes in moisture content and temperature to be monitored every second during the measurement. The mass of the sample for each experimental unit was  $300 \pm 15$  g, frozen blueberries. Drying was performed at an absolute pressure of 300 Pa. Before drying, the skin of each blueberry was mechanically cut, because it was determined that the skin makes the drying process slower or unable to complete. Based on the reviewed reference literature, it was decided to apply five mathematical models. Based on statistical indicators  $R^2$ ,  $X^2$ , S and RMSE, it is concluded that the Page model best approximates the kinetics of freezing of American blueberries. Although the Page model most accurately corresponds to experimental data, other models can also be applied, because based on the applied statistical indicators, they also correspond with high precision.

**Keywords:** *Mathematical modeling, American blueberry, freeze drying, drying kinetics*

### ACKNOWLEDGMENTS

This paper is a result of the research financed by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (contract number: 451-03-68/2022-14/200117).

## BIOGASNE ELEKTRANE I TRŽIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE U REPUBLICI SRBIJI

Filip KULIĆ

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad

E-mail: [kulic@uns.ac.rs](mailto:kulic@uns.ac.rs)

### SAŽETAK

Biogasne elektrane su prema poreklu goriva, obnovljivi izvori energije. Njihovi vlasnici spadaju u povlaštene proizvođače električne energije i njihova proizvodnja je subvencionisana od strane države. Povlašteni proizvođači imaju mogućnost da pod ekonomski povoljnim i garantovanim subvencionisanim uslovima prodaju električnu energiju „Elektroprivredi Srbije“ u dužem vremenskom periodu.

U okviru globalne inicijative za smanjenje emisije štetnih gasova i efekta staklene bašte, kao i radi očuvanja zdrave životne sredine, Vlada Republike Srbije je tokom 2009. godine usvojila čitav set propisa kojima se uređuje proizvodnja energije iz obnovljivih izvora i utvrdila feed-in tarifu koja proizvođačima električne energije iz obnovljivih izvora omogućava da pod povoljnim i garantovanim subvencionisanim uslovima prodaju električnu energiju „Elektroprivredi Srbije“, u periodu od 12 godina.

Zakon o energetici iz 2014. godine doneo čitav niz mera i propisa koji detaljno regulišu oblast obnovljivih izvora energije, uključujući i sektor biogasa. Posebna pogodnost bila je mogućnost sticanja privremenog statusa povlašćenog proizvođača električne energije. Ova mera je bila snažan podsticaj za investitore, jer je omogućila dobijanje povlašćenog statusa pre ozbiljnih investicija u tehnologiju i postrojenje.

U Zakonu o energetici iz 2021 (Sl. glasnik RS 40/2021) ova problematike se briše i postaje predmet posebnog Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije (ZOIE) (Sl. glasnik RS 40/2021). Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije (Sl. glasnik RS 40/2021) ukida feed-in tarife i uvodi sistem aukcija za energiju iz OIE. Status privremenog povlašćenog proizvođača električne energije i dalje postoji i definisan je članom 23. ZOIE.

U ovom radu je izložen istorijski pregled promena na tržištu električne energije u Republici Srbiji vezanih za obnovljive izvore električne energije u periodu od 2009. do 2021. godine. Izvršena je analiza prethodnog perioda kao i trenutnog stanja na tržištu električne energije.

**Ključne reči:** biogas, električna energija, tržište.

### UVOD

U okviru globalne inicijative za smanjenje emisije štetnih gasova i efekta staklene bašte, kao i radi očuvanja zdrave životne sredine, Vlada Republike Srbije je tokom 2009. godine usvojila čitav set propisa kojima se uređuje proizvodnja energije iz obnovljivih izvora i utvrdila fid-in tarifu koja proizvođačima električne energije iz obnovljivih izvora omogućava da pod povoljnim i garantovanim subvencionisanim uslovima prodaju električnu energiju „Elektroprivredi Srbije“, u periodu od 12 godina.

### MATERIJAL I DISKUSIJA

Prva uredba iz 2009. godine (*Službeni glasnik Republike Srbije, 2009*) koja je važila u periodu od 01.01.2010. do 31.12.2012. donela je, za taj momenat veoma stimulativnu fid-in tarifu, tako da su u toku 2010. godine četiri investitora donela odluku o izgradnji elektrane na biogas.

Uredba iz januara 2013 (*Službeni glasnik Republike Srbije, 2013*) koja je važila u periodu od 02.02.2013. do 31.12.2015. je donela nižu fid-in tarifu, pa se u tom periodu svega jedan novi investitor

odlučio na ovaj vid ulaganja. U periodu od 01.01.2013. do 31.12.2015. u rad je puštena samo jedna biogasna elektrana instalisane snage 0,5 MWel.

Zakon o energetici iz 2014. godine doneo čitav niz mera i propisa koji detaljno regulišu oblast obnovljivih izvora energije, uključujući i sektor biogasa. Posebna pogodnost bila je mogućnost sticanja privremenog statusa povlašćenog proizvođača električne energije. Ova mera je ponovo podstakla interesovanje za investiranje u sektor OIE.

Uredbom iz 2016. godine (*Službeni glasnik Republike Srbije, 2016 i 2018*), utvrđena je najstimulativnija fid-in tarifa do tada. To je imalo za rezultat da je u periodu od 01.01.2016. do 31.12.2019. pušteno u rad sedamnaest biogasnih elektrana, ukupne instalisane snage 16,36 MWel.

Nakon prestanka važenja Uredbe iz 2018, (*Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, 2020*) ukida se postojeći sistem podsticajnih mera za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora (fid-in tarifa) i prelazi se na sistem aukcija, koji do danas (vreme pisanja ovog teksta, mart 2022.) još nije zaživeo u potpunosti. Tabela 1 prikazuje broj povlašćenih proizvođača električne energije u biogasnim elektrana prema godinama sticanja statusa i ukupnoj instalisanoj snazi biogasnih elektrana.

*Tabela 1. Broj povlašćenih proizvođača električne energije iz biogasa i ukupna instalisana snaga elektrana po godinama sticanja statusa .*

<b>Godina</b>	<b>2022</b>	<b>2021</b>	<b>2020</b>	<b>2019</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>
<b>Broj elektrana</b>	1	4	6	6	5	2
<b>Instalisana snaga [MWel]</b>	1,00	4,20	6,62	4,73	3,52	2,64
<b>Godina</b>	<b>2016</b>	<b>2015</b>	<b>2014</b>	<b>2013</b>	<b>2012</b>	<b>2011</b>
<b>Broj elektrana</b>	4	0	1	0	3	1
<b>Instalisana snaga [MWel]</b>	5,47	0	0,50	0	2,62	1,74

Svaka uredba o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora je definisala otkupne cene za električnu energiju iz obnovljivih izvora gde su elektrane bile klasifikovane prema energentu koji koriste (sunce, vetar, biomasa, biogas...) i instalisanoj snazi. Tabela 2 prikazuje način obračuna fid-in tarifa za biogasne elektrane. Uredbe su u tabeli prikazane rednim brojem i godinom izdanja Službenog glasnika Republike Srbije gde su objavljene. U izrazima za izračunavanje cene električne energije slovo „P“ označava snagu elektrane u [MW]. Počevši od uredbe 56/16 (*Službeni glasnik Republike Srbije 2016*) definiše se maksimalno dozvoljeno efektivno vreme rada [h/god] elektrane i ono iznosi 8.600 h u godini podsticajnog perioda.

*Tabela 2. Fid-in tarife [c€/kWh] prema uredbama o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije (P – snaga elektrane u MW).*

<b>Instalisana snaga [MWel]</b>	<b>P &lt; 0,2</b>	<b>0,2 &lt; P &lt; 2</b>	<b>P &gt; 2</b>
Uredba 99/09; 124/12 [c€/kWh]	16,00	16,444-2,222*P	12,00
<b>Instalisana snaga [MWel]</b>	<b>P &lt; 0,2</b>	<b>0,2 &lt; P &lt; 1</b>	<b>P &gt; 1</b>
Uredba 08/13 [c€/kWh]	15,66	16,498-4,188*P	12,31
<b>Instalisana snaga [MWel]</b>	<b>P &lt; 2</b>	<b>2 &lt; P &lt; 5</b>	<b>P &gt; 5</b>
Uredba 56/16, 91/18 [c€/kWh]	18,333-1,111*P	16,85-0,370*P	15,00
Uredba mart 2021	19,285-1,168*P	17,724-0,389*P	15,77

Pored proizvodnje električne i toplotne energije, biogasne elektrane donose i druge koristi, kako vlasniku tako i široj društvenoj zajednici (*Knežević, 2020*).

Koristi koje ostvaruje vlasnik (investitor) su: zagarantovan prihod od prodaje električne energije tokom perioda važenja podsticajnih mera; prihod od prodaje toplotne energije; prihod od prodaje visokokvalitetnog organskog đubriva; korist od smanjenja upotrebe mineralnih đubriva (povećanje količine humusa u zemljištu); smanjenje gubitaka hranjivih materija i ispiranja iz obradivog zemljišta; redukcija patogena u stajskom đubrivu; brže usvajanje hranljivih materija od strane biljaka; značajno smanjenje aerozagadenja i dr.

Benefiti koje ostvaruje lokalna zajednica: kreiranje novih radnih mesta u ruralnim sredinama; finansijska stabilnost za lokalne poljoprivrednike; rešavanje problema odlaganja organskog otpada i zaštita životne sredine; redukcija neprijatnih mirisa i emisije gasova sa efektom staklene bašte; poboljšanje kvaliteta zemljišta upotrebom organskog đubriva; “besplatna“ (raspoloživa) toplotna energija za plastenike, sušare, štale; stabilizacija naponskih prilika u električnoj mreži u ruralnim područjima i dr.

### ZAKLJUČAK

U ovom radu je analizirano tržište električne energije u Republici Srbiji u poslednjoj dekadi u svetlu biogasnih elektrana.

Cena električne energije iz obnovljivih izvora jeste relativno visoka u odnosu na konvencionalne izvore ali je njihov doprinos zaštiti životne sredine i održivom razvoju značajan. Pogotovo se to odnosi na biogasna postrojenja i elektrane koje kao sirovinu koriste otpad iz biljne i životinjske proizvodnje i čijim se radom značajno smanjuje nivo zagadenja u ruralnim predelima.

Na taj način će se iskoristiti otpad, smanjiti troškovi poslovanja, povećati energetska stabilnost i samoodrživost celog agrarnog ili agro-industrijskog kompleksa, poboljšati zaštita životne sredine i ostvariti krajnje pozitivni efekti na održivi razvoj.

### ZAHVALNICA

*Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja kroz projekat broj 451-03-68/2022-14/ 200156 "Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN-a".*

### LITERATURA

1. Knežević, G. (2020). Biogasne elektrane – vodič za investiranje. Green Mile Team doo, Novi Sad, Srbija.
2. Službeni glasnik Republike Srbije (2009). Uredba o merama podsticaja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije i kombinovanom proizvodnjom električne i toplotne energije, 99/09.
3. Službeni glasnik Republike Srbije (2012). Uredba o izmeni Uredbe o merama podsticaja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije i kombinovanom proizvodnjom električne i toplotne energije, 124/12.
4. Službeni glasnik Republike Srbije (2013). Uredba o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije, 08/13.
5. Službeni glasnik Republike Srbije (2014). Zakon o energetici, 145/14.
6. Službeni glasnik Republike Srbije (2016). Uredba o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i iz visokoeffikasne kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije, 56/16.
7. Službeni glasnik Republike Srbije (2018). Uredba o izmeni Uredbe o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i iz visokoeffikasne kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije, 91/18.

## **BIOGAS POWER PLANTS AND THE ELECTRICITY MARKET IN THE REPUBLIC OF SERBIA**

*Filip KULIĆ*

*Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad  
E-mail: [kulic@uns.ac.rs](mailto:kulic@uns.ac.rs)*

### **ABSTRACT**

According to the origin of fuel, biogas power plants are renewable energy sources (RES). Their owners are privileged electricity producers, and the state subsidizes their production. Therefore, eligible producers have the opportunity to sell electricity to the "Electric Power Industry of Serbia" for a more extended time under economically favorable and guaranteed subsidized conditions.

As part of the global initiative to reduce emissions and the greenhouse effect, as well as to preserve a healthy environment, the Government of the Republic of Serbia in 2009 adopted a set of regulations governing the production of energy from renewable sources and set a feed-in tariff for electricity from renewable sources. Adopted regulation enables privileged producers to sell electricity to the "Electric Power Industry of Serbia" under favorable and guaranteed subsidized conditions for 12 years.

The 2014 Law on Energy passed a series of measures and regulations that regulate the area of renewable energy sources, including the biogas sector. A particular advantage was the possibility of acquiring the temporary status of a privileged electricity producer. This measure was a strong incentive for investors because it enabled them to obtain a privileged status before serious investments in technology and plant.

This issue is deleted in the Law on Energy from 2021 (Official Gazette of RS 40/2021). Instead, it becomes the subject of a special Law on the Use of Renewable Energy Sources (LURES) (Official Gazette of RS 40/2021). The Law on the Use of Renewable Energy Sources (Official Gazette of RS 40/2021) abolishes feed-in tariffs and introduces a system of auctions for energy from RES. A temporary privileged electricity producer still exists and is defined in Article 23 of the LURES.

This paper presents a historical overview of changes in the electricity market in the Republic of Serbia related to renewable energy sources in the period from 2009 to 2021. An analysis of the previous period and the current situation on the electricity market was performed. Based on that, certain conclusions were drawn about the current profitability of investing in specific technologies to produce electricity from renewable sources such as biogas and solar energy.

**Keywords:** *biogas, electricity, market.*

## OPTIMIZATION OF ANTHOCYANINS EXTRACTION PROCESS FROM BLACK SOYBEAN SEED COAT FOR THE PREPARATION OF MAIZE- BASED FUNCTIONAL FOOD

*Valentina NIKOLIĆ, Slađana ŽILIC, Marijana SIMIĆ,  
Vesna PERIĆ, Jelena SRDIĆ, Marko VASIĆ*

*Maize Research Institute Zemun Polje, Slobodana Bajića 1, 11185 Belgrade, Serbia*

*E-mail: [valentinas@mrizp.rs](mailto:valentinas@mrizp.rs)*

### ABSTRACT

The possibility of enrichment of sweet maize grains with anthocyanin extract was investigated. Several procedures with acetic acid were applied in the experiments of anthocyanins extraction from black soya bean seed coat. During the marination process, the grains were stained, changing their standard yellow color to a crimson red. Since the brines with the addition of citric acid became cloudy (opalescent) after some time, lactic acid was used as an anthocyanin stabilizer in the continuation of the research. Depending on the extraction conditions, the spectrophotometrically determined content of total anthocyanins in the solution varied from 3541.90 to 5387.70 µg CGE/g d.m., and in the marinated maize grain between 179.89 and 286.05 µg CGE/g d.m. After seven days, the total anthocyanin content in the grain did not increase significantly, so this aging period was selected as optimal for marinating maize products.

**Keywords:** *black soybean, anthocyanins, maize, functional food*

### INTRODUCTION

Maize (*Zea Mays* L.) is the most important field crop in the Republic of Serbia, which is grown on about one million hectares per year which includes about 56% of the arable land sown with cereals (Babić et al., 2016). In terms of nutritional value, maize is an excellent source of starch, protein, fat, as well as numerous bioactive compounds important for human health. According to the United States Department of Agriculture (USDA), the total estimated corn production in 2021 was around 1,133.89 million metric tons, and Serbia ranks 16<sup>th</sup> in the world in terms of production of about 8 million metric tons. (World Agricultural Production.com, 2021). The significance of maize is immeasurable due to its various uses in food and feed production, as well as its importance as a raw material for a wide spectrum of products from numerous industries.

Black soya bean (*Glycine max*) has been used for centuries in traditional Eastern medicine for the preparation of teas and fermented products with high antioxidant capacity. Black soya bean seed coat has a high content of anthocyanins: cyanidin, delphinidin, and pelargonidin in the form of 3-O-glucoside (Nikolić et al., 2020; Žilić et al., 2019). The antioxidant properties of these compounds have a positive effect on weight regulation and prevention of diabetes, reducing the risk of various diseases such as atherosclerosis, cancer, diabetes, ischemia, and neurodegenerative disorders (Kim et al., 2012). Products enriched with anthocyanins from black soybean seed coats can have a positive effect on the health of consumers, while the use of soya bean seed coats, a by-product from soya bean processing, additionally valorizes this raw material. Nutritive and health-promoting properties of canned maize products such as sweet maize and baby corn can be improved by enrichment with anthocyanins extracted from black soya bean seed coats.

The aim of this study was to optimize the process of anthocyanin extraction from black soya bean seed in order to further enrich marinated maize products with bioactive compounds and, therefore, enhance their functional properties.



### MATERIAL AND METHODS

Black soya bean genotype Black Tokyo from the Maize Research Institute, Zemun Polje gene bank, and sweet maize genotype ZP 555su were grown in the experimental field in Zemun Polje, Serbia (44°52'N, 20°19'E, 81m asl). The seed coats were dissected manually from black soya beans and ground in a Cyclotec 1093 lab mill (FOSS Tecator, Sweden) (particle size < 500µm). After blanching them for two minutes in boiling water, the sweet maize grains were gently removed by hand from the cobs without damaging the grain surface, and stored in the freezer before use.

Three different anthocyanin extraction procedures with variations have been tested using ground black soya bean seed coats. Extraction parameters were varied in order to optimize the extraction process (Table 1). Extractions of anthocyanins from the ground soya bean seed coat were done with acetic acid (1.6 or 0.8%), with or without the addition of citric acid (0.5 or 1%) or lactic acid (1 or 1.5%). Three different procedures were tested:

1. “Cold“ extraction, at room temperature in a horizontal shaker (MLW Thys 2) for 60 minutes;
2. “Warm” extraction with heating (50°C) on a magnetic stirrer for 60 minutes, and
3. Extraction with ultrasonic treatment in a sonicator (Model: UZ 4P 220/115V; power 100W; Iskra, Slovenia) at frequency 30 kHz, temperature 40 °C, for 30 minutes.

The crude soya bean seed coat extract was centrifuged at 11200 rpm for 5 min and the absorbance was measured from the supernatant. Three days into the marinating process sweet maize grains (0.5 g) were mashed using mortar and pestle, acidified with methanol (6 ml), ultrasonicated for 30 minutes, shaken for 30 minutes, and centrifuged for 3 minutes at 4°C and 7000 rpm. The absorbance of the supernatant was measured at 535 and 700 nm using Agilent 8453 spectrophotometer to detect anthocyanins, which were then calculated using the molar extinction coefficient of 25 965 Abs/M x cm and a molecular weight of 449.2 g/mol and expressed as mg of cyanidin 3-glucoside equivalent (CGE) per kg of dry matter (Abdel-Aal & Hucl, 1999).

### RESULTS AND DISCUSSION

Several procedures with different concentrations of acetic acid, and with or without the addition of different concentrations of citric and lactic acid, shown in *Table 1*, were applied during the experiments of anthocyanins extraction from black soya bean seed coat (*Figure 1*).

*Table 1. Total anthocyanins content and pH values obtained by varying parameters of extraction procedures*

Procedure	pH	Total anthocyanins content in brine (µg CGE/g dm)	Total anthocyanins content in marinated sweet maize grain (µg CGE/g dm)
<i>1.6% acetic acid</i>			
Cold extraction	3.03	3541.90	179.89
Warm extraction	3.03	3766.67	275.79
Ultrasound extraction	3.03	3625.68	156.89
Cold extraction, 0.5% citric acid	2.64	3594.75	189.43
Warm extraction, 0.5% citric acid	2.64	4953.67	279.79
Ultrasound extraction, 0.5% citric acid	2.64	4658.42	211.99
Cold extraction, 1% citric acid	2.31	3933.56	188.47

Warm extraction, 1% citric acid	2.31	4793.50	256.91
Ultrasound extraction, 1% citric acid	2.31	4888.72	212.47
Cold extraction, 1% lactic acid	2.45	3809.55	191.78
Warm extraction, 1% lactic acid	2.45	5387.70	281.33
Ultrasound extraction, 1% lactic acid	2.45	4420.00	212.47
Cold extraction, 1.5% lactic acid	2.40	4194.94	255.87
Warm extraction, 1.5% lactic acid	2.40	5387.70	286.05
Ultrasound extraction, 1.5% lactic acid	2.40	4995.75	237.78
<i>0.8% acetic acid</i>			
Warm extraction, 0.5% citric acid	2.85	3753.89	268.88
Warm extraction, 1% citric acid	2.54	3911.56	243.56
Warm extraction, 1% lactic acid	3.04	4057.42	285.25
Warm extraction, 1.5% lactic acid	2.60	3834.80	256.17



Figure 1. Black soya beans (left) and seed coat (right)

“Warm“ extraction was performed on a magnetic stirrer at a temperature of 50°C for 60 minutes to test the extraction efficiency. “Cold” extraction was performed at room temperature in a horizontal shaker in order to avoid thermal decomposition of bioactive compounds, however, this method of extraction proved to be the least effective. Extraction in an ultrasonic water bath was applied in order to decompose the material, i.e. soya bean seed coat, as quickly as possible, and increase the availability of anthocyanins. Warm extraction proved to be the most suitable for obtaining the highest possible anthocyanin yield, as seen in *Table 1*, and was used in further experiments using lower concentration acetic acid (0.8%) in order to obtain a food product with sensory properties more acceptable for the consumers (adequate pH).

Studies have shown that organic acids such as citric and lactic acid stabilize anthocyanins in solution (Minatel et al., 2017). Although during the process of acidification – i.e. lactic acid fermentation of vegetables such as cabbage, cauliflower or cucumber, lactic acid is synthesized as the primary metabolite of lactic acid bacteria, lactic acid was added to the acidified solution (brine) to better stabilize bioactive compounds (anthocyanins) and thus maintain colors of the final product. The results showed that the process of enrichment of the sweet maize grains with anthocyanins extract was efficient, and the value of the total anthocyanins in the grain ranged from 179.89 and 286.05 µg CGE/g d.m (*Table 1*).

Samples of sweet maize grains that were immersed in the marinating brine with anthocyanins extract changed their color from standard yellow to crimson red, as seen in *Figure 2*.



Figure 2. Samples of sweet maize in anthocyanins extract

### CONCLUSION

Warm extraction has been shown to be the most suitable for higher anthocyanin yields. Even though the highest extracted total anthocyanins content (5387.70  $\mu\text{g}$  CGE/g dm) in the brine used for marination of the sweet maize kernels was achieved with 1.6% acetic acid and 1% lactic acid during the warm extraction conducted at 50°C for 60 minutes, the pH value was quite low (2.45). The more sensory acceptable pH value (3.04) of the brine was achieved by applying 1% lactic acid in 0.8% acetic acid during the warm extraction conducted at 50°C for 60 minutes, and the total anthocyanins content was also high (4057.42  $\mu\text{g}$  CGE/g dm). The studies directed toward the enrichment of maize products with bioactive compounds need to be further expanded and will continue in the near future.

### ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Grant No. 451-03-9/2021-14/200040).

### REFERENCES

1. Abdel-Aal, E.-S.M., Hucl, P. (1999). A Rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*, 76, 350–354.
2. Babić, V., Pavlov, M., Boćanski, J. (2016). Stanje i perspective u oplemenjivačkom sektoru Srbije. *Selekcija i semenarstvo*, 22 (2), 19-27.
3. Kim, H.K., Kim, J.N., Han, S.N., Nam, J.H., Na, H.N., & Ha, T.J. (2012). Black soybean anthocyanins inhibit adipocyte differentiation in 3T3L1 cells. *Nutrition Research*, 32, 770–777.
4. Minatel, I.O. Vanz Borges, C.V., Ferreira, M.I., Gomez, H.A.G., Chen, C-Y. O., Pereira Lima G.P. (2017). Phenolic Compounds: Functional Properties, Impact of Processing and Bioavailability, Chapter 1 In: *Phenolic Compounds - Biological Activity*. <http://dx.doi.org/10.5772/66368>
5. Nikolić, V., Žilić, S., Simić, M., Perić, V. (2020). Black soya bean and black chia seeds as a source of nutrients and bioactive compounds with health benefits. *Food and Feed Research*, 47 (2), 99-107. World Agricultural Production.com (2021). World Corn Production 2020/2021, January 2021. <http://www.worldagriculturalproduction.com/crops/corn.aspx>

6. Žilić, S., Dodig, D., Vančetović, J., Grčić, N., Perić, V., Titan, P., Maksimović, V. (2019). Composition of anthocyanins in colored grains and the relationship of their nonacylated and acylated derivatives. *Polish Journal of Food and Nutrition Science*, 69, 137–146.

## OPTIMIZACIJA PROCESA EKSTRAKCIJE ANTOCIJANA IZ SEMENJAČE CRNE SOJE ZA PRIPREMU FUNKCIONALNE HRANE OD KUKURUZA

*Valentina NIKOLIĆ, Slađana ŽILIC, Marijana SIMIĆ, Vesna PERIĆ,  
Jelena SRDIĆ, Marko VASIĆ*  
*Institut za kukuruz Zemun Polje, Slobodana Bajića 1, 11185 Beograd, Srbija*  
*E-mail: [valentinas@mrizp.rs](mailto:valentinas@mrizp.rs)*

Kukuruz (*Zea Mays* L.) je najznačajnija ratarska kultura u Republici Srbiji, koja se gaji na oko milion hektara godišnje. Soja crnog zrna (*Glycine max*) se vekovima koristila u tradicionalnoj istočnoj medicini za pripremu čajeva i fermetisanih proizvoda visokog antioksidativnog kapaciteta. Semenjača crne soje ima visok sadržaj antocijanina: cijanidina, delfinidina i pelargonidina u obliku 3-O-glukozida. Antioksidativna svojstva ovih jedinjenja pozitivno utiču na regulisanje telesne mase i prevenciju dijabetesa, smanjuju rizik od obolevanja različitim bolestima kao što su ateroskleroza, rak, dijabetes, ishemijska, i neurodegenerativni poremećaji. Proizvodi obogaćeni antocijanima iz semenjače crne soje mogu pozitivno uticati na zdravlje konzumenata, dok se iskorišćenjem sojine semenjače, sporednog proizvoda iz prerade soje, dodatno se valorizuje ova sirovina.

Cilj ovog istraživanja bio je da se optimizuje proces ekstrakcije antocijana iz semenjače crne soje kako bi se konzervisani proizvodi od kukuruza dodatno obogatili bioaktivnim jedinjenjima. U eksperimentima je primenjeno nekoliko postupaka ekstrakcije: topla ekstrakcija uz zagrevanje na magnetnoj mešalici, ekstrakcija sa ultrazvučnim tretmanom, kao i hladna ekstrakcija. U eksperimentima je za ekstrakciju korišćena sirćetna kiselina koncentracije 1,6% i 0,8% uz dodatak mlečne (1 ili 1,5%) i/ili limunske kiseline (0,5 ili 1%) kao stabilizatora. Ekstrakcija uz zagrevanje – „topla“ ekstrakcija vršena je na magnetnoj mešalici na temperaturi od 50°C u trajanju od 60 minuta. Ekstrakcija bez zagrevanja – „hladna“ ekstrakcija, vršena je u tresilici kako bi se izbegla termička razgradnja bioaktivnih jedinjenja, međutim ova metoda ekstrakcije se pokazala kao najmanje efikasna. Ekstrakcija u ultrazvučnom kupatilu je primenjivana kako bi se sojina semenjača što brže razgradila i dostupnost antocijanina povećala. Ekstrakcija sa zagrevanjem se pokazala kao najpogodnija za dobijanje višeg prinosa antocijana. Najviši prinos antocijana uz optimalnu pH vrednost naliva ostvaren je primenom 1% mlečne kiseline u 0,8% sirćetnoj kiselini tokom „tople“ ekstrakcije (50°C, 1 h).

Ispitivana je mogućnost obojenja zrna kukuruza šećerca ekstraktom antocijanina. S obzirom da su nalivi sa limunskom kiselinom posle izvesnog vremena postajali zamućeni (opalescentni), u nastavku istraživanja korišćena je mlečna kiselina kao stabilizator antocijana. U zavisnosti od uslova ekstrakcije, spektrofotometrijski određen sadržaj antocijana u rastvoru varirao je od 3541,90 do 5387,70 µg CGE/g s.m., a u mariniranom zrnju kukuruza između 179,89 i 286,05 µg CGE/g s.m. Nakon sedam dana sadržaj antocijanina u zrnju nije značajno rastao, te je ovo vreme odležavanja odabrano kao optimalno za mariniranje proizvoda od kukuruza.

**Ključne reči:** crna soja, antocijani, kukuruz, funkcionalna hrana

## FIZIČKOHEMIJSKE OSOBINE HIDROČAĐI PROIZVEDENE OD POLJOPRIVREDNE BIOMASE

Ivan PAVKOV<sup>1</sup>, Milivoj RADOJČIN<sup>1</sup>, Siniša BIKIĆ<sup>2</sup>, Milan TOMIĆ<sup>1</sup>, Maša BUKUROV<sup>2</sup>, Krstan KEŠELJ<sup>1</sup>,  
Bojana DESPOTOVIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad,

<sup>2</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad,

E-mail: [ivan.pavkov@polj.uns.ac.rs](mailto:ivan.pavkov@polj.uns.ac.rs)

### APSTRAKT

U radu su prikazani rezultati hidrotermalne karbonizacije (HTC) biomase sedam poljoprivrednih kultura koje se koriste kao biogorivo: pšenična (PS) i sojina slama (BS), kukuruzna kočanka (KK), kukuruzna (KS) i suncokretova stabljika (SS), ljuska oraha (LO) i lešnika (LL). Postupak HTC istraživan je na temperaturama reakcije 200°C (HTC-200) i 250°C (HTC-250), na pritisaku 8,0 MPa i 120 minuta trajanja procesa. Obavljena je karakterizacija suve hidročađi. Postupak HTC uticao je na porast ugljenika (C), 17,03±3,45% (HTC -200), 33,43±3,21% (HTC-250) i smanjenje kiseonika (O) 24,04±5,73% (HTC -200), 64,51±9,06% (HTC-250) i u manjoj meri vodonika (H). Unapređen atomski odnos H:C i O:C koji je sličan tresetu (HTC-200) i lignitu (HTC-250). Povećana je gornja toplotna moći (Hg) hidročađi u odnosu na sirovinu (17,94-29,99 MJ). Proces HTC uticao je na porast udeo pepela i nasipne gustine (189,4-276,07 kg/m<sup>3</sup>). Na nižoj temperaturi procesa dobijen je veći prinos mase hidročađi 55,74±4,35 (HTC-200), 38,24±7,41 (HTC-250). Veći prinos energije (EY) zavisio je od sirovine, za PS (68,48 %), KK (70,89 %), KS (71,38 %) i SS (49,87%) ostvaren je pri HTC-200, a za BS (56,13 %), LO (74,41 %) i LL (81,27 %) pri HTC-250. Za dobijanje suve hidročađi potrebno je uložiti ≈ 2199,93±45,52 kJ/kg<sub>biomase</sub> toplotne energije. Hidročađ je po svojoj elementarnoj kompoziciji i toplotnoj moći unapređena je u odnosu na sirovinu, ima potencijal da se koristi u postrojenjima za sagorevanje ugljene prašine.

**Ključne reči:** hidrotermalna karbonizacija, hidročađ, biomasa, energija

### UVOD

Lignocelulozna biomasa predstavlja značajan energetski potencijal Republike Srbije i učestvuje sa 61% (3,448 miliona *ten* - tona ekvivalent nafte) u ukupnom potencijalu obnovljivih izvora energije koji je 5,65 miliona *ten* zajedno sa energijom vetra, hidroenergijom, energijom sunca i geotermalnom. Prema kategorijama: lignocelulozna poljoprivredna biomasa (LPB), gde spadaju ostaci u ratarstvu, voćarstvu, vinogradarstvu i primarnoj preradi voća učestvuje sa 1,67 milona *ten* (48,43%); drvena biomasa 1,53 milona *ten* (44,37%) i biorazgradivi otpad, osim komunalnog, sa 205 hiljada *ten* (5,94%) (Strategija razvoja energetike Republike Srbije, 2015). Republika Srbija, kandidat je za priljučenje EU, prema european statistic do 2019 postigla je udeo u korišćenju obnovljivih izvora energije od 21,4% u bruto finalnoj potrošnji (Renewable energy sources, 2020).

Toplotna energija dobijena iz LPB je jeftinija od 28% do 34% u odnosu na energiju dobijenu iz uglja. Pored pozitivnog ekonomskog bilansa, energetski potencijal LPB iskorišćen je manje od 1%, dok se biomasa od drveta koristi 66,73% od raspoložive količine. Najveći deo LPB se sagoreva na parcelama i zaorava. Takva praksa, osim gubitka sirovine, prouzrokuje brojne negativne posledice na životnu sredinu, uništenje humusa i mikroorganizama u zemljištu kao i zagađenje vazduha (Zekić et al., 2010; Dodić et al., 2012; 2011).

Energetska vrednost LPB zavisi od sadržaja vlage, prema literaturnim izvorima (Osman et al., 2017) kreće se od 15.700 do 18.200 kJ/kg (gornja toplotna moć - HHV) za sadržaj vlage 10 %<sub>w.b.</sub>. U stvarnim uslovima proizvodnje sadržaj vlage je viši, za slamu vrednost je od 10 %<sub>w.b.</sub> do 15 %<sub>w.b.</sub>, a za stabljiku kukuruza do 48%<sub>w.b.</sub> što važi i za stabljiku suncokreta [8]. Termohemijski proces koji se naziva hidrotermalna karbonizacija (HTC) koji prevazilazi problem povišene vlažnosti sirovine, čak naprotiv, voda se koristi kao medijum za hidrotermalnu reakciju. S obzirom da tehnika zahteva visoko prisustvo vode pogodna za iskorišćenje energije iz visoko vlažnih sirovina (>15%<sub>w.b.</sub>) kao što su: otpad od hrane, biomasa, kanalizacioni mulj, industrijski otpad (Li et al., 2020, Ischia et al., 2021).

U ovoj studiji, biomasa sedam različitih poljoprivrednih kultura posle žetve iskorištena je kao sirovina za HTC, pšenična i sojina slama, kočanka i stabljika kukuruza, stabljika suncokreta, ljuska oraha i lešnika. Sirovine su različitog hemijskog sastava što je rezultiralo različitim osobinama u dobijenoj hidročađi. U literaturi mogu se pronaći podaci o karakterizaciji hidročađi dobijene od pšenične slame i silaže kukuruza (stabljika i kočanka zajedno), dok za ostale koje su obuhvaćene radom nema podataka. Cilj rada je karakterizacija suve hidročađi u zavisnosti od temperature reakcije, a zatim poređenje u odnosu na početnu sirovinu preko: HHV, atomskog odnosa H/C i O/C, sadržaja pepela i nasipne gustine. U radu je urađena procena energetske (toplotne) zahteva za dobijanje suve hidročađi. Rezultati ove studije su primenljivi za praktično rešavanje valorizacije poljoprivredne biomase i ekonomska istraživanja.

### MATERIJAL I METOD RADA

Materijal korišćen u eksperimentu su ostaci iz ratarske i voćarske poljoprivredne proizvodnje: pšenična slama (PS), kočanka kukuruza (KK), stabljika kukuruza (SK), stabljika suncokreta (SS), sojina slama (BS), ljuska oraha (LO) i lešnika (LL). Materijal je prikupljen neposredno posle žetve u opštini Kikinda (45°85' N and 20°46' E, 73 m a.s.l.), Srbija. Zapakovan u poletilenske vreće, a zatim čuvan do obrade u rashladnoj komori na temperature 4 °C i relativnoj vlažnosti vazduha 60 %.

Prikupljeni materijal je prvo isečen na dimenzije 10 - 30 mm pomoću metalnog sečiva, a LO i LL izdrobljen je u laboratorijskom avanu. Zatim je samleven na laboratorijskom mlinu (CT 193, Cyclotec; FOSS, Hilleroed, Denmark), sa sitom 0,5 mm. Samlevni materijal je prosejan pomoću sieve shaker (AS 220, Retsch GmbH, Haan, Germany) u vremenstom trajanju od 3 minuta i amplitudom 80 % (2,4 mm). Izdvojena je frakcija < 200 μm koja je dalje korišćena u eksperimentu.

Hidrotermalna karbonizacija je obavljena u "batch" reaktoru (Parr 4520, Moline, Illinois USA) zapremine 2 dm<sup>3</sup>. Reaktor je opremljen sa električnim grejačem i mešačem koji su kontrolisani sa mikroprocesorskom kontrolnom jedinicom Parr 4842 (Tomić et al; 2020).

U batch reaktor postavljano je 100 g materijala i 400 g destilovane vode, zatim je reaktor hermetički zatvoren, a preostali kiseonik je uklonjen pomoću azota. Masa je zagrevana do zadate temperature (sa tolerancijom ±2°C) i pritisak unutar reakcione posude je povećavan do zadate vrednosti uvođenjem azota 99% čistoće (Messer Tehnogas A.D., Novi Sad, Srbija). Eksperiment je obavljen na dve temperature reakcije 200°C (HTC-200) i 250°C (HTC-250), pritisak 8,0 MPa, vreme reakcije 120 minuta, broj obrtaja mešača 670 min<sup>-1</sup>, masena koncentracija suve materije u reakcionoj posudi 18,17±0,264%. Po isteku zadatog vremena, reaktor je hlađen vodom. Kada se temperatura mešavine čvrste i tečne komponente unutar reaktora snizila na 30°C, otvoren je ventil za regulaciju pritiska i mešavina je izuzeta iz reakcione posude.

Mešavina čvrste i tečne komponente posle izuzimanja iz reakcione posude podvrgnuta je filtriranju, izdvajanju procesne vode iz vlažne hidročađi. Filtriranje je obavljeno gravitaciono pomoću kružnog filter papira, 20 μm, φ110 mm, (589<sup>2</sup> white ribbon ashelss, Schleicher & Schuell; Dassel, Germany) potpomognuto vakuum pumpom. Filter pogača (vlažna hidročađ) je sušena do suve materije 24h na

105±2 °C u sušnici (Sterimatic, ST-11, Instrumentaria, Zagreb, Croatia). Suva hidročađ je bila predmet daljih analiza.

Masa sirovog materijala, vlažne i suve hidročađi merena je analitičkom vagom (0–200 g, 0,01 g ±0,02 g, Kern, 440-33 N, Balingen, Germany). Sadržaj vlage sirovog materijala, vlažne hidročađi i suve hidročađi određen je sušenjem uzoraka na 105°C u sušnici (Sterimatic, ST-11, Instrumentaria, Zagreb, Croatia) do konstantne mase (Standard za određivanje vlažnosti).

Određivanje sadržaja pepela (Ash, %<sub>d.b.</sub>) u sirovom materijalu i hidročađi urađeno je na uzorku od 5 g koji je zagrevan na 550±20 °C u peći za žarenje (PŽ-A, Vims Elektrik, Elektrik Srbija) u trajanju od 5 h do potpuno bele boje. Razlika mase pre i posle žarenja predstavlja sadržaj pepela (SRPS EN ISO 21656:2021).

Nasipna gustina ( $\rho_b$ , kg/m<sup>3</sup>) je merena pomoću cilindra poznate zapremine (100 cm<sup>3</sup>). Masa cilindra i suve hidročađi merena je analitičkom vagom (0–200 g, 0,01 g ±0,02 g, Kern, 440-33 N, Balingen, Germany).

Analiza hemiskog sastava obavljena je na Vario Macro Cube Organic Elemental Analyzer (Elementar Analysensysteme GmbH., Langensfeld, Germany). Analizator je omogućio merenje sadržaja ugljenika (C), vodonika (H), azota (N) i sumpora (S) a sadržaj kiseonika je određen preko formule (1):

$$O\% = 100\% - C\% - H\% - N\% - S\% - \text{Ash}\% \quad [1]$$

Gornja toplotna moć (Hg) određena je pomoću kalorimetrijske bombe IKA C 200 (IKA Works, Wilmington, NC, USA) a donja toplotna moć (Hd) je izračunavana prema standard EN ISO 18125:2017 (Solid biofuels - Determination of calorific value).

Poznavanjem mase sirovog materijala i Hg upotrebijene su sledeće jednačine za izračunavanje masenog prinosa (MY), odnos gustine energije (EDR) i prinos energije (EY) (Zhang et al., 2018):

$$MY(\%) = \frac{\text{masa suve hidročađi}}{\text{masa materijala}} \cdot 100 \quad [2]$$

$$EDR(-) = \frac{Hg \text{ hidročađi}}{Hg \text{ materijala}} \quad [3]$$

$$EY(\%) = MY \cdot EDR \quad [4]$$

Razmatranje utoška energije obuhvata: energiju neophodnu za zagrevanje reaktora do eksperimentalne temperature HTC, sa pretposavkom da se u reaktoru voda zagreva blizu linije zasićenja i energiju potrebnu za sušenje posle filtriranja do suve hidročađi. Energija neophodna za odvajanje tečne faze (procesne vode) od hidročađi u postupku mehaničkog filtriranja zanemarljiva je u odnosu na energiju potrebnu za HTC i sušenje, izuzeta je iz razmatranja. Takođe, energija uložena za zagrevanje suve materije tokom HTC i sušenja smatraće se zanemarljivom u odnosu na energiju potrebnu za isparavanje vode i biće izuzeta iz razmatranja (Benavente et al., 2015).

Ukupna energija za dobijanje suve hidročađi ( $E_{ukupno}$ ), jednačina (5) izračunata je sabiranjem energije potrebne za hidrotremalnu karbonizaciju ( $E_{HTC}$ ), jednačina (6) i energije za sušenje vlažne hidročađi ( $E_{sušenje}$ ) jednačini (10) (Benavente et al., 2015):

$$E_{ukupno} = E_{HTC} + E_{sušenje} \quad [5]$$

$$E_{HTC} = m_1 \cdot (H_2 - H_1) \quad [6]$$

gde je  $m_1$  - ukupna masa vode u reaktoru (masa vode u sirovini i destilovane vode);  $H_1$  - entalpija vode na 20 °C i pritisku 1,01325 MPa, što je 84 kJ/kg; dodata u reaktor;  $H_2$  – entalpija vode na uslovima



reakcije u reaktoru, pritisak 8,0 MPa, temperatura 200 °C i 250 °C, 855 kJ/kg i 1092 kJ/kg, respektabilno.

$$E_{sušenje} = m_2 \cdot \left[ \int_{20}^{100} c_p(T) dT + \Delta H_{vap} \right] \quad [7]$$

gde je  $m_2$  - masa vode u vlažnoj hidročađi,  $c_p(T)$  – specifična toplota vode u funkciji od temperature,  $\Delta H_{vap}$  – entalpija vodene pare na 100 °C i 1,01325 MPa, 2257 kJ/kg.

## REZULTATI I DISKUSIJA

U tabeli 1 prikazani su analize sirovog materijala i hidročađi. Evidentno je da primenom HTC postupka kod svih uzoraka porastao je udeo elementarnog ugljenika (C) i smanjenje udela elementarnog kiseonika (O) kao i ostalih elemenata (N, C i S).

Table 1. Rezultati elementarne analize i nasipne gustine

Materijal	Tretman	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	H:C	O:C	Pepeo (% <sub>d.b.</sub> )	$\rho_{d.b.}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Pšenična slama (PS)	Sirovo	43,83	10,33	0,66	0,102	40,07	2.357	0.914	5,01	202,12*
	HTC – 200	51,38	9,36	0,82	0,059	29,328	1.822	0.571	9,05	189,4
	HTC – 250	66,04	8,85	1,33	0,094	11,469	1.340	0.174	12,28	196,02
Kukuruzna kočanka (KK)	Sirovo	46,21	10,75	0,42	0,050	41,217	2.326	0.892	1,35	412,65*
	HTC – 200	57,85	9,73	0,51	0,069	31,031	1.682	0.536	0,80	238,76
	HTC – 250	73,30	8,57	0,73	0,055	15,741	1.169	0.215	1,65	276,07
Stabljika kukuruza (SK)	Sirovo	45,04	10,46	0,76	0,098	38,842	2.322	0.862	4,80	260,83*
	HTC – 200	53,79	9,62	1,06	0,087	29,321	1.788	0.545	6,12	230,37
	HTC – 250	67,22	8,99	1,59	0,120	9,948	1.337	0.148	12,13	235,0
Stabljika suncokreta (SS)	Sirovo	45,20	10,70	0,41	0,090	40,697	2.367	0.900	2,90	243,69*
	HTC – 200	54,08	9,66	0,56	0,0055	31,358	1.786	0.580	4,33	210,38
	HTC – 250	70,08	9,23	0,79	0,071	12,67	1.317	0.181	7,16	235,2
Sojina Slama (BS)	Sirovo	45,68	10,76	0,51	0,147	39,778	2.356	0.871	3,16	313,7*
	HTC – 200	59,36	10,04	0,74	0,060	26,724	1.691	0.450	3,08	207,94
	HTC – 250	71,92	9,92	0,88	0,108	11,886	1.379	0.165	5,29	229,2
Ljuska oraha (LO)	Sirovo	50,83	11,08	0,45	1,31	35,884	2.180	0.706	0,45	370,72*
	HTC – 200	58,26	10,12	0,37	0,033	31,019	1.737	0.532	0,19	219,76
	HTC – 250	71,35	8,97	0,46	0,015	16,588	1.257	0.232	2,68	245,59
Ljuska lešnika (LL)	Sirovo	50,12	11,08	0,23	0,361	37,469	2.211	0.748	0,74	555,40*
	HTC – 200	59,63	10,86	0,42	0,036	28,86	1.821	0.484	0,19	226,49
	HTC – 250	71,30	8,75	0,53	0,029	18,265	1.227	0.256	1,13	249,71

\* - Nasipna gustina mlevene sirovine < 200  $\mu$ m

Sa povišenjem temperature HTC dolazi do smanjenja odnosa H : C i O : C. HTC proces u nekoj meri oponaša prirodno stvaranje uglja, ugljefikaciju, uklanjanjem kiseonika i vodonika iz biomase što za rezultat ima povećanje sadržaja elementarnog ugljenika i tranzicija hidročađi iz oblasti biomase prema oblasti treseta i lignita. Hidročađ svih istraživanih sirovina dobijena iz procesa HTC-200 približava se karakteristikama treseta, a iz HTC – 250 ima karakteristike lignita. Region uglja počine pri odnosu O:C i H:C, 0,23 i 0,9, respektabilno. Slične rezultate su prijavili autori za pšeničnu slamu (Shojaeiarani et al., 2019), kukuruzni oklasak (Tippayawong, 2019). Povećanje sadržaja ugljenika i smanjenje kiseonika nastaje zbog sušenja materijala pod uticajem pregrejane vodene pare u reaktoru, kao i reakcijama dekarboksilacije koje se dešavaju na povišenim temperaturama. Niži atomski odnos H : C i O : C obezbeđuje manju emisiju, nižu vlažnost i manje toplotne gubitke tokom procesa sagorevanja goriva.

Rezultati merenja gornje i donje toplotna moći su prikazane u Tabeli 2. Evidentno je da sa povišenjem temperature reakcije dolazi do povećanja vrednosti Hd i Hg. Najveće povećanje Hg od 44,51% u odnosu na sirovinu zabeleženo je kod BS (HTC-250), 29746 kJ/kg, a najmanje 10,16% kod SS (HTC – 200). U proseku povećanje vrednosti Hg u odnosu na sirovinu za HTC - 250 iznosilo je  $37,65 \pm 5.21\%$  i  $15,15 \pm 4.67\%$  za HTC-200.

Prinos mase (MY) opada sa porastom temperature reakcije, kod svih eksperimenata veći prinos mase zabeležen je pri nižoj temperature, HTC – 200. MY se kretao od 31,14% (BS, HTC – 2500) do 62,86% (LO, HTC – 200). Energy densification ratio (EDR) raste sa porastom temperature reakcije, od 1,11 do 1,21 za HTC – 200 i od 1,37 – 1,80 za HTC - 250. Uticaj temperature reakcije na EY zavisi od sirovine. Za PS, KK, KS SS ostvren je veći EY pri nižoj temperature reakcije od 44,52% do 71,38%. Kod eksperimenata BS i LO neznatno je veći prinos energije na višoj temperature reakcije, dok je kod eksperimenata LS prinos energije značajnije veći. Najmanji prinos energije ostvaren je kod SS, 44,52% (HTC-250).

*Tabela 2. Gornja (Hg) i donja toplotna moć (Hd), prinos mase (MY), odnos gustina energije (EDR) i prinos energije (EY)*

Materijal	Tretman	Hg (MJ)	Hd (MJ)	MY (%)	EDR (-)	EY (%)
Pšenična slama (PS)	Sirovo	16,82	14,28	-	-	-
	HTC – 200	20,19	18,05	57,03	1,20	68,48
	HTC – 250	26,90	24,88	35,93	1,60	57,47
Kukuruzna kočanka (KK)	Sirovo	17,51	14,92	-	-	-
	HTC – 200	21,81	19,58	56,93	1,25	70,89
	HTC – 250	29,18	27,22	39,88	1,67	66,44
Stabljika kukuruza (SK)	Sirovo	16,09	13,54	-	-	-
	HTC – 200	20,75	18,56	55,33	1,29	71,38
	HTC – 250	25,79	23,72	32,39	1,60	51,91
Stabljika suncokreta (SS)	Sirovo	16,12	13,49	-	-	-
	HTC – 200	17,94	15,74	55,52	1,11	61,81
	HTC – 250	22,15	20,04	32,39	1,37	44,52
Sojina Slama (BS)	Sirovo	16,51	13,85	-	-	-
	HTC – 200	18,74	16,45	48,11	1,14	54,62
	HTC – 250	29,74	27,48	31,14	1,80	56,13
Ljuska oraha (LO)	Sirovo	19,51	16,87	-	-	-
	HTC – 200	22,74	20,43	62,86	1,17	73,29
	HTC – 250	32,03	29,99	45,31	1,64	74,41
Ljuska lešnika (LL)	Sirovo	19,57	16,89	-	-	-
	HTC – 200	21,95	19,47	54,40	1,12	61,03
	HTC – 250	31,42	29,41	50,63	1,61	81,27

U tabeli 3 prikazani su rezultati sadržaja vlage za sirovinu, vlažnu i suhu hidročađ. Na osnovu rezultata, primetno je da razdavanje hidročađi od procesne vode filtriranjem je efikasnije kod HTC–250. Pa tako srednja vrednost vlažnosti za sve sirovine iznosila je  $2.842 \pm 0.302$  kgH<sub>2</sub>O/kgd.m i  $4.409 \pm 0.342$  kgH<sub>2</sub>O/kgd.m. za HTC–200. Slične rezultate prijavili su atori za HTC industrijskog otpada, maslinove pogače (Benavente et al., 2015). Vlažna hidročađ je posle filtriranja sušena do vlažnosti  $0.012 \pm 0.0027$  kgH<sub>2</sub>O/kgd.m, srednja vrednost za sve uzorke. Karakteristična odlika suve hidročađi je da lako drobi u praškasto stanje na blagi pritisak prstiju.

Tabela 3. Sadržaj vlage hidročađi posle filtriranja ( $X_0$ ), vlažnost suve hidročađi ( $X_1$ ), energetske potrebe za HTC ( $E_{HTC}$ ), energetske potrebe za sušenje ( $E_{sušenje}$ ) i totalna energija neophodna za proizvodnju ( $E_{ukupno}$ )

Materijal	Tretman	$X_0$ (kgH <sub>2</sub> O /kgs.m.)	$X_1$ (kgH <sub>2</sub> O /kgs.m.)	$E_{HTC}$ (kJ/kg biomase)	$E_{sušenje}$ (kJ/kg biomase)	$E_{ukupno}$ (kJ/kg biomase)
Pšenična slama (PS)	Sirovo	0,091	-	-	-	-
	HTC – 200	4,402	0,016	372,62	1868,57	2241,19
	HTC – 250	3,114	0,012	487,17	1728,02	2215,19
Kukuruzna kočanka (KK)	Sirovo	0,075	-	-	-	-
	HTC – 200	4,663	0,014	361,91	1883,85	2245,75
	HTC – 250	2,799	0,010	473,16	1679,25	2152,40
Stabljika kukuruza (SK)	Sirovo	0,085	-	-	-	-
	HTC – 200	4,053	0,012	369,08	1832,88	2201,96
	HTC – 250	2,943	0,018	482,53	1714,46	2196,99
Stabljika suncokreta (SS)	Sirovo	0,094	-	-	-	-
	HTC – 200	3,953	0,008	374,47	1815,47	2189,95
	HTC – 250	2,313	0,011	489,59	1593,69	2083,27
Sojina Slama (BS)	Sirovo	0,100	-	-	-	-
	HTC – 200	4,593	0,009	378,72	1870,09	2248,81
	HTC – 250	2,807	0,012	495,13	1684,81	2179,94
Ljuska oraha (LO)	Sirovo	0,061	-	-	-	-
	HTC – 200	4,914	0,012	352,42	1897,93	2250,35
	HTC – 250	3,272	0,009	460,76	1744,69	2205,44
Ljuska lešnika (LL)	Sirovo	0,081	-	-	-	-
	HTC – 200	4,288	0,014	365,99	1855,06	2221,05
	HTC – 250	2,808	0,014	478,50	1688,29	2166,78

Za dobijanje suve hidročađi pogodne za dalju upotrebu potrebno je u proseku uložiti ukupnu toplotnu energiju  $E_{ukupno} \approx 2199,93 \pm 45,51$  kJ/kg<sub>biomase</sub> (tabela 3). U procesu HTC sa porastom temperature procesa i mase vode u reaktoru raste potrebna energija ( $E_{HTC}$ ). Pa tako za HTC-250 potrebno je uložiti od  $480,97 \pm 11,48$  kJ/kg<sub>biomase</sub>, a za HTC-200,  $367,89 \pm 8,78$  kJ/kg<sub>biomase</sub>. Manji sadržaj vlage ( $X_0$ ) u filter pogači dobijen u postupku HTC-250 smanjuje  $E_{sušenje}$  gde je u proseku potrebno izdvojiti  $1690,46 \pm 49,08$  kJ/kg<sub>biomase</sub>, dok za postupak HTC-200 potrebno je izdvojiti  $1860,55 \pm 28,64$  kJ/kg<sub>biomase</sub>. Za dobijanje suve hidročađi potrebno je uložiti manje toplotne energije u procesu HTC-250, u proseku  $E_{ukupno} \approx 57,01 \pm 34,55$  kJ/kg<sub>biomase</sub> u odnosu na HTC-200. Proces sušenja je energetski najzahtevniji, povećanjem efikasnosti mehaničkog razdvajanja vlažne hidročađi od procesne vode, direktno se utiče na smanjenje  $E_{Drying}$ , a samim tim i na  $E_{Total}$ .

### ZAKLJUČAK

Primenjeni postupak hidrotermalne karbonizacije na temperaturama reakcije 200 °C i 250 °C uticao je na dobijanje hidročađi boljih karakteristika kao goriva od sirovine, pšenična (PS) i sojina slama (BS), kočanka kukuruza (KK), kukuruzna (KS) i suncokretova stabljika (SS), ljuska oraha (LO) i lešnika (LL). Na višoj temperaturi reakcije sirovina je više karbonizovala, povećan je sadržaj ugljenika, a smanjen sadržaj kiseonika i vodonika. Atomski odnos O:C i H:C približio se karakteristikama treseta (200 °C) i lignita (250 °C). Povećana je gornja toplotna moć i nasipna gustina kao i udeo pepela na višoj temperaturi reakcije, što je negativno. Prinos mase i energije hidročađi zavisi od sirovine i temperature reakcije, bolji odnos je ostvaren za PS, KK, KS, SS na nižoj temperaturi, a za BS, LO i LL na višoj.

Toplotna energija neophodna za dobijanje suve hidročadi približno je jednaka za obe temperature  $\approx 2199,93 \pm 45,52$  kJ/kg<sub>biomase</sub>. Dobijena hidročađ, po svojoj toplotnoj moći i elementarnoj kompoziciji, ima potencijal da se koristi u postrojenjima za sagorevanje ugljene prašine.

### ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat istraživanja na projektu “Research and development of ionic bio fluids - RIDIBF” koji se realizuje u okviru Programa za izvrsne projekte mladih istraživača - PROMIS finansiranog od strane Fonda za nauku Republike Srbije.

### LITERATURA

1. Benavente, V., Calabuig, E., Fullana, A. Upgrading of moist agro-industrial wastes by hydrothermal carbonization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2015, 113, 89-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2014.11.004>
2. Dodić, N.S.; Zekić, N.V.; Rodić, O.V.; Tica, Lj.N.; Dodić, M.J.; Popov, D.S. The economic effects of energy exploitation of straw in Vojvodina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012, 16, 397-403. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.011>
3. Dodić, N.S.; Zekić, N.V.; Rodić, O.V.; Tica, Lj.N.; Dodić, M.J.; Popov, D.S. Analysis of energetic exploitation of straw in Vojvodina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, 15, 1147-1151. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.011>
4. EN ISO 18125:2017 (Čvrsta biogoriva – Određivanje kalorijske vrednosti)
5. Ischia, G., Fiori, L. Hydrothermal carbonization of organic waste and biomass: A review on Process, Reactor, ND Plant Modeling. *Waste and Biomass Valorization* 2021, 12, 2797-2824. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01255-3>
6. Li, L., Flora, R.V.J., Berge, D.N. Predictions of energy recovery from hydrochar generated from the hydrothermal carbonization of organic wastes. *Renewable Energy* 2020, 145, 1883-1889. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.103>
7. Osman, I. A., Abdelkader, A., Christopher, R.J., Morgan, K., Rooney, W.D. Thermal investigation and kinetic modeling of lignocellulosic biomass combustion for energy production and other applications. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2017, 56, 12119-12130. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03478>
8. Renewable energy sources in the EU [Internet]. 2020a [Accessed 16 August 2021]]. Available from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>
9. Shojaeiarani, J., Bajwa, S.D., Bajwa, G.S. Properties of densified solid biofuels in relation to chemical composition, moisture content, and bulk density of the biomass. *BioResources* 2019, 14(2), 4996-5015.
10. SRPS EN ISO 21656:2021.
11. Standard za određivanje vlažnosti
12. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025 sa projekcijom do 2030. godine, Official Gazette of the Republic of Serbia, No 101, 08.december 2015. 10. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/skupstina/ostalo/2015/101/1/reg.20July2020>
13. Tippayawong, N., Kantakanit, P., Koonaphapdeelert, S. Characterization of hydrochar from hydrothermal carbonization of maize residues. The 6<sup>th</sup> International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2019), September 20-23, 2019, Okinawa, Japan. *Energy Reports* 2020, 6, 114-118. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.050>
14. Tomić, M., Ljubojević, M., Mičić, R., Simikić, M., Dulić, J., Narandžić, T., Čukanović, J., Sentić, I., Dedović, N. Oil from *Koelreuteria paniculata* Laxm. 1772 as possible feedstock f, or biodiesel production, *Fuel*, 2020, 277, 118162
15. Zekić, V.; Rodić, V.; Jovanović, M. Potential and economic viability of small grain residue use as a source of energy in Serbia. *Biomass and Bioenergy* 2010, 3, 1789-1795. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.012>

16. Zhang, B., Heidari, M., Regmi, B., Salaudeen, S., Arku, P., Thimmannagari, M., Dutta, A. Hydrothermal carbonization of fruit wastes: A promising technique for generating hydrochar. *Energies* 2018, 11, 2022. <https://doi.org/10.3390/en11082022>

## PHYSIOCHEMICAL PROPERTIES OF HYDROCHAR PRODUCED FROM AGRICULTURAL BIOMASS

Ivan PAVKOV<sup>1</sup>, Milivoj RADOJČIN<sup>1</sup>, Siniša BIKIĆ<sup>2</sup>, Milan TOMIĆ<sup>1</sup>, Maša BUKUROV<sup>2</sup>, Krstan KEŠELJ<sup>1</sup>, Bojana DESPOTOVIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Agriculture, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 8, 21000 Novi Sad, Serbia;

<sup>2</sup>Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia;

E-mail: [ivan.pavkov@polj.uns.ac.rs](mailto:ivan.pavkov@polj.uns.ac.rs)

In this study, the biomass of seven different crops was used as feedstock in hydrothermal carbonization (HTC) to produce hydrochar: wheat straw, soybean straw, corn cob, corn stalks, sunflower stalks, walnut and hazelnuts shells. The feedstock differed in its chemical composition, which resulted in different properties of the obtained hydrochar. Literature offers hydrochar characteristics obtained from wheat straw and corn silage (stalks and cobs together); however, no data can be found on the rest of the mentioned raw materials. The objective of this paper was to determine physiochemical properties of dry hydrochars based on the reaction temperature, and then to compare them with the initial raw material based on the HHV, atomic ratios H/C and O/C, ash content, bulk density, and color. The paper also evaluates the energy (heat) requirements for obtaining dry hydrochars. The results of this study are applicable as a practical solution for the valorization of agricultural biomass and economic research.

The hydrothermal carbonization process was investigated at 200 °C and 250 °C reaction temperatures, a pressure of 8.0 MPa, and 120 minutes of process duration. The obtained dry hydrochar was characterized. Hydrochars which, as a fuel, proved to have better characteristics compared to the used feedstock: wheat straw (WS), soybean straw (BS), corn cob (CC), corn stalk (CS), sunflower stalk (SS), walnut shell (HS), and hazelnut shell (LS). The feedstock carbonized more at higher reaction temperature, the carbon content also increased, and the oxygen and hydrogen contents decreased. The atomic ratios O/C and H/C approached the characteristics of peat (at 200 °C) and lignite (at 250 °C). The higher heating value and bulk density increased, as well as the share of ash at higher reaction temperature, which is the downside. The yield of mass and energy of hydrochar depends on the raw material and the reaction temperature: a better ratio was achieved with WS, CC, CS, SS at a lower temperature, and with BS, HS and LS at a higher temperature. The temperature of the process affected the color of the hydrocarbon, which is brown lignocellulosic (200 °C) and dark brown turning into charcoal black (250 °C). The thermal energy required to obtain dry hydrochar is approximately equal for both temperatures  $\approx 2199.93 \pm 45.52$  kJ/kg<sub>biomass</sub>. The obtained hydrochar, according to its heating value and elemental composition, has the potential to be used in coal dust combustion plants.

**Keywords:** hydrothermal carbonization, hydrochar, biomass, energy.

## TREND ANALYSIS IN 1000 SEED WEIGHT TESTING USING A COUNTER

Tanja PETROVIĆ, Jasna VUJINOVIĆ, Marija MILIVOJEVIĆ, Dragana BRANKOVIĆ-RADOJČIĆ,  
Radmila VUKADINOVIĆ

Maize Research Institute Zemun Polje, Slobodana Bajića 1, 11185, Zemun, Belgrade, Serbia  
E-mail: [ptanja@mrizp.rs](mailto:ptanja@mrizp.rs)

### ABSTRACT

Accuracy and random selection of seeds when testing the 1000 seeds weight in the laboratory is of great importance in order to ensure the representativeness of the sample and precise information for further packaging process. The aim of this research was to check whether the laboratory seed counter selects seeds by shape and size and whether there is a trend during operation at maximum and reduced speed. Ten species of different seed sizes were used. Ten replicates of 100 seeds were counted by counter, the number of seeds was manually checked and the weight measured. The analysis of the obtained results showed that the counter is precise, but weight results showed selection of smaller seeds (*Capsicum annuum* and *Glycine max*) at maximum counting speed. Trend of larger seed selection was observed in *Medicago sativa* and pelleted *Beta vulgaris*. Slower counting (50% of the maximum speed), ensured precise counting without trends.

**Keywords:** trend, 1000 seed weight, seed counter

### INTRODUCTION

Monitoring and control of laboratory equipment is one of the requirements of accreditation standards for seed testing laboratories (SRPS ISO/IEC 17025, 2017; ISTA 2018). The period and method of control depends on the frequency of use of the equipment, its age, etc. In Seed Testing Laboratory of the Maize Research Institute Zemun Polje, seed counter is used to speed up the testing of 1000 seeds weight, and its counting accuracy is regularly checked once a year. However, in the practice so far, no attention has been paid whether the seed selection occurs during the operation of the counter. Accuracy and random selection of seeds when testing the 1000 seeds weight in the laboratory is of great importance in order to ensure the representativeness of the sample and precise information for further packaging process. Thousand seed weight is very important seed quality parameter and is often included in seed research projects (Tabakovic et al., 2021; Wu et al., 2018). According to the ISTA Rules (2022) 1000 seed weight can be determined by two methods: by counting the whole fraction of pure seed and by counting replications of 100 seeds. In both cases, the counting can be performed manually or by counter. Different apparatus can be used for obtaining working sample for 1000 seed weight. When 100 seed replicates are counted they are afterwards used for germination testing. So imprecise counting, and selection of lighter/heavier seed will be reflected in germination test also. The aim of this research was to check whether the laboratory seed counter tendentiously selects seeds by shape and size and whether there is a trend during operation at maximum and reduced speed.

### MATERIAL AND METHOD

Ten species of different seed sizes (*Capsicum annuum*, pelleted seed *Beta vulgaris*, *Brassica napus*, *Medicago sativa*, *Raphanus sativus*, *Sinapis alba*, *Triticum aestivum*, *Helianthus annuus*, *Glycine max* and *Zea mays*) were used. Ten replications of 100 seeds were counted. After counting each replicate by the counter, the number of seeds was manually checked and the weight measured.

The Contador optical counter with integrated vibration channel was used. The counter was set to two counting speeds (maximum speed set automatically and 50% of maximum speed). The feed container was changed depending on the size of seed to be counted.

Obtained results were plotted in Excel graphs and linear trend lines added. Trend line formulas and  $R^2$  values were analyzed for presence of seed selection. Value of 0.3 for  $R^2$  was taken as a limit.



*Figure 1. Photo of the seed counter used in this study*

## **RESULTS AND DISCUSSION**

Trend analysis quantifies and explains trends and patterns in a “noisy” data over time. A “trend” is an upwards or downwards shift in a data set over time (Glen, 2022).

Trend analysis in this paper involved observation of values distribution (100 seed weight replication), i.e. dispersal of points on the graph. A random distribution of points confirms that there is no trend. If values had gradually decreased, it would have indicated selection of seed from larger to smaller (presence of trend).





Figure 2. Hundred seed weight in 10 replicates for 10 species obtained by counter at maximum (blue bar) and reduced speed (orange bars) and related linear trend lines

Obtained results are presented on the Graph 1 separately for each tested species. At maximum speed, a trend appears during the operation of the counter, for certain types of seeds. In the species *Capsicum annuum* and *Glycine max*, a trend from smaller to larger seeds was observed (trend line is climbing upwards). In the case of *Medicago sativa* seeds and pelleted *Beta vulgaris* seeds, a trend from larger to smaller was observed (trend line is oriented downwards). Initial hypothesis that seed counter during vibration would select smaller seed was just partially approved. Those data indicate that both seed size and seed shape affect the counting process. At reduced speed (50% of the maximum), there was no trend during the operation of the counter, for all observed types of seeds. In future, during regular laboratory practice care will be taken in order to achieve representativeness. For the species where a trend at maximum speed was observed, the speed on the counter will be reduced to 50%, or counting will be performed manually.

Final conclusion of trend analyses are presented in Table 1, together with average 1000 seed weight results. Existence of a trend at maximum speed, in the case of seeds of certain species, was not reflected on 1000 seed weight (average values were almost identical). Although the average value for 1000 seed weight is not affected by potential selection during counting replicates, trends in selection should be avoided since replicates are further used in the germination tests which can be affected. Positive correlation between germination and 1000 seed weight was observed by Knezevic et al. (2014) on wheat seeds, while Stanisavljevic et al. (2013) reported non-significant correlated between those two parameters in testing *Festuca rubra*.

Table 1. Trend analysis and average results for 1000 seed weight obtained by counter operated at maximum (100%) and reduced (50%) speed

Species	100% speed		50% speed		Average 1000 seed weight (g)	
	Trend analysis	R <sup>2</sup>	Trend analysis	R <sup>2</sup>	100% speed	50% speed
<i>Capsicum annuum</i>	Trend from smaller to larger	0.38	No trend	0.02	6.976	6.985
<i>Beta vulgaris</i> pelleted seed	Trend from larger to smaller	0.50	No trend	0.06	20.84	21.01
<i>Brassica napus</i>	No trend	0.29	No trend	0.29	3.939	3.969
<i>Medicago sativa</i>	Trend from larger to smaller	0.55	No trend	0.08	1.918	1.896
<i>Raphanus sativus</i>	No trend	0.16	No trend	0.06	7.460	7.378
<i>Sinapis alba</i>	No trend	0.03	No trend	0.04	5.735	5.733
<i>Triticum aestivum</i>	No trend	0.23	No trend	0.22	43.37	44.30
<i>Helianthus annuus</i>	No trend	0.04	No trend	0.04	66.15	65.98
<i>Glycine max</i>	Trend from smaller to larger	0.75	No trend	0.26	141.2	144.2
<i>Zea mays</i>	No trend	0.03	No trend	0.05	336.1	330.5

### CONCLUSION

Obtained results showed that the counter is precise, but weight results showed selection of smaller seeds (*Capsicum annuum* and *Glycine max*) at maximum counting speed. Trend of larger seed selection was observed in *Medicago sativa* and pelleted *Beta vulgaris*. Slower counting (50% of the maximum speed), ensured precise counting without trends.

The results of these analyses indicate the importance of checking the equipment both in terms of accuracy of counting and selection of seeds in order to obtain accurate test results for the 1000 seed weight.

### REFERENCES

1. Glen Stephanie (2022). Trend Analysis: Simple Definition, Examples. From StatisticsHowTo.com: Elementary Statistics for the rest of us! <https://www.statisticshowto.com/trend-analysis/>
2. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
3. ISTA (2018). ISTA Accreditation Standard for Seed Testing and Seed Sampling. Version 6.1. International Seed Testing Association. Zurich, Switzerland.
4. ISTA (2022) International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association. Zurich, Switzerland.
5. Knežević Jasmina, Đokić D., Terzić D., Poštić D., Đukanović Lana, Tošković Snežana, Tmušić Nadica (2014). Comparative analysis of the characteristics of different types of wheat seeds. *Selekcija i semenarstvo*, Vol. XX (2014) broj 1, 55-62.
6. Stanisavljević R., Đokić D., Terzić D., Milenković Jasmina, Beković D., Đukanović Lana, Štrbanović R. (2013). Seed yield of red fescue (*Festuca rubra* L.) and correlation dependence with yield components and seed quality. *Selekcija i semenarstvo*, Vol. XIX, No 1, 1-9.
7. Tabaković Marijenka, Oro Violeta, Stanisavljević R., Štrbanović R., Sečanski M. (2021). Quality assessment of hybrid maize seeds according to their shape and size. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 25, 28-31.
8. Wu Wenhua, Zhou Lei, Chen Jian, Qiu Zhengjun and He Yong (2018). Gain TKW: A Measurement System of Thousand Kernel Weight Based on the Android Platform. *Agronomy*, 8, 178; doi:103390/agronomy8090178

## ANALIZA TRENDU U PROCESU ISPITIVANJA MASE 1000 SEMENA PRIMENOM BROJAČA

Tanja PETROVIĆ, Jasna VUJINOVIĆ, Marija MILIVOJEVIĆ, Dragana BRANKOVIĆ-RADOJČIĆ,  
Radmila VUKADINOVIĆ

Institut za kukuruz „Zemun Polje“, Slobodana Bajića 1, 11185, Zemun, Beograd, Srbija

E-mail: [ptanja@mrizp.rs](mailto:ptanja@mrizp.rs)

Praćenje i kontrola rada laboratorijske opreme je jedan od zahteva standarda za laboratorije za ispitivanje semena. Period i način kontrole zavise od učestalosti korišćenja opreme, njene starosti itd. U Laboratoriji za ispitivanje semena Instituta za kukuruz „Zemun Polje“, brojač semena koristi se u ispitivanju mase 1000 semena radi ubrzanja procesa rada i jednom godišnje se redovno proverava njegova tačnost brojanja. Međutim, u dosadašnjoj praksi nije se obraćala pažnja da li prilikom rada brojača dolazi do selektivnog izbora semena koje se broji. Preciznost i slučajan izbor semena kod ispitivanja mase 1000 semena u laboratoriji je od velike važnosti kako bi se obezbedila reprezentativnost uzorka i ispravno donela odluka o daljem procesu pakovanja. Određivanje mase semena prema ISTA Pravilima se može izvesti na dva načina: brojanjem cele frakcije čistog semena i brojanje ponavljanja od po 100 semena. U oba slučaja brojanje se može izvesti ručno ili korišćenjem brojača. Cilj ovog istraživanja je provera da li laboratorijski brojač semena u toku svog rada, u zavisnosti od brzine, selektuje seme po obliku i veličini i da li postoji trend. U radu je ispitivano 10 vrsta različite krupnoće semena (*Capsicum annuum*, peletirano seme *Beta vulgaris*, *Brassica napus*, *Medicago sativa*, *Raphanus sativus*, *Sinapis alba*, *Triticum aestivum*, *Helianthus annuus*, *Glycine max* i *Zea mays*). Brojač je podešen na dve brzine brojanja (maksimalna brzina automatski zadata i 50% od maksimalne brzine). Brojano je 10 ponavljanja po 100 semena. Posle svakog ponavljanja izbrojanog na brojaču, ručno je proveravan broj semena i merena je masa. Analizom dobijenih rezultata utvrđeno je da brojač precizno broji, a na osnovu rezultata izmerene mase uočeno je da se na maksimalnoj brzini pojavljuje trend prilikom rada brojača kod vrsta *Capsicum annuum* i *Glycine max* (selektovanje semena od sitnijeg ka krupnijem). Kod semena *Medicago sativa* i peletiranog semena *Beta vulgaris*, uočen je trend selektovanja semena od krupnijeg ka sitnijem. Prilikom sporijeg brojanja (50% od maksimalne brzine), ne pojavljuje se trend prilikom rada brojača, kod gore navedenih vrsta semena. Za ostale vrste nije uočen trend (proseci mase 1000 semena za obe posmatrane brzine su skoro identični). Rezultati ovih analiza ukazuju na važnost provere opreme kako u smislu tačnosti brojanja tako i selektovanja semena u cilju dobijanja tačnih rezultata ispitivanja mase 1000 semena.

**Ključne reči:** trend, masa 1000 semena, brojač semena

## COMPREHENSIVE REVIEW OF THE APPLICATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT IN THE PACKAGING SECTOR FOR POLYMER AND BIOPOLYMER MATERIALS

*Danijela ŠUPUT, Senka POPOVIĆ, Jovana UGARKOVIĆ, Nevena HROMIŠ*  
*Faculty of Technology Novi Sad, Bulevar Cara Lazara 1, 21 000 Novi Sad, Serbia*  
*E-mail: [suput.danijela@gmail.com](mailto:suput.danijela@gmail.com)*

### ABSTRACT

Among many important requirements for packaging materials, environmental friendliness is property that has become necessary for any material that needs be competitive in the market. Life Cycle Analysis (LCA) is an analytical instrument that provides a framework for analyzing the impact of products and services on the environment, i.e. provides an understanding and the possibility of comparing different products. This paper will provide an overview of the results of LCA analyzes of various commercial polymer packaging materials, as well as the results of LCA analyzes for biopolymer materials. The available LCA studies and environmental assessments support further development of biobased polymers, since when comparing them with synthetic polymers, they have advantages - lower consumption of fossil fuels and lower emission rate of greenhouse gases from the whole life cycle.

### INTRODUCTION

The term "life cycle" refers to the main activities during the life cycle of the packaging from its production, including raw materials, distribution, (re)use and maintenance, recycling and the final disposal (Wolfson et al., 2019). The Life Cycle Assessment (LCA) includes gathering information on inputs and outputs of processes such as emissions, waste and resources and translating them into environmental impact factors (using impact assessment methodology), such as contributing to climate change, eutrophication, acidification and toxicity to humans and the ecosystem (Yates and Barlow, 2013). It presents a systematic, phased approach and includes the four most important phases, as well as concluding remarks (Hottle et al., 2013):

**1. Phase of goal and scope of the LCA definition (“Goal Definition and Scoping”)** In this phase the boundaries of the observed system are established, the processes to be analyzed, which methods for impact analysis will be applied and which categories of impact will be analyzed.

**2. Phase of data collection and formation of the LCI (“Life Cycle Inventory”)** In this phase, the quantities of materials, energy and chemicals that enter the production process as well as the emission of harmful substances into the air, water and soil are defined. In addition, the effects of radiation and land occupation can be analyzed.

**3. Life Cycle Impact Assessment (LCIA) phase** In the third phase, the impact assessment is performed on categories such as global warming, increasing soil and water acidity, reducing fossil fuel stocks, etc. In the first step of this phase, characterization is performed, ie impacts are calculated based on LCI data. In the next step, normalization is performed, where all influences are reduced to the same unit, and then each influence is assigned a weighting factor depending on the relative importance of that influence.

**4. Interpretation Phase** is a systematic process for identifying, verifying, qualifying and evaluating information obtained from life cycle inventory analysis results. This phase is the most important in the whole analysis, because it can be used to answer what has the greatest impact on one of the categories).

LCA is a quantitative application of the concept of life cycle thinking (LCT), and is based on the evaluation of the life cycle of a product or service from the aspect of environmental protection (Flanigan et al., 2013). In order to relativize the impact of products on the environment, ISO introduces the 14000 series of standards that deal exclusively with this topic, with a special place being taken by the LCA life cycle analysis. **The ISO 14000 series of standards** includes the 14001 environmental management system standard and the environmental management cycle - life cycle assessment, ISO 14040 series. Thanks to this framework, the entire LCA procedure is divided into four characteristic phases (De Bruijn et al., 2002):

- Defining the goal and scope (ISO 14041);
- Inventory analysis (ISO 14041);
- Impact assessment (ISO 14042);
- Interpretation (ISO 14043).

The use of ISO 14040 standards in polymer production industries, as well as accurate goal and scope definition, inventory data, impact assessment, and interpretation, leads to the advancement of new technologies for the development of sustainable polymers globally (Ramesh and Vinodh, 2020). Relevant impact categories commonly reported as a LCA studies results are (Tamburini et al., 2021): Global warming potential (GWP), Ozone depletion potential (ODP), Acidification of soil and water potential (AP), Eutrophication potential (EP), Photochemical ozone formation potential (POFP), Fossil fuels depletion potential (FDP), Human toxicity potential (HTP), Eco-toxicity potential (ETP), Water depletion potential (WD), Land occupation potential (LOP), etc.

### **POLYMER LIFE CYCLE ASSESSMENT**

Recent data point to an increase in polymer materials consumption and, as a result, plastic waste. Global plastic output hit 338 million tons in 2019, representing a 640% growth since 1975. (Matthews et al., 2021). Polymer packaging materials are the most popular in the international packaging market for a variety of reasons: strength, flexibility, workability, the ability to combine with other materials and low cost. Some LCA analysis were performed only on examples of polymeric materials:

Grigale et al. (2010) presented a life cycle analysis of polyethylene (PE). PE life cycle analysis indicates the possibility of resource recovery through recycling and incineration. Total energy for PE production was 76 MJ/kg, mass 0,2 kg/FU (functional unit), energy 15,2 MJ/FU, emission GHG 4,8 kg CO<sub>2eqv</sub>/kg, GHG emission 0,96 kg CO<sub>2eqv</sub>/FU.

Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate Packaging (PET) was briefly overviewed by Gomes et al. (2019). PET bottles were compared to traditional systems like glass bottles and metal cans in this scenario. PET outperformed these two options in terms of environmental performance, making it the ideal option for carbonated beverages. The general goal was to point to technologies for producing PET that have a lower environmental impact and can be recovered more efficiently, such as closed-cycle recycling.

When using composite materials (multilayer materials made of polymers and aluminum or paper) versus monomaterials, a LCA study showed that the composite packaging has larger environmental impact than plastic packaging. Furthermore, with the exception of disposal, the environmental effect of raw material extraction is the largest of all life cycle stages. The environmental impact of composite packaging is primarily due to fossil fuels, land use, and respiratory inorganics, whereas the impact of plastic packaging is primarily due to fossil fuels. However, because composite packaging has not been properly recycled and reused, it has a bigger environmental impact. By creating technology to extract polyethylene and aluminum from packaging, this environmental impact could be reduced (Xie et al., 2011).

### BIOPOLYMER LIFE CYCLE ASSESSMENT

Biopolymers are biodegradable so must be composted rather than discarded or recycled, completing the natural carbon cycle, which is their advantage over polymer materials. They can be obtained directly from natural sources, such as cellulose, starch, or sucrose, through fermentation and chemical synthesis using renewable biological monomers, or directly produced by bacterial cultures as polyhydroxyalkanoates and polyhydroxybutyrate. However, global bioplastic output is still less than 1% of total plastic production, owing to the fact that research and development costs still account for a significant (Tamburini et al., 2021). Most LCA studies have been conducted poly(lactic acid) (PLA), the poly(hydroxyalkanoates) (PHAs), and starch based-materials.

Because degradation causes global warming and climate change, bioplastics composting is a viable alternative to landfilling. Biopolymers are being designed with features such as biodegradability and composability. Bioplastics composting may be more effective than incineration since industrial composting has a lower environmental impact (Weiss et al., 2012).

### POLYMER VS BIOPOLYMER LIFE CYCLE ASSESSMENT

A large number of LCA studies have been performed comparing the effects of commercial packaging materials with new biopolymer materials. Although biopolymer technologies are new and have been compared to optimized commercial technologies, biopolymers may have lower environmental impacts than petrochemical plastics. The most important conclusions of the LCA studies are shown in Table 1.

*Table 1. LCA comparative studies for polymer and biopolymer materials*

Materials	Conclusions	Reference
PLA/PP	Analysis of inventory for production and disposal requires higher energy consumption for PP (3261 MJ/t) compared to PLA (2225 MJ/t). Greenhouse gas emissions from production and disposal are very similar for both tested materials.	Bohlmann, 2004
PHA/PP	Air emissions at landfill for conventional plastics were significantly higher for all tested gases except methane. In the case of incineration, air emissions were higher for bioplastics in the case of CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , but less for HCl and HF.	Khoo and Tan, 2010
PLA, TPS, PHA/HDPE, LDPE, PET, PP, PS	In CO <sub>2</sub> emission, PS and PET showed the highest level of impact. Impacts for PLA in eutrophication, ozone depletion and ecotoxicity are significantly higher than other five polymers.	Hottle et al., 2017
PLA/PS	PLA trays had higher impact than PS trays for all impact categories, except in Resources an NREU. It was found that 8.98 g was for one PS tray and 11.36 g is needed for PLA trays and Total damage of PLA granule lesser than Transport of PLA and rises GW significantly. PLA manufactured process had lesser impact than PS granules.	Ingrao et al., 2017
PLA/PET	The findings revealed that the true advantage of PLA bottles over PET bottles comes from the use of renewable resources, but that this benefit comes at a cost in terms of environmental impact due to the higher impact on human health and ecosystem quality	Gironi and Piemonte, 2010

	(due to the pesticides usage, land and water consumption for the production of raw materials). PLA products also had lower NREU and GWP than the petrochemical polymer products.	
biobased HDPE/fossil HDPE	This study shows a reduction of impact of around 60% for both climate change and fossil fuel depletion categories when using biobased HDPE instead of its fossil counterpart. For all other impact categories, fossil HDPE achieves better results than the biobased product.	Belboom and Léonard, 2016
PLA/PET	An LCA comparison of PLA and PET bottles revealed that the biomass-based option is better in terms of net GWP and cumulative energy usage (CED). When PLA granules are used instead of PET granules in bottle manufacturing, the net GWP and CED of the bottles are reduced by 30.9 %t and 9.7 %, respectively. However, if no credits are given for atmospheric CO <sub>2</sub> fixed by corn, and the energy in corn-feedstock is accounted for, the PLA benefits would be greatly reduced.	Nikolić et al., 2015
PLA/PP, PET	The biggest environmental hotspot for PLA cups was identified as the process energy use in the conversion from biomass to PLA polymer, followed by the electricity consumption of thermoforming the cups. The biomass acquisition step was discovered to have a minor overall influence. PLA cups outperform PET cups in terms of climate change mitigation (22 % lower impact) and fossil resource depletion (52 % lower) when compared to both PET and PP cups (41 % lower). PLA cups, on the other hand, have much greater consequences on photochemical ozone production, acidification, and terrestrial eutrophication than PET and PP cups. PP cups have better performance than PET cups.	Moretti et al., 2021

\* PLA – polylactic acid; PP – polypropylene; PHA – polyhydroxyalkanoates; TPS – thermoplastic starch; HDPE – high density polypropylene; LDPE – low density polypropylene; PET – polyethylene terephthalate; PS – polystyrene; NREU – non- renewable energy use; GWP – Global Warming Potential; CED - cumulative energy demand

## CONCLUSION

Packaging life cycle assessment is a young scientific discipline that begins with the acceptance of the fact that manufacturers and products or packaging users have a responsibility for their impact on the environment. Earlier, it was considered that the cycle begins when the material in the form of raw materials is delivered to the factory, and ends when the finished product "comes out" of the factory and reaches the consumer. Today, packaging is increasingly managed in accordance with legal regulations. LCA, also, enables manufacturers to choose clean production techniques with fewer hazards and harmful materials, as well as improve energy efficiency, waste management, and recycling. Based on the comparison of LCA polymer and biopolymer materials, it can be concluded that when opposed to fossil-based polymers, bio-based polymers are more environmentally friendly. The extraction of raw materials to the use phase of materials results in a variety of processing methods and applications. Using fossil-based polymers has a greater worldwide environmental impact. Bio-based polymers have a lower environmental impact than petroleum-based polymers, according to the findings.



### **ACKNOWLEDGEMENTS**

This paper is a result of the program of the Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia, number: 451-03-68/2022-14/200134.

### **REFERENCES**

1. Belboom, S., Léonard, A. (2016). Does biobased polymer achieve better environmental impacts than fossil polymer? Comparison of fossil HDPE and biobased HDPE produced from sugar beet and wheat. *Biomass and Bioenergy*, 85, 159-167.
2. Bohlmann, M. (2004). Biodegradable Packaging Life-Cycle Assessment. *Environmental Progress*, 23 (4), 342-346.
3. De Bruijn, H., Van Duin, R., Huijbregts, M., A., J. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
4. Flanigan, L., Frischknecht, R., Montalbo, T. (2013). *An Analysis of Life Cycle Assessment in Packaging for Food & Beverage Applications*, United Nations Environment Programme and SETAC.
5. Gironi F, Piemonte V. (2010). Life cycle assessment of polylactic acid and PET bottles for drinking water. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30 (3), 459–468.
6. Gomes, T.S., Visconte, L.L.Y., Pacheco, E.B.A.V. (2019). Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate Packaging: An Overview. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 533–548.
7. Grigale, Z., Simanovska, J., Kalnings, M., Dzene, A., Tupureina, V. (2010). Biodegradable Packaging from Life Cycle Perspective. *Scientific Journal of Riga Technical University Material - Science and Applied Chemistry*, 21, 90-97.
8. Hottle, T.A., Bilec, M.M., Landis, A.E. (2013). Sustainability assessments of bio-based polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 98, 1898-1907.
9. Ingrao, C., Gigli, M., Siracusa, V. (2017). An Attributional Life Cycle Assessment Application Experience to Highlight Environmental Hotspots in the Production of Foamy Polylactic Acid Trays for Fresh-food Packaging Usage. *Journal of Cleaner Production*, 150, 93–103.
10. Khoo, H.H., Tan, B.H. (2010). Environmental impacts of conventional plastic and bio-based carrier bags, Part 2: End-of-life options. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, 338-345.
11. Matthews, C., Moran, F., Jaiswal, A.K., 2021. A review on European union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety. *Journal of Cleaner Production*, 125263.
12. Moretti, C., Hamelin, L., Geest Jakobsen, L., Junginger, M.H., Steingrimsdottir, M.M., Høibye, L., Shen, L. (2021). Cradle-to-grave life cycle assessment of single-use cups made from PLA, PP and PET. *Resources, Conservation & Recycling*, 169, 105508.
13. Nikolić, S., Kiss, F., Mladenović, V., Bukurov, M., Stanković, J. (2015). Corn-based polylactide vs. PET bottles—Cradle-to-gate LCA and implications. *Materiale Plastice*, 52 (4), 517-521.
14. Ramesh, P., Vinodh, S. (2020). State of art review on Life Cycle Assessment of polymers. *International Journal of Sustainable Engineering*, 13 (6), 411-422.
15. Tamburini, E., Costa, S., Summa, D., Battistella, L., Fano, E.A., Castaldelli, G. (2021). Plastic (PET) vs bioplastic (PLA) or refillable aluminium bottles – What is the most sustainable choice for drinking water? A life-cycle (LCA) analysis. *Environmental Research*, 196, 110974.
16. Wolfson, A., Dominguez-Ramos, A., Irabien, A., 2019. From goods to services: the life cycle assessment perspective. *Journal of Service Science Research*, 11 (1), 17–45.

17. Xie, M., Li, L., Qiao, Q., Sun, Q., Sun, T. (2011). A comparative study on milk packaging using life cycle assessment: from PA-PE-Al laminate and polyethylene in China. *Journal of Cleaner Production*, 19, 2100-2106.
18. Yates, M.R., Barlow, C.Y. (2013). Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers - A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, 54-66.

## SVEOBUH VATNI PREGLED PRIMENE PROCENE ŽIVOTNOG CIKLUSA U SEKTORU AMBALAŽE ZA POLIMERNE I BIOPOLIMERNE MATERIJALE

*Danijela ŠUPUT, Senka POPOVIĆ, Jovana UGARKOVIĆ, Nevena HROMIŠ*  
*Tehnološki Fakultet Novi Sad, Bulevar Cara Lazara 1, 21 000 Novi Sad, Srbija*  
*E-mail: [suput.danijela@gmail.com](mailto:suput.danijela@gmail.com)*

Među mnogim važnim zahtevima za ambalažne materijale, ekološka prihvatljivost je nešto što je postalo neophodno za svaki materijal koji može biti konkurentan na tržištu. Analiza životnog ciklusa (LCA) je analitički instrument koji obezbeđuje okvir za analizu uticaja proizvoda i usluga na životnu sredinu, odnosno pruža razumevanje i mogućnost poređenja različitih proizvoda. Glavni cilj uticaja je da se identifikuju i uspostave veze između životnog ciklusa proizvoda i usluga i potencijalnih uticaja na životnu sredinu. LCA proučava ekološke aspekte i moguće uticaje na životnu sredinu tokom čitavog životnog ciklusa proizvoda od ekstrakcije sirovina, kroz proizvodnju, upotrebu i tretman na kraju životnog veka, reciklažu i konačno odlaganje („od klevke do groba“). To je sistematski pristup i uključuje četiri najvažnije faze: fazu definisanja cilja i obima, fazu inventara životnog ciklusa, fazu procene uticaja životnog ciklusa i fazu tumačenja rezultata. Serija standarda ISO 14040 uspostavlja fleksibilan okvir pod kojim se LCA studija sprovodi na praktičan i tehnički pouzdan način. Ne postoji jedinstvena metoda za sprovođenje LCA studije. Organizacijama je obezbeđena fleksibilnost u sprovođenju LCA studije, što zavisi od specifičnosti aplikacije i zahteva korisnika.

Ovaj rad će dati pregled rezultata LCA analiza različitih komercijalnih polimernih ambalažnih materijala, kao i rezultata LCA analiza biopolimernih materijala. Polimerni materijali se u najvećem procentu (38%) koriste u proizvodnji ambalaže, što je više nego u građevinarstvu, automobilskoj industriji, elektroenergetici i elektronici. Široka upotreba polimera za proizvodnju ambalažnih materijala je u velikoj meri posledica dobrih fizičko-mehaničkih i barijernih svojstava, ali je njihov dug životni vek najveća mana, posebno u pogledu zaštite životne sredine. Kada se uzme u obzir uticaj na životnu sredinu, ovi materijali su se u mnogim kategorijama pokazali lošijima u poređenju sa biorazgradivim polimerima (emisija CO<sub>2</sub>), ali su u nekim kategorijama postigli bolje rezultate (manja potrošnja energije).

Ideja upotrebe ambalažnih materijala na bazi biopolimera iz obnovljivih izvora je da zatvore prirodni ciklus, pri čemu kraj jednog ciklusa znači početak sledećeg ciklusa. Biopolimeri su relativno novi na tržištu u poređenju sa njihovim sintentskim polimerima dobijenim iz naftnih derivata. Ipak, ova industrija je ostvarila značajne dobitke u kratkom vremenskom periodu. Pretpostavka da su biopolimeri u skladu sa održivim razvojem mora i dalje biti podržana relevantnim naučnim činjenicama. Dostupne LCA studije i ekološke procene snažno podržavaju dalji razvoj biopolimera, jer u poređenju sa sintetičkim polimerima, oni imaju prednosti, na primer, manju potrošnju fosilnih goriva i nižu stopu emisije gasova staklene bašte iz celog životnog ciklusa.

**Ključne reči:** ambalaža, analiza životnog ciklusa, polimeri, biopolimeri

## CENTRIFUGAL PUMPS AND NON-NEWTONIAN FLUIDS

*Slobodan TAŠIN, Vladan MITROVIĆ, Maša BUKUROV, Siniša BIKIĆ*

*<sup>1</sup>University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences Novi Sad,*

*Trg Dositeja Obradovića 6, Serbia*

*E-mail: tasholi@uns.ac.rs*

### ABSTRACT

Performance characteristics of centrifugal pumps given by manufacturers in technical sheets and test reports commonly refer to clean water at a temperature between 4 °C and 20 °C. If a pump must handle a fluid that has different physical properties, especially viscosity, its performance characteristics could be more or less different from those related to water. If a particular fluid exhibits linear correlation between the viscous stresses  $\tau$  and the shear rate  $\dot{\gamma}$  (Newtonian fluids), the expected performance characteristics of a pump can be estimated with an acceptable accuracy using some of the known methods developed by pump manufacturers. However, if the fluid behaviour differs from such linear dependence (non-Newtonian fluids) the assessment of the pump performance characteristics is much more complex and, in most cases, requires testing.

This paper presents a brief overview of the published results of testing the performance characteristics of centrifugal pumps handling different non-Newtonian fluids.

**Key words:** *non-Newtonian fluids, centrifugal pumps, performance characteristics*

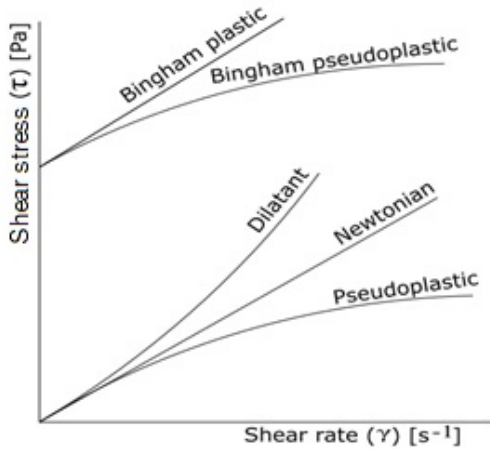
### INTRODUCTION

Many industries require pumping of fluids whose behaviour differs from Newtonian linear dependence between the viscous stresses  $\tau$  and the shear rate  $\dot{\gamma}$ , for example, the rubber industry, chemical and pharmaceutical industry, food industry, industry of paints and varnishes, etc. Although all fluids that do not exhibit Newtonian behaviour are commonly referred as non-Newtonian, different non-Newtonian fluids may achieve completely different flow patterns for the same boundary conditions. Depending on the form of functional dependence between viscous stresses and shear rate, non-Newtonian fluids can be classified into several groups that are listed in Table 1. The functional relations between the shear stress and shear rate of common fluid types are given in Figure 1. Nevertheless, it should be noted that many materials may exhibit a combined behaviour of two or more types of non-Newtonian fluids.

*Table 1. Classification of non-Newtonian fluid properties with example fluids*

Fluid type	Rheological model	Behaviour	Example fluids
Viscoelastic	Kelvin-Voigt model Maxwell model	Combination of viscous and elastic effects	Whipped cream, certain lubricants
Time dependent	Rheopectic	Viscosity increases with duration of stress	Gypsum paste, synovial fluid
	Thixotropic	Viscosity decreases with duration of stress	Yogurt, gelatine gels, peanut butter
Time nondependent	Dilatant (shear-thickening)	Viscosity increases with increased stress	Corn starch in water (oobleck)
	Pseudoplastic (shear-thinning)	Viscosity decreases with increased stress	Ketchup, syrups, paper pulp, blood, sand in

		water, molasses
Bingham plastic	Viscosity is a function of the shear strain rate but require a certain yield stress to begin to flow	Toothpaste, mayonnaise, melted chocolate



Fluid type	Rheological function
Newtonian	$\tau = a \cdot \gamma$
Dilatant and Pseudoplastic	$\tau = a \cdot \gamma^b$
Bingham plastic	$\tau = c + a \cdot \gamma$
Bingham Pseudoplastic	$\tau = c + a \cdot \gamma^b$

Figure 1. Classification of fluids by shear stress as a function of shear rate

All the above-mentioned non-Newtonian fluids have different impacts on the operation of a centrifugal pump, namely on its performance characteristics. As experiments show, pump performance characteristics may increase or decrease when a pump handles a non-Newtonian fluid instead of water but may also decrease at lower flow rates and increase at higher flow rates, or vice versa, depending not only on the non-Newtonian fluid type but also on the pump rotational speed. Besides the pump characteristics it should be kept in mind that the fluid properties have influence on the system characteristics as well.

Useful numerical methods for estimating pump performance characteristics have been developed for a very limited number of non-Newtonian fluids, e.g., for fibre pulp (KSB, 2005). For most other non-Newtonian fluids, the only reliable way to determine the performance characteristics of a centrifugal pump is to measure the actual operating parameters when pumping a particular fluid or a fluid that has the most similar rheological properties.

### DISCUSSION

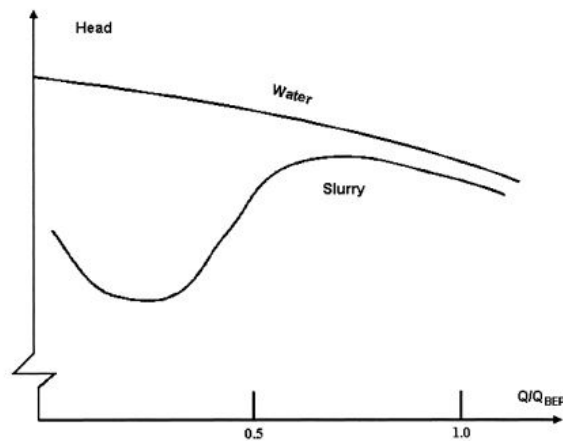
Pumping very fine particles dispersed in water, or suspensions with high solid concentrations is a common problem in industrial applications. Most of these slurries are non-settling, thus they can be considered non-Newtonian fluids. The impact of these fluids on the pump performance could vary significantly depending on the fluid type, but in many cases results in head and efficiency deterioration. As experiments show, the reduction in efficiency is commonly higher compared to the head drop. In general, small-size pumps are affected more when handling non-Newtonian media compared to larger pumps.

Walker & Goulas (1984) have measured the effects of different industrial slurries on the head and efficiency of one centrifugal pump operating near the best efficiency point ( $Q_{BEP}$ ). Their results are summarized in Table 2.

*Table 2. Effects of industrial slurries of pump head and efficiency (Walker and Goulas, 1984)*

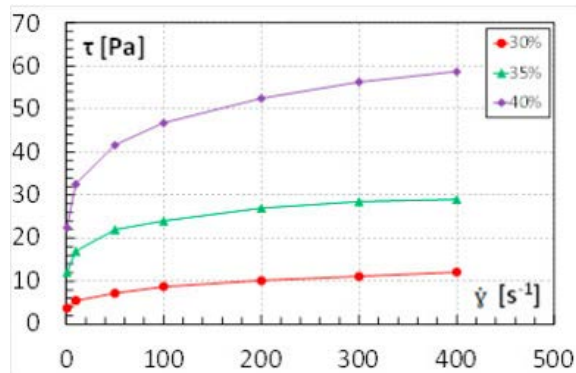
Product	Bauxite	Red mud	Kaolin	Phosphate clay
Typical slurry density ratio	1.6	1.55	1.35	1.1
Head reduction (%)	2	3	3	2
Efficiency reduction (%)	5	6	6	3

As it can be inferred from the presented results the efficiency and head reductions are not so dramatic when the pump operates near optimal regime. However, in case of part-load operation of the pump and highly non-Newtonian slurries, experiments conducted by Whitlock and Sellgren (2002) have shown an enormous head drop and even deformation of a head curve into an unstable form, as illustrated in Figure 2.



*Figure 2. Effect of highly non-Newtonian slurries on head, (Whitlock and Sellgren, 2002)*

Similar results were reported by Aldi et al. (2017). They have measured and compared performance characteristics of a small centrifugal sewage pump operating with water and kaolin powder suspensions in water with concentrations of 30%, 35% and 40%. These mixtures showed the classic pseudoplastic behaviour, as shown in Figure 3.



*Figure 3. Experimental viscous stress-shear rate dependence for kaolin suspensions, (Aldi et al., 2017)*

Figures 4-5 show typical experimental results obtained by Aldi et al. related to the observed pump running at 2900 rpm and 2000 rpm. As it can be seen, for lower concentration suspensions, the pump head and efficiency curves decrease at low flow rates and slightly increase at higher at flow rates compared to water case. This phenomenon is called *sudden rising head* (and efficiency) and is a consequence of a decrease in apparent viscosity with flow rate.

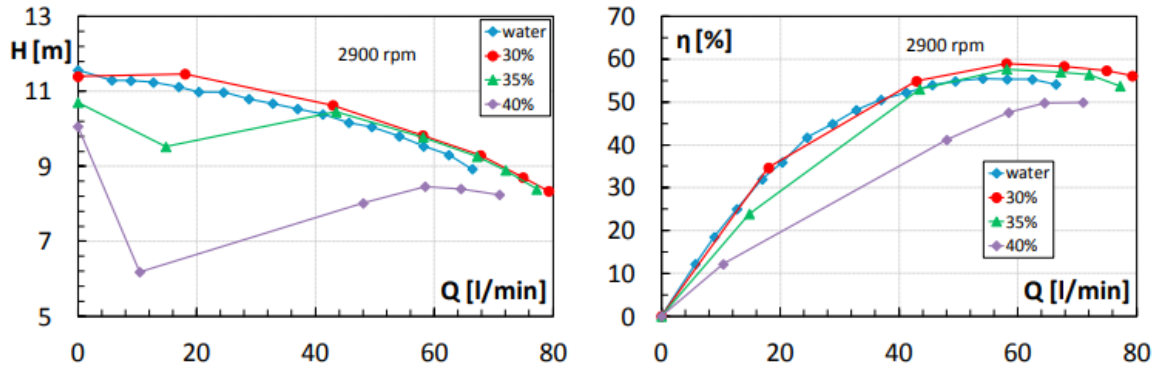


Figure 4. Experimental pump head and efficiency with water and kaolin suspensions at 2900 rpm (Aldi et al., 2017)

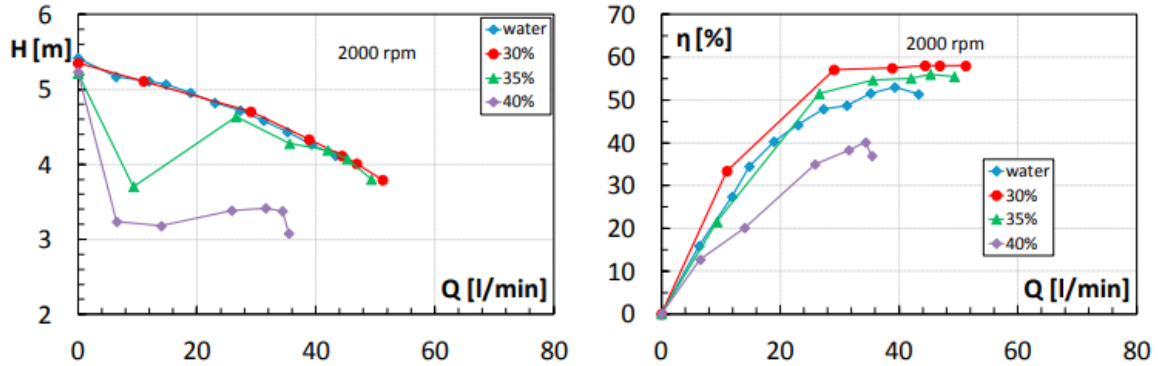


Figure 4. Experimental pump head and efficiency with water and kaolin suspensions at 2000 rpm (Aldi et al., 2017)

In the case of higher kaolin concentrations and lower pump speed the head and efficiency drop is more significant while the concavity of the head curve changes similar to that in Figure 2.

Figure 5 presents results of the experimental and CFD investigations conducted by Valdes et al. (2019) on a four-stage centrifugal submersible pump. They have compared the measured and calculated pump performance characteristics handling three Newtonian fluids (water, mineral oil and sunflower oil) and two non-Newtonian fluids (Carboxymethyl-Cellulose (CMC) solution in water at 0.5% and 1% weight ratios). They concluded that the non-Newtonian fluids outperform both heavier and lighter oils, even though the non-Newtonian range of viscosities were one or more orders of magnitude higher than the Newtonian oils viscosities. Furthermore, the pump performance with the non-Newtonian fluids did not deteriorate as rapidly as with the Newtonian oils. Such a results were addressed to the shear-thinning properties of the non-Newtonian CMC solutions.

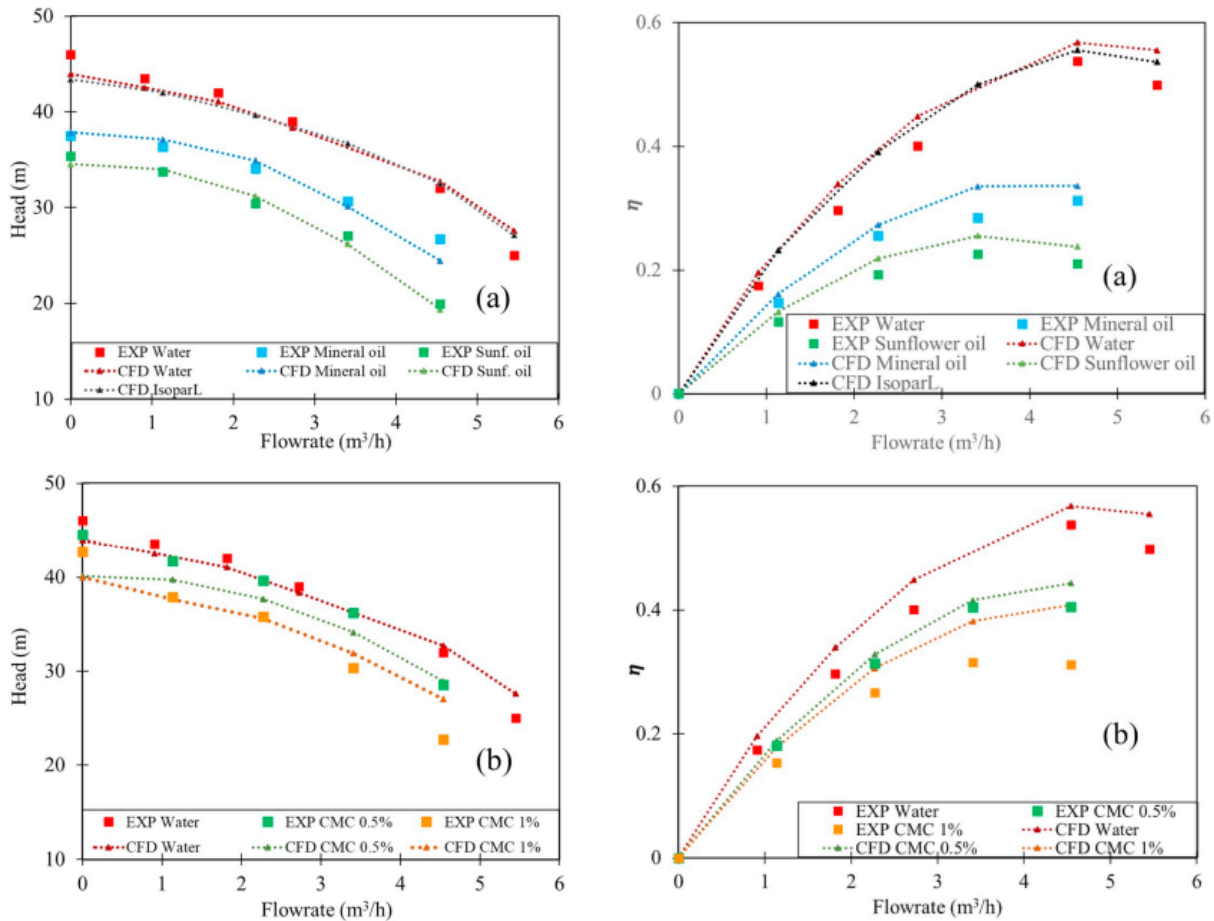


Figure 5. CFD and experimental head and efficiency pump characteristics for (a) Newtonian and (b) non-Newtonian fluids (Valdes et. al., 2019)

## CONCLUSION

The experimental and numerical results selected and presented in this paper indicate the complexity of the problem of centrifugal pump operation with non-Newtonian fluids. As it is shown, different non-Newtonian fluids have specific impact on the pump performance that may vary with both slight changes in fluid properties and flow rate. Despite the increasing accuracy of the modern CFD technics, experimental determination of the pump performance characteristics handling particular non-Newtonian fluid is still the only reliable option.

## REFERENCES

1. KSB (2005). Selecting Centrifugal Pumps, KSD Aktiengesellschaft, Frankenthal, Germany, 54-55.
2. Aldi, N., Buratto, C., Casari, N., Dainese, D., Mazzanti, V., Mollica, F., Munari, E., Occari, M., Pinelli, M. Randi, S., Spina, P.R., Suman, A. (2017). Experimental and Numerical Analysis of a Non-Newtonian Fluids Processing Pump, Energy Procedia 126 (201709) 762–769
3. Valdes, J.P., Becerra, D., Roza, D., Cediell, A., Torres, F., Asuaje, M., Ratkovich, N. (2019). Comparative analysis of an electrical submersible pump's performance handling viscous Newtonian and non-Newtonian fluids through experimental and CFD approaches, Journal of Petroleum Science and Engineering, 187 (2020), 106749



4. Walker, C.I. and Goulas, A. (1984). Performance characteristics of centrifugal pumps when handling non-Newtonian homogenous slurries, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 198A, No.1, 41-49
5. Whitlock, L. and Sellgren, A. (2002). Pumping paste with a modified centrifugal pump, Proceedings, Tailings and Mine Waste 02, 155-160

## CENTRIFUGALNE PUMPE I NENJUTONOVSKI FLUIDI

*Slobodan TAŠIN<sup>1</sup>, Vladan MITROVIĆ<sup>1</sup>, Maša BUKUROV<sup>1</sup>, Siniša BIKIĆ<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6*

*[E-mail: tasholi@uns.ac.rs](mailto:tasholi@uns.ac.rs)*

Karakteristike performansi centrifugalnih pumpi  $H(K)$ ,  $P(K)$ ,  $\eta(K)$ , koje proizvođači daju u katalogima, tehničkim listovima i izveštajima o ispitivanju, obično se odnose na čistu vodu na temperaturi između 4 oC i 20 oC. Ako pumpa mora da radi sa fluidom koji ima drugačija fizička svojstva od vode na datoj temperaturi, posebno u slučaju gustine i viskoznosti, njene karakteristike performansi mogu se manje-više razlikovati od karakteristika koje se odnose na vodu. Ako se određeni fluid razlikuje od vode samo po gustini, očekivane karakteristike performansi pumpe mogu se proceniti sa prihvatljivom tačnošću iz karakteristika performansi za vodu korišćenjem zakona afiniteta za turbo-mašine. Ako se viskozitet tečnosti značajno razlikuje od viskoziteta vode, postupci za procenu karakteristika performansi su mnogo složeniji. U praksi je za ovu svrhu razvijeno nekoliko metoda od strane specijalizovanih istraživačkih centara ili proizvođača pumpi. Većina ovih metoda se odnosi na Njutnove tečnosti, odnosno fluide koji pokazuju linearnu korelaciju između viskoznih napona  $\tau$  i gradijenta brzine  $dv/dy$ , odnosno brzine smicanja  $\gamma$ .

S druge strane, mnoge industrije zahtevaju pumpanje fluida čije se ponašanje razlikuje od takve linearne zavisnosti, na primer, gumarska industrija, hemijska i farmaceutska industrija, prehrambena industrija, industrija boja i lakova, itd. Iako svi fluidi koji ne pokazuju Njutnov ponašanje se obično naziva ne-njutnovskim, različite ne-njutnove tečnosti mogu postići potpuno različite obrasce protoka za iste granične uslove. U zavisnosti od oblika funkcionalne zavisnosti između viskoznih napona i brzine smicanja, nenjutnovske tečnosti se mogu podeliti u nekoliko grupa kao što su dilatantne, pseudoplastične, viskoelastične, viskoplastične, tiksotropne i reopektične. Osim toga, mnogi materijali mogu da ispolje kombinovano ponašanje dve ili više vrsta nenjutnovskih tečnosti.

Svi gore navedeni nenjutnovski fluidi imaju različite uticaje na rad centrifugalne pumpe, odnosno na njene performanse. Kao što pokazuju eksperimenti, karakteristike performansi pumpe mogu da se povećaju ili smanje kada pumpa pumpa ne-njutnovski fluid umesto vode, ali takođe mogu da se smanje pri nižim brzinama protoka i povećaju pri većim brzinama protoka, ili obrnuto, u zavisnosti ne samo od ne-njutnovske tip tečnosti ali i na brzinu rotacije pumpe. Korisne metode za procenu karakteristika performansi pumpe razvijene su za veoma ograničen broj nenjutnovskih fluida, na primer, za drvenu celulozu. Za većinu drugih nenjutnovskih tečnosti, jedini pouzdan način da se odrede karakteristike performansi centrifugalne pumpe je merenje stvarnih radnih parametara prilikom pumpanja određene tečnosti ili fluida koji ima najsličnija reološka svojstva.

U ovom radu je dat pregled dostupnih rezultata ispitivanja performansi centrifugalnih pumpi pri radu sa različitim nenjutnovskim fluidima. Prikazani rezultati bi se mogli koristiti kao osnova za kvalitativnu procenu karakteristika performansi određene centrifugalne pumpe pri pumpanju određenog nenjutnovskog fluida.

**Ključne reči:** *nenjutnovske tečnosti, centrifugalne pumpe, karakteristike performansi*