

UNIVERZITET U BEOGRADU
POLJOPRIVREDNI FAKULTET

Maja Ž. Malnar

UTICAJ DODATKA RAZLIČITIH VRSTA BIOMASE NA
PROMENE ENERGETSKIH I EKOLOŠKIH
KARAKTERISTIKA BRIKETA OD STABLJIKA DUVANA
TIPA BERLEJ

Doktorska disertacija

Beograd, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF AGRICULTURE

Maja Ž. Malnar

THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF DIFFERENT
TYPES OF BIOMASS ON CHANGES IN ENERGY
AND ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BERLEY TYPE
TOBACCO STALK BRIQUETTES

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024.

KOMISIJA ZA OCENU I ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE:

Mentor 1:

Dr Vesna Radojičić, redovni profesor,
Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu,
(Uža naučna oblast: Nauka o preradi ratarskih sirovina)

Mentor 2:

Dr Sanja Stojadinović, naučni saradnik
Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, IHTM
Univerzitet u Beogradu
(Uža naučna oblast: Hemija)

Članovi komisije:

Dr Željko Dolijanović, redovni profesor
Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu
(Uža naučna oblast: Agroekologija)

Dr Biljana Rabrenović, redovni profesor
Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu
(Uža naučna oblast: Nauka o preradi ratarskih sirovina)

Dr Gorica Veselinović, viši naučni saradnik
Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, IHTM
Univerzitet u Beogradu
(Uža naučna oblast: Hemija)

Datum odbrane: _____

UTICAJ DODATKA RAZLIČITIH VRSTA BIOMASE NA PROMENE ENERGETSKIH I EKOLOŠKIH KARAKTERISTIKA BRIKETA OD STABLJIKA DUVANA TIPA BERLEJ

Sažetak

Stabljike duvana koje ostaju nakon berbe listova imaju značajan udeo u ukupnoj količini poljoprivredne biomase. Iako se u Srbiji sprovode sve ozbiljnija istraživanja, još uvek se ne promoviše njihova upotreba kao biogoriva, pre svega iz ekoloških razloga, jer još nisu istraženi proizvodi njihovog sagorevanja.

Stoga je cilj ovog istraživanja bio, pre svega, utvrđivanje sastava produkata sagorevanja a zatim i elementarnog sastava, sadržaja pepela, nikotina i toplotne moći 5 vrsta briketa koji su napravljeni mešanjem stabljika duvana sa drugim vrstama biomase (ostaci glava suncokreta, pšenična slama, oklasak kukuruza, sojina stabljika i piljevina drveta bukve), u odnosu 50:50 po masi, bez dodavanja ikakvih vezivnih sredstava. Cilj je bio i ustanoviti može li mešanje duvanskih stabljika s drugim vrstama biomase poboljšati njihova tehnološka svojstva.

Utvrđeno je da toplotna moć svih analiziranih briketa ima prihvatljive vrednosti prema standardu SRPS EN ISO 17225-2:2021. Svi briketi ispunjavaju ekološke kriterijume u pogledu ograničenja emisije azotnih oksida, sumpor-dioksida, ugljen-dioksida i ugljen-monoksida u skladu sa Uredbom o graničnim vrednostima zagađujućih materija u vazduhu. Osim toga, emisija policikličnih aromatičnih ugljovodonika je smanjena kod mešanih briketa u odnosu na pojedinačne biomase. Sadržaj nikotina u produktima sagorevanja manji je od 10mg/kg, što je daleko ispod propisanih vrednosti Evropske unije. Analizom pepela nastalog sagorevanjem briketa utvrđen je sadržaj makro- i mikro-elemenata i zaključeno je da se pepeo može koristiti kao dodatak osnovnom đubrivu. Mešanje duvanskih stabljika s drugim vrstama biomase poboljšalo je njihov energetski i ekološki profil. Najbolje karakteristike pokazala je mešavina duvanska stabljika-piljevina drveta bukve.

Ključne reči: biomasa, obnovljivi izvori energije, stabljike duvana tipa Berlej, elementarna analiza, sadržaj nikotina, toplotna moć, produkti sagorevanja

Naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Nauka o preradi ratarskih sirovina

UDK: 620.952:633.71(043.3)

THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF DIFFERENT TYPES OF BIOMASS ON CHANGES IN ENERGY AND ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BERLEY TYPE TOBACCO STALK BRIQUETTES

Tobacco stalks that remain after harvesting leaves represent a significant part of the total amount of agricultural biomass. Although serious investigations are conducted in Serbia to an increasing extent, the use of these remnants as biofuel is still not promoted, predominantly due to environmental issues, since their combustion products are insufficiently investigated.

Thus the aim of this investigation was, in the first place, to establish the composition of the combustion products and then the elementary composition, the amount of ash, nicotine, and the calorific value of five kinds of briquettes, produced by mixing tobacco stalks with other kinds of biomass (remains of sunflower stovers, wheat straw, corncob, soy straw, and beech saw-dust) in the mass ratio 50:50, without adding any binding agents. The goal was to check if mixing tobacco stalks with other kinds of biomass can improve their technological properties.

It was established that the calorific value of all of the analyzed briquettes exhibits acceptable values according to the SRPS EN ISO 17225-2:2021 standard. All the briquettes satisfy the environmental criteria with regard to emission limitations of nitrous oxides, sulfur oxides, carbon monoxide, and carbon dioxide in accordance with the Regulation on Limiting Values of Polluting Substances in the Air. In addition, the emission of polycyclic aromatic hydrocarbons is reduced in mixed briquettes compared to individual biomasses. The amount of nicotine in combustion products is below 10 mg/kg, which is far below the mandatory values in the European Union. The analysis of ash remaining after the briquettes' combustion has shown that it contains macro and micro-elements which concluded that ash can be used as an admixture to the main fertilizer. Mixing tobacco stalks with other types of biomass has improved the energetic and environmental profile. The best characteristics were obtained by the mixture of tobacco stalks with beech saw-dust.

Key words: biomass, renewable energy, Burley tobacco stalks, elemental analysis, nicotine content, calorific value, combustion products.

Scientific field: Technological engineering

Scientific subfield: Science of field crop processing

UDC: 620.952:633.71(043.3)

SADRŽAJ

UVOD	1
1. Postavka problema i naučni cilj istraživanja.....	3
2. Hipoteze i ključna pitanja.....	5
3. Značaj i predmet istraživanja	6
PREGLED LITERATURE	7
4. Obnovljivi izvori energije (OIE) i biomasa	7
4.1. Biomasa kao obnovljiv izvor energije.....	10
4.2. Zakonska regulativa za OIE i biomasu.....	13
4.3. OIE i biomasa u Srbiji	20
5. Osobine biomase	26
5.1. Definicije, podele i vrste biomase	28
5.2. Sastav i osobine biomase	30
5.2.1. Elementarni sastav biomase	31
5.2.2. Mineralne materije	33
5.2.3. Celuloza i lignin	34
5.2.4. Nikotin.....	34
5.2.5. Karakterizacija biomase	35
5.3. Osobine biomase kao OIE	35
5.3.1. Toplotna moć	35
5.3.2. Produkti sagorevanja	37
5.3.3. Policiklični aromatični ugljovodonici.....	42
5.3.3.1. PAH u briketima od biomase i njihova emisija	44
5.3.3.2. Emisioni faktori PAH jedinjenja nastalih sagorevanjem biomase.....	45
5.3.3.3. Metode za određivanje PAH-ova nastalim sagorevanjem biomase	47
6. Briketiranje.....	47
7. Žetveni ostaci kao sirovina za OIE.....	51
7.1. Stabljika duvana	53
7.2. Glave suncokreta	54
7.3. Pšenična slama.....	55
7.4. Oklasak kukuruza	57
7.5. Sojine stabljike	58
7.6. Piljevina drveta bukve.....	59
EKSPERIMENTALNI DEO	62
8. MATERIJALI I METODE RADA	62
8.1. Materijal.....	63
8.2. Metode.....	64
8.2.1. Priprema uzoraka.....	65

8.2.2. Sadržaj vlage	66
8.2.3. Briketiranje.....	66
8.2.4. Sadržaj pepela u briketima	68
8.2.5. Sadržaj celuloze u briketima	68
8.2.6. Sadržaj lignina u briketima.....	68
8.2.7. Sadržaj nikotina u briketima	68
8.2.8. Sadržaj mineralnih materija u pepelu nakon sagorevanja briketa	69
8.2.9. Elementarna analiza briketa	69
8.2.10. Određivanje toplotne moći.....	69
8.2.10.1. Predviđanje HHV (Higher heating value)	69
8.2.10.2. Eksperimentalno određivanje toplotne moći	70
8.2.11. Određivanje produkata sagorevanja	70
8.2.11.1 Predviđanje zapremine produkata sagorevanja	70
8.2.11.2. Eksperimentalno određivanje produkata sagorevanja.....	70
8.2.12. Određivanje sadržaja nikotina u produktima sagorevanja	72
8.2.13. Određivanje policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) u dimu	72
8.2.14. Statistička obrada podataka	73
9. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA	74
9.1. Rezultati hemijskog sastava briketa.....	74
9.1.1. Sadržaj pepela, lignina i celuloze	76
9.1.2. Elementarni sastav briketa	78
9.2. Toplotna moć ispitivanih briketa	81
9.2.1. Računsko predviđanje toplotne moći (Higher heating value -HHV).....	81
9.2.2. Eksperimentalno određivanje toplotne moći	84
9.3. Produkti sagorevanja	85
9.3.1. Predviđanje produkata sagorevanja	85
9.3.2. Eksperimentalno određivanje produkata sagorevanja.....	87
9.3.3. Sadržaj nikotina u briketima i dimu	91
9.3.4. Određivanje PAH jedinjenja	93
9.4. Sastav pepela nakon sagorevanja briketa.....	99
9.5. Statistička obrada podataka	103
10. ZAKLJUČAK	106
Literatura	109
PRILOG 1	122
Biografija autora	124
Izjava 1.	125
Izjava 2.	126
Izjava 3.	127

Spisak skraćenica:

ANT - antracen

ACE - Acenaftilen

ACY - Acenaften

BaA - benzo(a)antracen

BaP - benzo(a)piren,

BbK -benzo(k)fluoren

BbF - benzo(b)fluoranten

B(ghi)Pe - benzo(ghi)perilen

OIE - Obnovljivi izvori energije

CEI - Central European Initiative / Centralnoevropska inicijativa

CH₄ – Metan

CHP – combined heat and power/ kombinovana toplota i energija

CHR – hrizen

CIAD – Center for Integrated Agricultural Development / Centar za integrisani razvoj poljoprivrede

CIDA – Canadian International Development Agency/ Kanadska internacionalna industrija za razvoj

CO – ugljenik (I)-oksid, ugljen-monoksid

CO₂ – ugljenik (2)-oksid, ugljen-dioksid

CSPCB – Crop Straw Pricing Consultation Board/ Savet za konsultacije o cenama slame

DBahA - dibenzo(ah)antracen

E10 – 10% etanol i 90% benzin

E4ALL – Energy for All Partnership/ Partnerstvo energija za sve

EIRR – Economic Internal Rate of Return / Ekonomska interna stopa prinosa

EPA - United States Environmental Protection Agency/ Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Država

EU – European Union / Evropska Unija

FECC – Foreign Economic Cooperation Center /Centar za spoljnu ekonomsku saradnju

FIRR – Financial Internal Rate of Return /Finansijska interna stopa prinosa

FLU – fluoren

FLT - fluoranten

GDP – Gross Domestic Product /Bruto domaći produkt

GEF – Global Environment Facility/ Globalni fond za životnu sredinu

GHG – Greenhouse Gas/ Gas staklene bašte

GTZ – German Agency for Technical Cooperation/ Nemačka agencija za tehničku saradnju

HC – Hydrocarbons/Ugljovodonici
HH – Household/Domaćinstvo
HHV – Higher heating value
I123cdP - indeno(1,2,3-cd)piren
IFI – International Financial Institution/ Međunarodna finansijska institucija
KfW – Kreditanstalt für Wiederaufbau/ Kreditna agencija za rekonstrukciju
LPG – Liquefied Petroleum Gas/ Tečni naftni gas
MEP – Ministry of Environmental Protection/ Ministarstvo životne sredine
MOA – Ministry of Agriculture/ Ministarstvo Poljoprivrede
MOF – Ministry of Finance/ Ministarstvo Finansija
MOST – Ministry of Science and Technology / Ministarstvo nauke i tehnologije
NAP - Naftalen
NDRC – National Development and Reform Commission/ Nacionalna komisija za razvoj i reformu
N₂O – azot(I)oksid, azot-monoksid
NH₃ – amonijak
NO₂ – azot(IV)-oksid, azot-dioksid
NO_x – azotni oksidi
O&M – Operation and Maintenance/ Rad i održavanje
PHE – fenantren
PAH - Polycyclic Aromatic Hydrocarbons/ Policiklični aromatični ugljovodonici
PYR - piren
SO₂ – sumpor(IV)-oksid, sumpor-dioksid
UNDP – United Nations Development Programme/ Program Ujedinjenih Nacija za razvoj
USAID – United States Agency for International Development / Američka agencija za međunarodni razvoj

Spisak jedinica:

cm – centimetar

GJ – gigadžul

GW – gigavat

GWh – gigavat-čas

Gg – gigagram

ha – hektar

kg – kilogram

km – kilometar

KW – kilovat

kWh – kilovat-čas

m³ – kubni metar

mm – millimetar

MJ – megadžul

TJ – teradžul

mt – metrička tona

mtce – million tona ekvivalentnog uglja

mu – 1/15 hektara

MW – megavat

t – tona

tce – tona ekvivalentnog uglja

toe – tona ekvivalentna nafti

Mten/g –mega tona ekvivalentna nafti/g

Mg/ha – milligram/hektar

Spisak tabela:

Tabela 1. Evropski standardi koji se odnose na čvrsta biogoriva

Tabela 2. Neki standardi Republike Srbije koji se odnose na čvrsta biogoriva

Tabela 3. Najznačajnije specifikacije po standardima za brikete

Tabela 4. Prinosi nekih izvora biomase po godini proizvodnje, t/ha.

Tabela 5. Najpovoljniji hemijski sastav biomase

Tabela 6. Spisak prioriternih PAH jedinjenja

Tabela 7. Emisioni faktori pojedinih vrsta biomasa i ugljeva

Tabela 8. Fizička svojstva drvenih briketa koji se proizvode u Srbiji

Tabela 9. Računsko predviđanje toplotne moći

Tabela 10. Karakteristike MRU

Tabela 11. Karakteristike briketa

Tabela 12. Hemijski sastav ispitivanih briketa

Tabela 13. Elementarni sastav uzoraka briketa i emisijski faktor (%)

Tabela 14. Predviđanje toplotne moći u odnosu na hemijski sastav

Tabela 15. Gornja i donja toplotna moć – eksperimentalni rezultati

Tabela 16. Predviđanje minimalne količine kiseonika i vazduha i zapremine produkata sagorevanja

Tabela 17. Sadržaj dimnih gasova tokom sagorevanja.

Tabela 18. Emisije CO₂, CO, NO_x i NO preračunate na 11% O₂

Tabela 19. Sadržaj nikotina u ispitivanim uzorcima

Tabela 20. Koncentracioni nivoi emisije PAH u dimu briketa

Tabela 21. Procenat zastupljenosti pojedinačnih PAH jedinjenja u ukupnoj emisiji 16 PAH jedinjenja

Tabela 22. PAH dijagnostički odnosi izračunati za analizirane brikete

Tabela 23. Analiza pepela

Tabela 24. Srednji sadržaj pepela, toplotna moć i elementarni sastav različitih tipova briketiranih biomasa sa standardnom devijacijom (\pm SD)

Tabela 25. Pirsonov koeficijent korelacije za donju toplotnu moć u odnosu na sadržaj pepela i elemenata u briketima

Tabela 26. Srednja vrednost sadržaja dimnih gasova tokom sagorevanja briketa sa standardnom devijacijom (\pm SD)

Spisak slika:

Slika 1. Potrošnja energije od 1982. godine do 2007. godine u svetu

Slika 2. Solarni paneli

Slika 3. Vetropark „Alibunar“

Slika 4. Projekcija Vlade Republike Srbije za izgradnju kapaciteta za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije za period 2015-2030.

Slika 5. Raspodela ukupnog raspoloživog potencijala OIE u Srbiji prema projektu EU

Slika 6. Geografska raspodela biomase u Srbiji, levo: površine pod šumom, desno: obradivo zemljište

Slika 7. Podela alternativnih energenata prema Beloj knjizi elektroprivrede Srbije

Slika 8. Raspodela različitih izvora biomase

Slika 9. Prikaz materijala koji se mogu koristiti za dobijanje energenata na bazi biomase u čvrstom, tečnom i gasovitom stanju

Slika 10. Hemijski sastav biomase

Slika 11. Hemijska struktura nikotina

Slika 12. Metode za karakterizaciju biomase

Slika 13. Strukturne formule 16 prioriternih EPA PAH-ova

Slika 14. a) Klipna presa, b) kalup sa pužem

Slika 15. Oprema za sušenje usitnjene biomase

Slika 16. Zavisnost toplotne moći od smanjenja vlažnosti biomase tokom sušenja

Slika 17. Redosled postupaka u postrojenju za briketiranje i njegovi delovi

Slika 18. Vrste baliranja

Slika 19. Ukupna količina biljnih ostataka prema podacima iz izveštaja projekta

Slika 20. Prosečni prinos suncokreta na 100ha obradive površine

Slika 21. Prosečni prinos pšenice na 100ha obradive površine

Slika 22. Prosečni prinos kukuruza na 100ha obradive površine

Slika 23. Ostaci soje u sirovom i osušenom stanju

Slika 24. Seckalice za drvo

Slika 25. Mobilna seckalica u obliku bubnja

Slika 26. Priprema otpadnog drveta

Slika 27. Dijagram toka proizvodnje, pripreme i ispitivanja briketa

Slika 28. Lokaliteti sa kojih su uzimani materijali za uzorke tokom istraživanja

Slika 29. Briketirka

Slika 30. Principijska blok šema briketirke

Slika 31. Peć sa MRU uređajem

Slika 32. Izlaz briketa na izlazu iz briketirke

Slika 33. Sadržaj celuloze, lignina i pepela ispitivanih briketas

Slika 34. Elementarni sastav briketa

Slika 35. Predviđanje toplotne moći

Slika 36. Gornja i donja toplotna moć

Slika 37. Sadržaj CO₂ u produktima sagorevanja briketa od biomase, preračunat na 11% O₂

Slika 38. Sadržaj CO u produktima sagorevanja briketa od biomase, preračunata na 11% O₂

Slika 39. Sadržaj azotnih oksida (NO i NO_x), preračunatih na 11% O₂

Slika 40. Izgled filtera nakon sagorevanja briketa

Slika 41. Raspodela pojedinačnih PAH-ova u ispitivanim biomasama.

Slika 42. Raspodela PAH jedinjenja na osnovu broju prstenova.

Slika 43. Izgled pepela nakon sagorevanja ispitivanih briketa.

UVOD

„Istraživanje i korišćenje obnovljive energije je jedini način da se nosimo sa sve težim problemima nestašice energije i zagađenjem životne sredine, i jeste takođe jedini put ka održivom razvoju našega društva.”

Qingfeng Zhang, “Knjiga energije ruralne biomase, 2020“

Značaj obnovljivih izvora energije, na primer biogoriva, bio je jasan još u vreme kada svest o ograničenosti fosilnih goriva i o zagađenju životne sredine nije postojala u ovoj meri u kojoj postoji danas. U drugoj polovini devetnaestog veka, nemački inženjer i pronalazač, Rudolf Dizel (Rudolf Diesel) je izumeo motor sa unutrašnjim sagorevanjem i prvi put u istoriji uspeo da pokrene mašinu na mehanički pogon pomoću biljnog ulja, ulja od kikirikija (Nitske, 1965), čime je najavio pojavu i značaj biogoriva. Po njegovim originalnim rečima: „Upotreba biljnog ulja kao goriva danas može izgledati beznačajno. Ali takvi proizvodi mogu vremenom postati jednako važni kao kerozin ili današnji proizvodi na bazi katrana“. Danas se 10. avgust slavi kao svetski dan biodizela a širom sveta je upotreba biomase za dobijanje energije tema od velikog značaja na individualnom i društvenom nivou (Zhang et al., 2010).

Tokom vremena, oslanjanje na obnovljive izvore energije kontinualno dobija na značaju zbog mnoštva razloga, od kojih su neki: osiromašenje rezervi fosilnih goriva, posledice globalnog zagrevanja i efekata staklene bašte, potreba za ekonomskom i energetsom nezavisnošću na globalnom, državnom i pojedinačnom nivou. Intenzivnije oslanjanje na obnovljive izvore energije je deo plana i zahteva, kako u okviru globalne, tako i u okviru nacionalnih strategija razvoja.

Kao jedna od sedamnaest članica Centralnoevropske inicijative (CEI, Central European Initiative), Srbija je zemlja od koje se u okviru akcionog plana za period 2021-2023 očekuje da doprinese realizaciji njenih glavnih ciljeva, a to su stimulisanje zelenog rasta i izgradnja pravednih društava (www.cei.eu, 2021). Za podsticanje zelenog rasta, CEI će se baviti finansiranjem i podržavanjem aktivnosti koje se sprovode na održiv način i sa efikasnim korišćenjem resursa, a obuhvataju:

- ▶ Cilj 1.1: Jačanje transportnih mreža
- ▶ Cilj 1.2: Podsticanje inovacija i preduzetništva
- ▶ Cilj 1.3: Povećanje otpornosti na klimu
- ▶ Cilj 1.4: Promovisanje čiste energije
- ▶ Cilj 1.5: Podršku cirkularnoj ekonomiji

► Cilj 1.6: Podsticanje pametnih zajednica

Promovisanjem čiste energije (cilj 1.4) trebalo bi da se smanji neefikasno korišćenje prirodnih resursa, kao i obilna potrošnja raznih neadekvatnih izvora energije koji ugrožavaju ekonomsku sigurnost, proizvode atmosfere gasove, posebno ugljen-dioksid, što rezultira stvaranjem efekta staklene bašte. Da bi postale otporne na klimatske promene, zemlje članice CEI treba da se prilagode i investiraju u čistu energiju i tehnologije sa niskom emisijom štetnih gasova, kao i u pametnu infrastrukturu za čistu energiju i sisteme za skladištenje zelene energije. To podrazumeva fokusiranje na veće korišćenje obnovljivih izvora energije. U akcionom planu se ističe da je bioenergija cilj koji najviše obećava iz najmanje dva razloga: a) ogroman iznos organskih nusproizvoda koje obezbeđuje poljoprivreda i šumarstvo i b) mogućnost da zemlje koje ne mogu da računaju na tehnologiju visokorazvijenih industrija mogu da koriste konvencionalne tehnologije.

Podrška cirkularnoj ekonomiji (cilj 1.5) obuhvata promovisanje aktivnosti koje su u skladu sa širenjem bioekonomije, razvojem održive gradnje i resursno efikasne proizvodnje. Pri tome je bioekonomija posebno, veoma važan deo cirkularne ekonomije. Prema CEI, razmena znanja o transformisanju povećane potražnje za biomasom u održiva rešenja u celom lancu vrednosti – od biomase do proizvoda na bazi biologije i do potrošača – trebalo bi da bude među prioritarnim aktivnostima zemalja članica. U tom smislu, CEI će podržavati napore svojih zemalja da se razvijaju strategije i alati za promovisanje korišćenja obnovljivih i održivih sirovina za materijale i energiju. CEI će podržati razvoj bioekonomskih tehnologija i stvaranje regionalnih tržišta biomase, kao i promovisanje koridora za održivu mobilizaciju biomase i nusproizvoda. Zatim, podržaće preispitivanje upravljanja sistemom otpada u državama članicama CEI prema principima cirkularne ekonomije, minimizaciju otpada i razvoj inovacija u obradi otpadnih materija.

Sa druge strane, rezultati dosadašnjih istraživanja na temu smanjenja emisije ugljen-dioksida zamenom fosilnih goriva energentima na bazi drveta, što jeste među navedenim akcijama u okviru ciljeva CEI, ukazuju da posledice takvog prelaza ne moraju biti samo pozitivne (Sterman et al., 2018). Model za dinamičku analizu životnog ciklusa bioenergije, prikazan u pomenutom istraživanju, prati količine ugljenika u tokovima između atmosfere, biomase i zemljišta. Prema ovim autorima neposredni uticaj zamene drveta za ugalj je zapravo povećanje atmosfere SO₂, jer je efikasnost sagorevanja i prerade drveta manja od efikasnosti uglja. Da bi se ta razlika u emisiji neutralisala potrebno je između 44 i 104 godine nakon seče, u zavisnosti od vrste drveća, pod pretpostavkom da zemljište ostaje pod šumom. Pri tome, plantaže brzorastućeg bora nemaju istu emisiju kao prirodne šume, što dodatno otežava postizanje neutralnosti emisije SO₂ (Sterman et al., 2018).

Sažet pregled obimnijih istraživanja koja se odnose na biomasu generalno, (što je dosta široka oblast, biomasa je uskladištena energija Sunca u hemijskom obliku u biljnom i životinjskom svetu i može služiti kao stočna hrana, izvor vlakana, goriva i đubriva), daje opis trenutnog stanja tehnologije u toj oblasti, kriterijume za dizajn proizvoda na bazi biomase i smernice za budući razvoj (Rathore and Panwar, 2021).

Evidentno je da, u oblasti koja se odnosi na obnovljive izvore energije, savremeno društvo ima potrebe za energijom koje ni tehnologija zasnovana na fosilnim gorivima ni tradicionalna tehnologija ne mogu zadovoljiti na pravi način bez dodatnih saznanja. Ta činjenica je motiv za istraživanja i rad na ovoj disertaciji.

1. Postavka problema i naučni cilj istraživanja

Na globalnom nivou, biomasa je prepoznata kao alternativni izvor energije i istraživanja su usmerena na usavršavanje procesa njenog iskorišćenja na način da bude što bolja zamena ili dopuna fosilnim gorivima (Kuthe et al., 2021).

Žetveni ostaci, kao jedan od izvora biomase, se na globalnom nivou ne koriste efikasno, što je posebno izraženo u zemljama u razvoju (Liu et al., 2014). Činjenica je da se žetveni ostaci često ne koriste za dobijanje energije već se uništavaju, nekontrolisano i štetno po životnu sredinu, ili se uništavaju kontrolisano u skladu sa zakonski propisanim uslovima, ali skupo i nerentabilno po proizvođače, koji ne mogu uvek da se oslone na garantovane subvencije.

U poljoprivredi, na globalnom nivou, proizvodnja duvana predstavlja značajan udeo ukupne proizvodnje. Pod duvanom je preko 3,4 miliona hektara, od čega se 2 miliona hektara nalazi u Aziji, 0,6 miliona hektara u Africi a 0,1 milion hektara u Evropi. Njegovu proizvodnju karakteriše velika količina biomase i aktivna istraživanja su usmerena na pronalaženje mogućnosti za bolje iskorišćenje tih žetvnih ostataka nakon berbe duvana, ne samo za potrebe proizvodnje novih energenata, nego i zato što biomasa nastala kao otpad pri proizvodnji duvana može biti dobar izvor bioaktivnih supstanci, na primer fenola i flavonoida (Sifola et al., 2021).

U Republici Srbiji je prepoznat značaj biomase ne samo u primarnoj poljoprivrednoj proizvodnji, već i u izvorima kao što su ostaci iz prerade poljoprivrednih proizvoda (Jevtić i Ivkov, 2021). Pokazano je da se ostaci prerađivačke industrije voća mogu koristiti kao potencijalni gorivi materijal. Međutim, oni nisu pogodni kao samostalni energetska izvor već u kombinaciji sa ugljem, i na taj način mogu doprineti da se dnevne količine potrebnog visokokvalitetnog uglja mogu smanjiti i do 30% (Đević et al., 2008). Mogućnost korišćenja koštica višnje kao biogoriva, u kotlovima domaće proizvodnje, sa visokim stepenom korisnosti (do 94%, tip Šukoplam VENT, proizvođač Šukom iz Knjaževca), pokazala se kao perspektivna zbog dobrog energetskog potencijala te vrste biomase (22 MJ/kg za suve koštice višnje). Važna je i činjenica da oblik i dimenzije koštica mogu da se koriste u pećima na pelet direktno bez ikakve dodatne obrade. Međutim biomasa kao energent uglavnom, po pravilu, ne može efikasno da se koristi bez prethodne obrade (Petrović i sar., 2020, Marković i sar., 2020).

Novija istraživanja pokazuju da, i pored činjenice da je biomasa u Republici Srbiji prepoznata kao energent a ukupan potencijal biomase značajan, njeno iskorišćenje nije dovoljno. U industriji se još uvek koriste zastarela tehnološka rešenja bez posebne regulacije procesa, a kogenerativna postrojenja, postrojenja u kojima je moguća kogeneracija enegije – istovremena proizvodnja električne i korisne toplotne energije u jedinstvenom procesu, još uvek su retkost (Đurišić i Nakomčić-Smaragdakis, 2022).

Zahvaljujući mogućnostima koje pruža podneblje i trenutnom stepenu razvoja poljoprivrede u našoj zemlji, postoje značajni izvori drugih vrsta biomase. Neki od njih su oklasci kukuruza, pšenična slama, sojine stabljike, ostaci glava suncokreta i piljevina. Ideju o proizvodnji energenata kombinacijom otpada poljoprivrede i uglja, razmatrali su, između ostalog i Đević et al. (2008). Ova ideja je, u istraživanju vezanom za izradu ove disertacije, unapređena u ideju da se u proizvodnji gorivnih briketa kombinuju žetveni ostaci bez dodavanja uglja.

Osnovni problem ovog istraživanja nije samo korišćenje duvanskih ostataka za dobijanje energije. Ovo istraživanje se bavi problemima koji postoje u slučajevima kada se duvanska biomasa

koristi za dobijanje energije ali na način koji nije optimalan, u odnosu na životnu sredinu, zbog štetnih supstanci koje u njemu postoje, prvenstveno nikotina. Cilj istraživanja je da se utvrdi da li je i pod kojim uslovima moguća eksploatacija ostataka biomase pri proizvodnji duvana ali tako da kvalitet dobijenih proizvoda od duvanske biomase (konkretno u ovom istraživanju kvalitet proizvedenih briketa), ne bude doveden u pitanje sa tačke gledišta zaštite životne sredine i ljudskog zdravlja.

Osnovna ideja od koje se polazi prilikom rešavanja ovog problema zasnovana je na činjenici da će sadržaj nikotina u energetske briketima od stabljika duvana, koje ostaju nakon berbe listova, biti manji ako se sastav briketa promeni tako da sadržaj duvanskog otpada u njima ne bude 100% već u odnosu 50:50 sa nekom drugom vrstom poljoprivredne biomase. Time se istovremeno podstiče upotreba žetvenih ostataka drugih vrsta biomase, i unapređenje proizvodnje drugih poljoprivrednih grana, nezavisno od duvanske industrije.

Ciljevi ovog istraživanja su:

- Fabrikacija pilot serije briketa od biomase različitih žetvenih ostataka,
- Utvrđivanje hemijskih karakteristika svih vrsta napravljenih briketa,
- Utvrđivanje toplotne moći briketa,
- Utvrđivanje, na osnovu toplotne moći briketa, da li se dobijeni briket može koristiti kao biogorivo i u kojoj meri je u skladu sa standardima koji se odnose na parametre čvrstih biogoriva,
- Eksperimentalno određivanje produkata sagorevanja,
- Utvrđivanje, na osnovu određenih produkata sagorevanja, da li je sagorevanje briketa ekološki prihvatljivo,
- Uporedna analiza dobijenih rezultata energetske i ekološke karakteristika ispitivanih uzoraka sa karakteristikama ugljeva i peletom, koji se koriste kao izvor energije u Republici Srbiji i svetu, kao i sa karakteristikama briketa od čistih vrsta biomase,
- Na osnovu izvedene komparativne analize, definisanje smernica za dobijanje proizvoda koji će imati optimalne energetske i ekološke osobine.

2. Hipoteze i ključna pitanja

Polazne hipoteze na kojima se bazira izrada predložene doktorske disertacije su:

1. Poljoprivredna biomasa predstavlja značajan deo obnovljivih izvora energije. Za razliku od ostalih oblika poljoprivredne biomase, stabljike duvana još uvek se nedovoljno koriste. Ispitivanja i kombinacija sa drugim oblicima poljoprivredne biomase povećala bi i upotrebu duvanske stabljike i ukupni potencijal poljoprivredne biomase u Srbiji.
2. Proizvodnja briketa rešila bi problem skladištenja biomase, i povećala efikasnost sagorevanja.
3. Duvanske stabljike, kao i ostale vrste biomase, sagorevanjem produkuju manju količinu CO, CO₂, SO_x i NO_x, u odnosu na fosilna goriva. Ispitivanjem njihovih mešavina došlo bi se do optimalne kombinacije, koja doprinosi kvalitetu životne sredine.
4. Stabljike duvana sadrže određenu količinu nikotina. Mešanjem stabljike duvana sa drugim vrstama biomase, dodatno će se smanjiti sadržaj nikotina u briketima, kao i u produktima sagorevanja, čime se povećava ekološka prihvatljivost proizvoda.
5. Duvanska stabljika i ostale vrste poljoprivredne biomase imaju približno isti hemijski sastav i toplotnu moć. Njihovim mešanjem i uporednim ispitivanjem našla bi se optimalna kombinacija koja bi imala prihvatljivu toplotnu moć da ispuni kriterijume za komercijalnu upotrebu.
6. Pepeo koji zaostaje nakon sagorevanja briketa ispitivanih mešavina biomase mogao bi da se primeni kao dodatak đubrivu za gajenje različitih poljoprivrednih useva.

3. Značaj i predmet istraživanja

Ispitivanja urađena za potrebu ovog istraživanja imaju višestruki značaj:

▶ Sa ekološkog stanovišta: Dodatkom drugih oblika biomase briketima od duvanske stabljike indikativno je da će se izvršiti smanjenje štetnih produkata sagorevanja;

▶ Sa ekonomskog stanovišta: Zaključci izvedeni na osnovu izvedenih istraživanja otvaraju mogućnost za dobijanje vrednog proizvoda sa optimalnim karakteristikama, od značaja za energetiku na domaćem i svetskom tržištu;

▶ Sa naučnog stanovišta: Otvaraju se i mogućnosti za dalja ispitivanja, u smeru kombinovanja više od dve vrste biomase sa različitim međusobnim odnosima, ali i u smeru složenijih multidisciplinarnih istraživanja čiji zadaci bi se uklopili u više strateških ciljeva akcionog plana Republike Srbije i Evropske unije.

Aktivnosti koje bi bile u skladu sa ciljevima zadatim u okviru istraživanja vezanih za izradu ove disertacije, su redom:

- Karakterizacija materijala i metoda potrebnih za fabrikaciju pilot serije briketa od biomase sa različitim sastavima, kao i fabrikacija planiranih briketa,
- Eksperimentalno određivanje hemijskih karakteristika svih vrsta napravljenih briketa,
- Eksperimentalno određivanje toplotne moći briketa,
- Analiza dobijenih rezultata radi utvrđivanja, na osnovu toplotne moći briketa, da li se dobijeni briket može koristiti kao biogorivo i u kojoj meri je u skladu sa standardima koji se odnose na parametre čvrstih biogoriva,
- Eksperimentalno određivanje produkata sagorevanja,
- Analiza dobijenih rezultata radi utvrđivanja, na osnovu količine određenih produkata sagorevanja, da li je sagorevanje briketa ekološki prihvatljivo,
- Usporedna analiza dobijenih rezultata energetskih i ekoloških karakteristika ispitivanih uzoraka sa karakteristikama ugljeva i peletom, koji se koriste kao izvor energije u Republici Srbiji i svetu, kao i sa karakteristikama briketa od čistih oblika biomase,
- Sistematizacija i generalizacija izvršenih istraživanja i dobijenih rezultata radi definisanja smernica za dobijanje proizvoda koji će imati optimalne energetske i ekološke osobine, kao i radi definisanja mogućih pravaca za dalja istraživanja.

PREGLED LITERATURE

4. Obnovljivi izvori energije (OIE) i biomasa

“Upotreba biljnog ulja kao goriva danas može izgledati beznačajno.

Ali takvi proizvodi mogu vremenom postati jednako važni

kao kerozin i ovi današnji proizvodi na bazi uglja.”

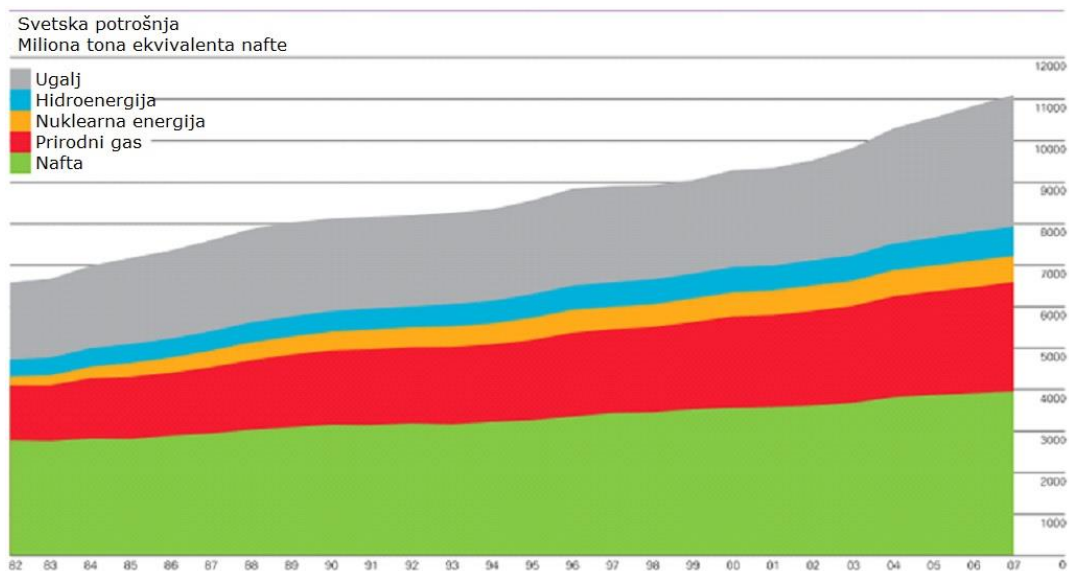
Rudolf Diesel

Svi izvori energije, a to se, sem obnovljivih izvora energije (OIE) odnosi i na sva fosilna goriva, direktno ili indirektno, vode poreklo od sunčeve energije. Razlika između OIE i fosilnih goriva je u usklađenosti između njihove potrošnje i akumulacije. Akumulacija energije fosilnih goriva se meri stotinama hiljada, pa i milionima godina, a potrošnja je takva da ima izgleda da se mogu iscrpeti za manje od hiljadu godina.

Mogućnost da se do energije dođe na alternativne načine, a ne upotrebom fosilnih goriva, koja je nekada bila rezultat radoznalosti i eksperimentisanja, danas postaje neminovnost i potreba na globalnom nivou. Glavni razlozi za to su:

- potencijalna situacija da se fosilna goriva vremenom mogu iscrpeti do te mere da ih u prirodi ne bude dovoljno za ljudske potrebe i
- poguban uticaj upotrebe fosilnih goriva na životnu sredinu zbog nuspojave u obliku štetnih gasova koji dovode do efekta staklene bašte, globalnog otopljanja i posledično klimatskih promena.

Na Slici 1 prikazano je u kojoj meri raste potrošnja energije sa vremenom, u svetskim razmerama. Data je potrošnja energije u svetu za vremenski period od 1982. godine do 2007. godine, u milionima tona ekvivalenta nafte za ugalj, hidroenergiju, nuklearnu energiju, prirodni gas i naftu. Podaci su objavljeni u Beloj knjizi Elektroprivrede Srbije (Marković i sar., 2020). Kao što se vidi na prikazanoj slici, trend svih energenata je rastući, s tim da najbrže raste potrošnja uglja, zatim ide rast potrošnje hidroenergije, nakon njega rast potrošnje nuklearne energije, posle kojeg dolazi rast prirodnog gasa i na kraju, najmanji je rast potrošnje nafte. Međutim iako nafta kao energent pokazuje najmanju stopu rasta u potrošnji, njena ukupna potrošnja je i dalje najveća odnosno, nafta je i dalje vodeće svetsko gorivo.



Slika 1. Potrošnja energije od 1982. godine do 2007. godine u svetu (Marković i sar., 2020).

Alternativa upotrebi fosilnih goriva su obnovljivi izvori energije. Pojam OIE predstavlja izvore koji se mogu koristiti za dobijanje toplotne ili električne energije, a koji se u prirodi obnavljaju, pri čemu obnavljanje energije može biti periodično ili neprekidno.

OIE imaju niz prednosti u odnosu na konvencionalne izvore energije. U pogledu dostupnosti predstavljaju energetska stabilnost. U pogledu ekologije, koristeći OIE dobijamo čistu energiju, koja nastavlja ciklus kruženja ugljenika u prirodi, a istovremeno ga ne povećava. Na ovaj način, OIE štite životnu sredinu i usporavaju klimatske promene. Korišćenje OIE doprinosi razvoju privrede i ekonomije, a istovremeno daje šansu i za nova zapošljavanja.

Najznačajniji OIE su solarna energija, hidroenergija, geotermalna energija, energija vetra i biomasa.

Solarna energija je posledica više procesa koji se odigravaju unutar Sunca, od kojih je najvažniji proces transformacije vodonika u helijum, pri čemu se gubi jedan deo materije ali se proizvodi energija. Tako stvorena energija u unutrašnjosti sfere Sunca, na temperaturama od nekoliko miliona stepeni, emituje se u kosmos i mi je primamo u obliku svetla i toplote, a nakon konvertovanja u različitim solarnim sistemima ona se može koristiti za dobijanje toplotne ili električne energije. Na Slici 2 prikazani su solarni paneli u kojima se odvija konverzija energije sunčevog zračenja u električnu energiju a koji se uz invertore, kontrolere, solarne baterije mogu koristiti u okviru složenijih sistema: montirani na krovove radi snabdevanja domaćinstava energijom, postavljeni u polja radi pokretanja sistema za navodnjavanje ili u okviru solarnih elektrana.



Slika 2. Solarni paneli (www.solarni-paneli.co.rs).

Hydroenergija obezbeđuje preko 16% ukupne svetske proizvodnje električne energije. Ljudska civilizacija odavno koristi snagu vode pretvarajući njenu kinetičku i/ili potencijalnu energiju, kada se kreće i/ili menja visinu, u koristan rad ili električnu energiju. Međutim, hidropotencijal se koristi i na mnogo drugih načina (morske struje, temperaturna razlika po dubini, plime i oseke, talasi, i salinitet). U poslednjih desetak godina proizvodnja električne energije se povećava, korišćenjem hidropotencijala, u proseku za skoro 3% godišnje. Tekuća instalirana snaga hidroelektrana u svetu je preko milion megavata. Oko 70% ukupno proizvedene električne energije iz svih obnovljivih izvora energije se dobija korišćenjem hidropotencijala (*ec.europa.eu*).

Geotermalna energija je energija akumulirana u samoj Zemlji. Udeo geotermalne energije u globalnoj proizvodnji električne energije je relativno mali i iznosi oko 0,3%. Ipak, u nekim zemljama je vrlo značajan: 40% u Keniji, 25% na Islandu, 18% na Novom Zelandu, što je pokazatelj njihovog prirodnog potencijala. Npr., Island se nalazi na vrućoj tački iznad čvora u kom se stiču tri litosferne tektonske ploče (Oreskes and LeGrand, 2003). Danas postoje tehnološke mogućnosti za eksploataciju energije stena do dubine od 10 km. Ako uzmemo u obzir mogućnost iskorišćenja ove energije do dubine od 3 km, njene globalne zalihe su 2 000 puta veće od rezervi uglja. Procenjuje se da je tehnički potencijal za proizvodnju električne energije takav da geotermalni izvori mogu zadovoljiti od 10 do 100 puta veću proizvodnju električne energije od današnje. Rasprostranjeno korišćenje geotermalne energije, izvodljivo je čak i u zemljama sa niskim temperaturnim potencijalom, za grejanje i klimatizaciju zgrada. Rad ovakvih sistema je analogan radu klima uređaja.

Energija vetra se koristi tako što se kinetička energija vazduha pretvara u mehaničku energiju korišćenjem rotora sa lopaticama. Nekada se ova mehanička energija koristila direktno (za npr. mlevenje žitarica ili za navodnjavanje) ali se danas, uglavnom, koristi za pokretanje generatora koji zatim proizvode električnu energiju. Procenjeno je da je tehnički potencijal energije vetra 40 puta veći od trenutne potrošnje energije. Vetro-farme se mogu postavljati na kopnu ali i na morskoj površini. Samo u 2017-oj godini kapacitet vetroelektrana u svetu se povećao za oko 10% i dostigao vrednost od oko 540 000 MW (Kim and Hur, 2021). U Srbiji postoji 9 aktivnih vetroparkova, 4 u izgradnji i 15 vetroparkova u planu. Vetropark „Alibunar” snage 42 MW, sa 21 turbinom, koji energijom vetra snabdeva 38 000 domaćinstava od septembra 2018. godine prikazan je na Slici 3.



Slika 3. Vetropark „Alibunar“(www.zeleniminuti.rs).

Biomasa, živa (ili donedavno živa) materija, biljnog ili životinjskog porekla, smatra se obnovljivim izvorom energije jer se ona fizički obnavlja razvojem sledeće generacije živih organizama. Iako se pri dobijanju energije iz biomase, bez obzira na tehnologiju koja se koristi, oslobađa ugljen-dioksid (CO₂), biomasa se smatra za CO₂ neutralnu. Biljke upotrebljavaju CO₂ za fotosintezu i za rast, pa ne postoji neto prinos, a time ni neto povećanje koncentracije ovog gasa u atmosferi.

Naučna zajednica je jedinstvena u stanovištu da su izvori fosilnih goriva ograničeni i da je oslanjanje na alternativne izvore energije neminovno. Ta jedinstvenost ne postoji kada je u pitanju način na koji se alternativni izvori energije uvode u praksu. Reč čista energija ili zelena energija je često u upotrebi kada se govori o alternativnim izvorima energije, obnovljivim izvorima energije, i naravno, o biomasi. Međutim, istraživanja ukazuju na to da nije svaka alternativna energija ili energija dobijena iz obnovljivih izvora jednako zelena, niti jednako čista. Konkretno, merenja pokazuju da je emisija ugljenika nastala upotrebom šumske biomase veća od emisije nastale upotrebom fosilnih goriva (Sterman et al., 2018).

Kompleksna pitanja, u kojima se uzima u obzir ukupan energetske bilans između primarne energije utrošene za proizvodnju uređaja i sistema za eksploataciju prirodnih izvora obnovljive energije (energije sunca, vetra, vode, biomase) i energije koja se kasnije može takvim sistemima i uređajima dobiti, još uvek su predmet aktivnih naučnih istraživanja (*energetski.portal.rs*).

Ono što je sigurno to je da OIE ne mogu pokriti u potpunosti energetske potrebe na globalnom nivou. Ali u okviru jedne industrijske grane, kao što je pokazano na primeru upotrebe žetvenih ostataka prilikom proizvodnje kukuruza, pirinča, duvana, pamuka i manioke za potrebe cementne industrije države Malavi u istočnoj Africi, upotreba žetvenih ostataka može u potpunosti zameniti fosilna goriva (Gondwe et al., 2017). Država Malavi je 2018-e godine bila na sedmom mestu po proizvodnji duvana u svetu (Berbeć and Matyka, 2020).

I u okviru istraživanja urađenih tokom izrade ove disertacije fokus je bio na biomasi, pre svega stabljikama duvana, kao obnovljivom izvoru energije, koja bi mogla da poveća autonomnost poljoprivrede u Srbiji, tako što bi se koristila kao energent za npr. sušenje nekih ratarskih proizvoda.

4.1. Biomasa kao obnovljiv izvor energije

Biomasa, danas, učestvuje sa 15% u ukupnoj potrošnji energije. Ovaj udeo je veći u zemljama u razvoju nego u razvijenim zemljama. U zemljama u razvoju biomasa je primarni izvor energije u domaćinstvima, dok se u industrijalizovanim zemljama biomasa koristi za dobijanje električne energije. Vodeće zemlje u proizvodnji električne energije iz biomase su: SAD, Nemačka, Kina, Brazil, Japan, Velika Britanija i Indija (*ec.europa.eu*).

Savremena istraživanja o primeni biomase kao obnovljivog izvora energije moraju biti multidisciplinarna, tako da obuhvataju modele koji predstavljaju različite međupovezane komponente integrisanog poljoprivredno-energetsko-ekološko-ekonomskog sistema. Pri tome, nije retkost da analize pokažu da je presudan faktor za uspešnu namensku proizvodnju energenata na bazi biomase ekonomski faktor – količina i selektivnost državnih podsticaja i subvencija za odabrane biljne vrste. Primer za to je Tajvan, gde je procenjeno da je optimalna biljna vrsta za proizvodnju biomase suncokret (Lai et al., 2019).

Istraživanja u oblasti kao što je energetika, privredna grana od vitalnog značaja za funkcionisanje države kao sistema, nisu dovoljna sama po sebi. Osim svojih rezultata, istraživanja ne mogu da ostave trag i dovedu do napretka na sistemskom nivou, bez istovremene primene i

podrške odgovarajuće pravne regulative. Zbog toga će u ovom poglavlju, nakon pregleda rezultata postojećih istraživanja u oblasti primene biomase kao alternativnog izvora energije, biti dat i pregled zakona o korišćenju biomase i kratak osvrt na stanje u toj oblasti u Srbiji.

Istraživanje primene biomase kao obnovljivog izvora energije, sa posebnim naglaskom na primeni ruralne biomase, kako u zemljama u razvoju, tako i u nehomogeno industrijalizovanim zemljama kao što je Kina, prepoznato je kao jedan od ključnih načina opstanka savremenog društva, od izuzetnog značaja na globalnom nivou (Zhang et al., 2010). Pregledom literaturnih podataka, uočeno je da su duvanske stabljike ispitivane kao energetske gorivo (Peševski et al., 2010; Mijailović et al., 2014; Malnar et al., 2015a, Malnar et al., 2015b, Malnar et al., 2016) ali njihove karakteristike nikad nisu ispitivane u kombinaciji sa drugim oblicima biomase, što je predmet istraživanja i originalnost ove doktorske disertacije.

Istraživanja o doprinosu biomase budućem globalnom snabdevanju energijom i o budućoj dostupnosti šumskog drveta i ostataka iz poljoprivrede i šumarstva nemaju koherentne zaključke po pitanju u kojoj meri je bioenergija dobra opcija za ublažavanje klimatskih promena u energetskom sektoru (Berndes et al., 2003). To je uglavnom zbog različitih faktora koji su prilikom istraživanja uzeti u obzir ili zbog različitog pristupa, kao što su npr: korišćenje zemljišta za proizvodnju hrane (energija ili hrana), biodiverzitet, očuvanje zemljišta i prirode i sekvestracija ugljenika, koji se mogu posmatrati kao konkurencija za resurse ili kao sinergija različitih upotreba postojećih resursa.

Korišćenje poljoprivredne biomase smanjuje zagađenje okoline, smanjuje potrebu za korišćenjem veštačkih đubriva, smanjuje uvoz energenata i stavlja akcenat na razvoj ruralnih područja. Da bi poljoprivredna biomasa bila zastupljenija kao energent, potrebno je da tehnologija proizvodnje proizvoda na bazi biomase, biouglja i biogoriva uopšte bude razvijenija, i dostupna, kako na pojedinačnom tako i na sistemskom nivou.

Literaturni podaci pokazuju da se biomasa može koristiti na različite načine: od direktnog sagorevanja (Bareschino et al., 2021) i kompostiranja (Kopčić et al., 2014), do tehnološki sofisticiranih metoda obrade kao što su fermentacija hidrolizata ljuske suncokretovog semena u etanolu pomoću kvasca *Pichia stipitis* (Telli-Okur and Eken-Saraçoğlu, 2008), pirolitička poligeneracija tj., istovremena proizvodnja više visokovrednih proizvoda od otpada duvanske industrije (Chen et al., 2016), spora piroliza koštica kokosovog oraha na 500 °C (Lee et al., 2013), i mnoge druge.

Prepreka većem korišćenju poljoprivredne biomase leži u troškovima sakupljanja, transporta i čuvanja. Jedan od popularnijih načina korišćenja je briketiranje (Brkić i Janić, 2008). Briketiranje poljoprivredne biomase ima niz pogodnosti: pre svega smanjuju se troškovi transporta, smanjuje se zapremina biomase, što dovodi do smanjenja potreba za skladištenjem. Istovremeno, povećava se efikasnost sagorevanja u odnosu na sagorevanje nebriketiranog materijala. Sagorevanje briketa poljoprivredne biomase ekološki je opravdano sa aspekta zaštite životne sredine jer produkuje manji sadržaj štetnih materija u odnosu na sagorevanje konvencionalnih goriva. Poseban značaj ogleda se u činjenici da sagorevanjem biomase ne dolazi do povećanja ugljen-dioksida, dok je produkcija sumpornih oksida zanemarljiva (Brkić i sar., 2007).

Iako je u većini pisanih izvora glavni fokus istraživanja primena žetvenih ostataka duvana (i ostalih izvora biomase) za alternativne izvore energije, ima i drugih primera. Istraživanja pokazuju da vrste duvana tipa Berlej i Kentaki poseduju značajne količine polifenola i flavonoida, konkretno 4,6 i 8,1 grama polifenola po kilogramu preostale biomase (Sifola et al., 2021). Ovo pokazuje da je upotreba žetvenih ostataka pri proizvodnji duvana višestruka. Osim za proizvodnju energenata, mogu se koristiti i u farmakološkoj industriji gde se od njih može dobiti bioaktivna supstanca od velikog značaja.

Ispitivanja energetske karakteristike duvana kao biomase su vršena za duvan *Nicotiana tabacum* L. proizveden u istočnoj Poljskoj (Berbeć and Matyka, 2020), s tim što uporedna analiza nije vršena u odnosu na proizvodnju briketa već u odnosu na proizvodnju biogoriva – metana čiji je prinos procenjen na 3802, 2590 i 2149 metara kubnih po hektaru godišnje za tri različite vrste (Virdžinija A, Virdžinija B i Berlejš), respektivno. Žetvene ostatke pri proizvodnji duvana *Nicotiana tabacum* L., otpad sačinjen od korena i stabljike biljke, moguće je koristiti i za dobijanje hidrolata pogodnog za biostimulaciju kod klijanja semena pirinča i kukuruza (Fetter et al., 2020).

Postoje i rezultati koji ukazuju na to da se od otpada koji nastaje prilikom proizvodnje cigareta, konkretno od delova kao što su glavno rebro lista i prašina, ablativnom pirolizom mogu dobiti biouglje i biougalj (biochar) sa toplotnom moći koja se kreće između 11 i 14 MJ/kg (Chumsawat and Tippayawong, 2020).

Osim biouglja i biougla, među energentima koji se proizvode od biomase poseban značaj imaju briketi. Na primer, briketi od stabljika duvana, mogu se koristiti kao zamena za fosilna goriva u duvanskoj industriji tokom procesa sušenja duvana. Neka istraživanja pokazuju da briketi duvanske stabljike mogu potpuno zameniti ugalj (Peševski et al., 2010).

Jedno od istraživanja vezano za efikasnost prerade biomase je analiza uticaja pritiska i vlage prilikom sabijanja biomase od tri vrste perena proizvedenih u Poljskoj, a to su *Miscanthus giganteus* Greef et Deu, *Silphium perfoliatum* L. I *Sida hermaphrodita* L. Rusby, na gustinu, izdržljivost i zrnastost dobijenih briketa (Styck et al., 2020). Ispitivanja primene miskantusa za dobijanje bioenergije su vršena i u našoj zemlji (Cvetković i sar., 2016).

Osim tehnološkog postupka prerade biomase u oblik pogodan da se ona koristi kao energent, sam izbor biomase utiče na to koliko će kvalitetan biti onaj krajnji proizvod koji se od biomase dobije. Dodatno, u okviru jedne vrste biomase, jedne biološke kulture, takođe, postoje razlike u kvalitetu krajnjeg proizvoda, sa energetske stanovišta. Procena kvaliteta biomase kao energenta na osnovu elementarne analize sirove neprerađene biomase za četiri vrste šumskog rastinja vršena je u Brazilu za različite starosti bilja (Silva et al., 2019). Vršena je elementarna analiza za vrste: *Acacia mearnsii* De Wild, *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Mimosa scabrella* Benth i *Ateleia glazioviana* Baill, za uzorke koji su uzeti u prvoj, trećoj i petoj godini nakon njihovog zasada, a zbog procene njihove pogodnosti da se koriste kao bioenergenti. Po rezultatima elementarne analize bilje uzeto u bilo kojoj godini nakon zasada, za posmatrane uzorke, može služiti kao sirovina za bioenergent. Bilje uzeto u petoj godini nakon zasada najbogatije je ugljenikom i vodonikom (što posledično znači da bi dalo najkvalitetnije gorivo). Pri tome je, posebno analiziran i deo biljke u okviru iste biljne vrste, sa zaključkom da se, kod svih vrsta, u listu akumulira najviše korisnih materija sa energetske stanovišta. Po vrstama, *A. mearnsii* je pokazao najveću količinu ugljenika u sebi, i to u listu, dok je *A. glazioviana* vrsta sa najviše vodonika prilikom poređenja u odnosu na druge delove.

Rađena su i ispitivanja različitih načina proizvodnje i primene proizvedenih briketa od biomase. Studija režima zajedničkog sagorevanja briketirane biomase u elektranama na ugalj urađena je u Kini. Ispitivanje je rađeno u provinciji Šanksi, jednoj od glavnih oblasti za proizvodnju pšenice i pamuka. Korišćen je pogon na kombinovano gorivo (briketi od biomase i ugalj), sa idejom da se u provinciji smanji uobičajeno spaljivanje biomase na poljima koje je uzrokovalo značajna atmosferska zagađenja (Liu et al., 2014).

Novija istraživanja o zagađenju uzrokovanom upotrebom briketa od biomase, ćumura i biougla, rađena su takođe u Kini, (Sun et al., 2019), i idu u prilog korišćenju biomase jer ona ima manji emisioni faktor za prisustvo finih čestica u vazduhu u odnosu na fosilna goriva. Dokazano je da je biougalj efikasniji u smanjenju emisionog faktora, ali ga je teže dobiti, jer se za njega koriste složeniji tehnološki postupci.

Istraživanja urađena u Srbiji 2014. godine, pokazala su da je emisija ugljen-dioksida, azotnih i sumpornih oksida prilikom sagorevanja biomase gotovo zanemarljiva u odnosu na onu koja nastaje prilikom sagorevanja fosilnih goriva (Ećim-Đurić et al., 2014).

Međutim, postoje i drugačija istraživanja i mišljenja. Stanovište da se biomasa smatra za CO₂ neutralnu jer biljke upotrebljavaju CO₂ za fotosintezu i za rast, pa ne postoji neto prinos, a time ni neto povećanje koncentracije ovog gasa u atmosferi, je samo za sebe predmet istraživanja. Ta neutralnost je diskutabilna kada se biomasa posmatra u širem kontekstu, u kontekstu konkretne primene u stvarnosti. Kada biljka raste na jednom prostoru, ona upotrebljava CO₂ tokom svog razvoja. Međutim, nakon izvršene žetve, biomasa se transportuje do nekog drugog područja, gde sagoreva i gde dolazi do povećanja CO₂.

Proizvodnju biomase sa jednim ciljem da se koristi za dobijanje biogoriva, je i laureat Nobelove nagrade za hemiju 1988. godine, Hartmut Mihel (Hartmut Michel), ocenio kao izuzetno neefikasnu upotrebu zemljišta (Michel, 2012). Kritički osvrt na proračun smanjenja emisije ugljen-dioksida usled korišćenja biomase i analiza životnog ciklusa za šume istočne Amerike, koje u velikoj meri snabdevaju industriju peleta u Velikoj Britaniji, dali su Sterman et al. (2018). Oni su pokazali da korišćenje biomase nije uvek superiorno u odnosu na korišćenje fosilnih goriva.

Vreme koje je potrebno za rast novih zasada drveća potrebnih da „počiste“ iz atmosfere ugljen-dioksid nastao sagorevanjem drveća koje je već posečeno, definisano kao „vreme otplate duga za ugljenik“ (carbon debt payback time), koje su autori za taj konkretan slučaj izračunali, iznosilo je između 44 i 104 godine. Najvažniji zaključak rada nije bio u zastupanju odustajanja od biomase kao goriva, već u isticanju značaja istraživanja vezanih za efikasnost prerade i upotrebe biomase i načina na koji se ta upotreba sprovodi u praksi.

Veliki broj istraživanja, sa različitim, često oprečnim rezultatima i zaključcima, dovode do toga da i prateća regulativa bude oblast u stalnom razvoju.

4.2. Zakonska regulativa za OIE i biomasu

Klimatske promene i globalno otopljanje su nesumnjivi i potvrđeni. Kao takvi predstavljaju veliki problem, koji bez usklađivanja postupaka na globalnom nivou teško može biti uspešno smanjen ili rešen. Pretpostavka je da su te promene antropogene, uzrokovane ljudskom aktivnošću. Iako na globalnom nivou još uvek postoje različita mišljenja o konkretnim uzrocima nastanka i porasta tog problema, najrasprostranjenije je stanovište da je emisija gasova sa efektom staklene bašte ključni faktor.

Osim ugljen-dioksida u gasove sa efektom staklene bašte spadaju:

- Vodena para (H₂O)
- Metan (CH₄)
- Ozon (O₃)
- Hlorofluorouglenici (CFC)
- Fluorisani ugljovodonici (HCFC i HCF)
- Azot-monoksid (N₂O)
- Sumpor-heksafluorid (SF₆)

Glavni gas staklene bašte je vodena para. Ona doprinosi oko 36 – 70 % od ukupnog efekta (u zavisnosti od stepena oblačnosti), zatim ugljen-dioksid, sa udelom 9 – 26 %, metan sa 4 – 9 % i ozon sa 3 – 7 %. Drugi gasovi, koji se javljaju u prirodi, doprinose veoma malo ovom efektu. Zakonsko obavezivanje privrednih subjekata, koji proizvode i koriste energente, da se preorijentišu sa fosilnih goriva na obnovljive izvore energije se vidi kao (bar delimično) rešenje problema globalnog otopljanja.

Zakonska regulativa koja se odnosi na obnovljive izvore energije u zemljama van Evropske unije postoji više od jedne decenije. Tako, na primer, zakonska regulativa koja se odnosi na biogoriva (Jull, 2007), obuhvata zakone kao što su:

- u Argentini: Zakon o režimu regulacije i promocije za proizvodnju i održivost upotrebe biogoriva iz 2006. godine i Uredba o biogorivima iz 2007,
- u Kolumbiji: Zakon o upotrebi etanolnog goriva iz 2001. godine i Zakon o biogorivu iz 2004. godine,
- u Meksiku: Zakon o unapređenju i razvoju bioenergije iz 2006. godine,
- u Ekvadoru: Uredba o proizvodnji i upotrebi biogoriva iz 2004. godine,
- u Hondurasu: Nacrt zakona o proizvodnji i upotrebi biogoriva iz 2006. godine,
- na Filipinima „Zakon o biogorivima 2006” koji je zapravo donet 2007. godine.
- u Indoneziji je, nakon Zakona o nafti i gasu iz 2001. godine, donet niz uredbi i zatim Predsednička uredba o nacionalnim politikama za optimizaciju korišćenja energije i Predsedničko uputstvo o odredbi i korišćenju biogoriva kao alternativnog izvora energije 2006. godine.

Tim zakonima su regulisani različiti aspekti primene i razvoja obnovljivih izvora energije. Tako na primer Zakon o obnovljivoj energiji Narodne Republike Kine iz 2005. godine, nakon izmena 2009. godine, obuhvata sledeća poglavlja: 1) Opšte odredbe, 2) Istraživanje resursa i planiranje razvoja, 3) Industrijsko vođenje i tehnička podrška, 4) Popularizacija i primena, 5) Kontrola cena i nadoknada troškova, 6) Ekonomski podsticaji i nadzorne mere, 7) Pravne odgovornosti, 8) Dopunske odredbe. Bela knjiga o obnovljivoj energiji koja je izdata u Južnoafričkoj republici 2003. godine bavi se obnovljivim izvorima energije u okviru četiri strateške oblasti: finansijski instrumenti; pravni instrumenti; primena tehnologije i obrazovanje i svest.

Zakonska regulativa koja se odnosi na obnovljive izvore energije na nivou Republike Srbije je doneta u skladu sa zakonskom regulativom koja se odnosi na obnovljive izvore energije na nivou Evropske unije.

Zemlje koje pristupaju EU u obavezi su da stvore administrativne kapacitete da bi mogle da upravljaju finansijskim sredstvima pretpripravnih fondova i tako se pripreme za korišćenje Strukturnih fondova EU. Institucije i ljudski resursi koji treba da se bave upravljanjem, programiranjem i implementacijom fondova EU u određenoj zemlji predstavljaju ključno merilo apsorpcionih kapaciteta te zemlje za efikasno korišćenje dodeljenih sredstava EU (Barjaktarević, 2018). U oblasti energetike, tokom tranzicije ka punopravnom članstvu, glavni ciljevi jesu povećanje efikasnosti primarnih izvora energije smanjenjem troškova za energiju i povećanje udela potrošnje obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije, kao i podizanje svesti o energetskej efikasnosti i značaju korišćenja obnovljivih izvora energije.

Direktiva br. 2009/28/EC Evropskog parlamenta i Saveta od 23. aprila 2009. godine o promociji korišćenja energije iz obnovljivih izvora, kojom se menja i naknadno ukida Direktiva br. 2001/77/EC i 2003/30/EU, definiše biomasu kao biorazgradivi deo proizvoda, otpada i ostataka u poljoprivredi (uključujući biljne i životinjske supstance), u šumarstvu i pripadajućoj industriji, kao i biorazgradivi deo industrijskog i gradskog otpada (Barjaktarević, 2018).

Republika Srbija se, Ugovorom o pristupanju Energetskoj zajednici, obavezala da promoviše proizvodnju električne energije iz OIE i postupa u skladu sa Uputstvom 2001/77/EC Evropskog Parlamenta i Saveta iz 2001. godine za promociju električne energije proizvedene iz OIE na unutrašnjem tržištu električne energije i Uputstvom 2003/30/EU Evropskog Parlamenta i Saveta iz 2003. godine za promociju upotrebe biogoriva ili drugog goriva proizvedenog iz obnovljivih izvora za transport, kao i sa novim Uputstvom 2009/28/EC EU o obnovljivoj energiji. Poseban međunarodno-pravni osnov obaveze Srbije za podsticanje proizvodnje električne energije iz OIE je

njena osnivačka uloga i članstvo u Međunarodnoj agenciji za obnovljivu energiju (*IRENA – International Renewable Energy Agency*), od 2009. godine (www.irena.org).

Sem toga što definiše energiju iz obnovljivih izvora, Direktiva EU 2009/28/EC daje i niz dodatnih propisa i ciljeva. Regulativa koja se odnosi na obnovljive izvore energije na nivou Evropske unije obuhvata i dokumente kao što su Odluka Ministarskog saveta o implementaciji Direktive 2009/28/EC o promovisanju upotrebe energije iz obnovljivih izvora i Regionalna energetska strategija, 10thMC/18/10/2012 – Aneks 19/27.07.2012.

U skladu sa obrascem predviđenim Direktivom 2009/28/EC - Odluka 2009/548/EC donet je Nacionalni akcioni plan za korišćenje OIE RS – NAPOIE ("Sl. glasnik RS", br. 53/13). Po ovom akcionom planu, RS je u obavezi da primeni Evropske Direktive u oblasti OIE, koji predviđa korišćenje OIE i to 36% za proizvodnju električne energije, 30% za grejanje i hlađenje i 10% za saobraćaj. Glavni cilj ovog plana bio je da do 2020. godine, OIE učestvuju sa 27% u ukupnoj potrošnji energije.

Osim NAPOIE, zakonska regulativa koja se odnosi na obnovljive izvore energije na nivou Republike Srbije obuhvata i Strategiju razvoja energetike Republike Srbije (Službeni glasnik RS, br. 101/15). Dodatno, u aprilu 2021. godine je Vlada Republike Srbije usvojila dva zakona: Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije i Zakon o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, kao i izmene i dopune Zakona o energetici i Zakona o rudarstvu i geološkim istraživanjima.

U ovom trenutku se, na internacionalnom nivou, aktivno sprovode udružena istraživanja, donose i sprovode strateški dokumenti za regulativu koja će se primenjivati u vremenu posle 2020. Internacionalna agencija za obnovljivu energiju, (www.irena.org), čije su zemlje članice, zemlje članice Ujedinjenih nacija (samim tim i Srbija), objavila je 2022. Rezime poslovnog plana za svetsku energetske tranziciju sa naslovom „Put ka 1,5 °C” (Renewable Energy Agency, 2022) kao podsetnik na Konferenciju o klimi u Parizu, 2015. godine na kojoj je postignut dogovor, postavljen cilj, nazvan „1,5 °C limit“, da se globalno zagrevanje ograniči na 1,5 °C, tako što će do 2030. emisija ugljen-dioksida da bude manja za 45 % u odnosu na emisiju iz 2010., a do 2050. da se spusti skoro do nule. Zemlje članice donose svoje nacionalne planove pojedinačno.

Na portalu za energiju Evropske Komisije, (*European Commission, energy.ec.europa.eu*), objavljeni su nacionalni energetske i klimatske planovi za period 2021-2030, za pojedine zemlje članice. Prema radnoj verziji tog plana za Španiju, plan je da se do 2030. godine postigne (*National Energy & Climate Plan NECP*) :

- 40% manja emisija gasova staklene bašte u odnosu na emisiju koja je postojala 1990. godine
- 32% ukupna bruto finalna potrošnja energije iz obnovljivih izvora, za celu EU (što znači da na nivou pojedinačnih zemalja taj procenat može da bude drugačiji)
- 32,5% poboljšanje energetske efikasnosti
- 15% elektroenergetska interkonekcija između država članica

Projekat KeepWarm Europe, H2020-EE-2017-PPI N 784966, iz programa Horizon 2020, finansiran od strane EU i Nemačkog državnog ministarstva za ekonomsku saradnju i razvoj, sa članicama Austrija, Hrvatska, Češka Republika, Letonija, Srbija, Slovenija i Ukrajina, koji se odnosi na poboljšanje performansi sistema daljinskog grejanja u centralnoj i istočnoj Evropi, rezultovao je nizom značajnih studija i dokumenata od interesa za sprovođenje mera namenjenih ublažavanju loših efekata klimatskih promena (*keepwarmeuropa.eu*). Prema tim dokumentima, pravni instrumenti koji se u svetu primenjuju za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte su „Ograniči i trguj” (Cap and Trade), „Osnovni nivo i krediti” (Baseline and credit), „Taksa na ugljenik” (Carbon Taxes) i hibridi tih navedenih instrumenata. Republika Srbija ima dodatno svoje pravne instrumente i relevantnu zakonsku regulativu.

Nacionalni ciljevi da se energetske potrebe države podmiruju sa 100% iz OIE dovode do velikih promena u mnogim sektorima (građevina, stanovanje, grejanje, poljoprivreda, transport...), ne samo u tehnološkom već i u socijalnom smislu (doći će do nestajanja i nastajanja nekih radnih mesta). Biomasa, u toj tranziciji, očigledno ima veliki značaj. Njena sve intenzivnija upotreba ima globalni trend zbog ekološke prihvatljivosti i ekonomske isplativosti u poređenju sa drugim energentima ali je za dobru implementaciju i intenzivniju primenu potreban multidisciplinarn pristup na sistemskom nivou.

Prema studiji koja je rezultat Evropskog projekta KeepWarm o korišćenju biomase u sistemima daljinskog grejanja u centralnoj i istočnoj Evropi (*keepwarmeurope.eu*), u našoj zemlji su za rešavanje pitanja vezanih za korišćenje biomase u okviru nacionalnog plana za energiju i klimatske promene zaslužna tela kao što su:

- Ministarstvo rudarstva i energetike, koje se bavi pitanjima koja se odnose na tehnologiju sagorevanja i energetske efikasnost
- Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede, koje propisuje kriterijume koji procenat ostataka poljoprivrednih kultura se sme koristiti kao gorivo i koje propisuje i definiše obavezu pošumnjavanja
- Ministarstvo privrede, koje subvencijama može da favorizuje neka postrojenja (npr. ona koja energiju proizvode i distribuiraju tokom cele godine, čime se postiže brža isplativost investicije i veća zaposlenost)
- Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, koje finansira razvojne projekte za sve segmenate proizvodnje i potrošnje energije korišćenjem OIE
- Ministarstvo za rad, zapošljavanje, boračka i socijalna pitanja, koje može da reguliše pitanja kao što su pokretanje manjih postrojenja na biomasu, revitalizacija sela, zadružno povezivanje seljaka, uključivanje javno privatnog partnerstva, preživljavanje i onih domaćinstava sa manjim posjedima
- Ministarstvo zaštite životne sredine, koje bi napravilo razliku u kriterijumima zaštite životne sredine za postrojenja koja su bliža urbanim sredinama i ona koja se grade u ruralnim područjima daleko od gradova i sela
- Ministarstvo finansija
- Kabinet ministra bez portfelja zaduženog za inovacije i tehnološki razvoj, zbog podrške projektima koji koriste biomasu kao gorivo a zasnovani su na primeni domaćih tehnologija
- Privredna komora Republike Srbije, kao posrednik između proizvođača energetske opreme, potencijalnih investitora, lokalnih samouprava i zainteresovanih potrošača energije dobijene iz biomase
- Lokalne samouprave, u kojima se gradi postrojenje na biomasu, daju povoljniji uslovi za primenu biomase kao energenta, privlače investitori, daju krediti...

Vlada Republike Srbije je tokom 2009. godine usvojila set propisa kojima se uređuje proizvodnja energije iz OIE. Među njima je i propis koji se odnosi na "feed in" tarifu, koja proizvođačima električne energije iz obnovljivih izvora omogućava da pod povoljnim subvencionisanim uslovima prodaju električnu energiju EPS-u. Prema tom propisu, svaki proizvođač električne energije iz OIE koji dobije status povlašćenog proizvođača električne energije, ima pravo prioriteta na organizovanom tržištu električne energije u odnosu na druge proizvođače, ako su uslovi ponude električne energije jednaki. Takođe ima pravo na subvencije, poreske, carinske i druge olakšice, neophodne da bi proizvodnja električne energije iz OIE bila isplativa, jer je u najvećem broju slučajeva skuplja od proizvodnje iz fosilnih goriva uz primenu klasičnih tehnologija.

U Republici Srbiji regulativa za korišćenje OIE donesena je, po uzoru na regulative drugih, razvijenijih zemalja. Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije iz 2013. godine predvideo je da će udeo OIE u ukupnoj bruto finalnoj potrošnji energije, porasti sa 21,2 % (koliko je iznosio u 2011. godini), na 27,0 % do 2020. godine. Međutim, ovaj plan nije ostvaren, pa je do 2021. godine dostigla svega 20 % ukupne potrošnje. Zato je 31. aprila 2021. godine donet potpuno novi zakon o korišćenju OIE ("Sl. glasnik RS", br. 40/21 i 35/23), sa primenom od 01.01.2024.g. gde se planira u budućnosti izgradnja novih vetro generatora i novih malih hidroelektrana, kao i realizacija drugih projekata kao što je izgradnja novih energana na biomasu.

Regulativa koja se odnosi na eksploataciju i korišćenje OIE je deo regulative koja pokriva ekologiju, zaštitu životne sredine i sa njom mora biti u skladu. Mnoge organizacije i udruženja kojima je to tema od izuzetnog interesa daju na svojim internet stranama i spisak bitnih zakona i same zakone u punom sadržaju. Tako je na primer spisak bitnih zakona za zaštitu životne sredine dostupan na *Eko Pravo – SRDA* (www.srda.rs) sa slobodnim pristupom njihovom punom sadržaju. Spisak obuhvata:

- Zakon o zaštiti životne sredine
- Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine
- Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu
- Zakon o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu
- Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini
- Zakon o prestanku važenja zakona o fondu za zaštitu životne sredine
- Zakon o naknadama za korišćenje javnih dobara
- Zakon o klimatskim promenama

Program Ujedinjenih nacija za razvoj (UNDP) na svom portalu posvećenom biomasu i temama koje se na nju odnose (www.biomasa.undp.org.rs) daje dostupne sve zakone, podzakonske akte i uredbe, pravilnike, strateške dokumente i međunarodna dokumenta koji su od značaja za razvoj i praktičnu primenu biomase kao obnovljivog izvora energije. Njihov pun spisak je dat u **Prilogu 1**.

Kada se radi o praktičnoj implementaciji tih zakona, ona je precizirana standardima. U Tabeli 1 nalazi se spisak nekih evropskih standarda koji su od interesa za proizvodnju briketa od biomase.

Tabela 1. Evropski standardi koji se odnose na čvrsta biogoriva

Standard	Opis
EN 4778:2011	Čvrsta biogoriva – uzorkovanje
EN 14780:2011	Čvrsta biogoriva – priprema uzorka
ISO 17225-1:2014	Čvrsta biogoriva – specifikacija goriva i klase – deo 1: opšti zahtevi, deo 2,3,4 i 5 specifični zahtevi za goriva
ISO 18134 – 3:2015	Čvrsta biogoriva – utvrđivanje sadržaja vode, metod sušenja u peći deo 3: voda u opštoj analizi uzorka
EN 15234-1:2011	Čvrsta biogoriva – osiguravanje kvaliteta goriva, deo 1: opšti zahtevi, postupci za ispunjavanje zahteva kvaliteta, mere za osiguravanje poverenja da su specifikacije biogoriva ispunjene. Delovi 2,3,4,i 5 specificiraju zahteve po tipu goriva
ISO 9001:2015	Sistem upravljanja kvalitetom

Za razliku od zakona i uredbi, standardi su često dostupni samo u obliku kratkog opisa a celokupan sadržaj sa detaljnim uputstvima za implementaciju i odgovarajućim brojnim vrednostima se dobija od institucija koje su za njihovu primenu zadužene. U našoj zemlji je to Institut za standardizaciju Republike Srbije. Na nacionalnom nivou se usvajaju standardi koji mogu po sadržaju odgovarati evropskim standardima ali se vode pod nazivima definisanim od strane nacionalnog tela, Instituta za standardizaciju Republike Srbije. Institut za standardizaciju Republike Srbije donosi i objavljuje odluke o potvrđivanju starih i usvajanju novih standarda na nacionalnom nivou. Lista nekih standarda, važećih u Republici Srbiji, koji su od interesa za proizvodnju briketa od biomase data je u Tabeli 2.

Tabela 2. Neki standardi Republike Srbije koji se odnose na čvrsta biogoriva

Standard	Naslov i opis
SRPS D.B9.021:1987	<p>Energetski briketi od lignoceluloznog materijala - Tehnički uslovi (objavljen: 20.4.1987, 90.93 Odlukom potvrđen 1.12.2020)</p> <p>Opšti tehnički uslovi za energetske brikete od lignoceluloznih materijala. Dati su definicija, princip postupka briketiranja, oblik i mere briketa, namena, kvalitet, ispitivanje, obeležavanje, pakovanje i isporuka</p>
SRPS EN ISO 17831-2:2017	<p>Čvrsta biogoriva – Određivanje mehaničke postojanosti peleta i briketa – Deo 2: Briketi (objavljen: 31.1.2017.)</p> <p>Ovim delom ISO 17831 definiše se metoda za ispitivanje mehaničke postojanosti briketa. Mehanička postojanost je mera otpornosti sabijenih goriva na udare i/ili habanje kao posledica rukovanja ili transporta.</p>
SRPS EN 15234-3:2014	<p>Čvrsta biogoriva — Obezbeđenje kvaliteta goriva — Deo 3: Drvni briketi za neindustrijsku upotrebu (objavljen: 31.10.2014.)</p> <p>Definiše procedure za ispunjavanje zahteva za kvalitet (upravljanje kvalitetom) i opisuje mere za obezbeđenje odgovarajućeg poverenja u to da je specifikacija drvnog briketa opisana u EN 14961-3 ispunjena (obezbeđenje kvaliteta). Ovaj evropski standard obuhvata lanac proizvodnje i isporuke, od nabavke sirovina do isporuke krajnjem korisniku. Ovim evropskim standardom je obuhvaćeno samo obezbeđenje kvaliteta za drvene brikete proizvedene od drvnih biomasa navedenih u EN 14961-1:2010, Tabela 1 i EN 14961-3:2011.</p>
SRPS EN ISO 18847:2017	<p>Čvrsta biogoriva – Određivanje gustine čestica peleta i briketa (objavljen: 31.10.2018.)</p> <p>Utvrđuje metod za određivanje gustine sabijenih goriva, kao što su peleti ili briketi. Gustina nije apsolutna vrednost i uslovi za njeno određivanje moraju da se standardizuju kako bi se omogućilo vršenje uporednih određivanja.</p>

Konkretni detalji su preciznije dati unutar samih standarda. U Tabeli 3 prikazani su neki od specifikacija za brikete po austrijskom standardu ONORM M1735:1990 i po nemačkom standardu DIN 51731:1996.

Tabela 3. Najznačajnije specifikacije po standardima za brikete

Standard Specifikacija	ONORM	DIN 51731:1996				
	M1735:1990	klasa HP1	klasa HP2	klasa HP3	klasa HP4	klasa HP5
Prečnik, mm	4-120	≤ 10	6-10	3-7	1-4	0,4-1
Dužina, mm	400	≤ 30	15-30	10-15	≤ 10	≤ 5
Specifična gustina	≥ 1 kg/dm ³	1-1,4 g/cm ³	1-1,4 g/cm ³	1-1,4 g/cm ³	1-1,4 g/cm ³	1-1,4 g/cm ³
Sadržaj vlage (%)	≤ 18	≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12
Sadržaj pepela (%)	≤ 6	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5
Energetska vrednost, MJ/kg	≥ 18	17,5-19,5	17,5-19,5	17,5-19,5	17,5-19,5	17,5-19,5
Sumpor (%)	≤ 0,08	≤ 0,08	≤ 0,08	≤ 0,08	≤ 0,08	≤ 0,08
Azot (%)	≤ 0,6	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,3
Arsen, mg/kg	/	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8
Kadmijum, mg/kg	/	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Hrom, mg/kg	/	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 8
Živa, mg/kg	/	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05
Aditivi (%)	Max 2, samo prirodni	/	/	/	/	/

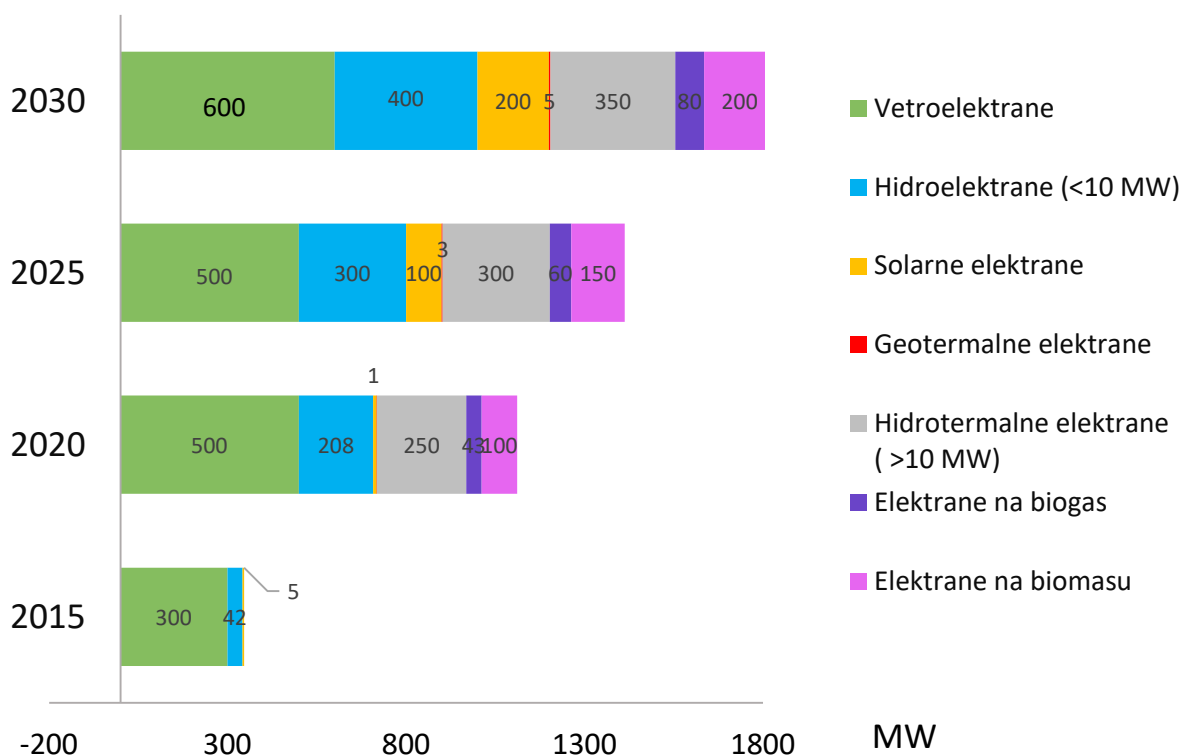
Kvalitet napravljenih briketa, posle karakterizacije, može se analizirati u odnosu na parametre specificirane u odgovarajućim standardima i to je neophodno za proizvodnju, distribuciju i prodaju sertifikovanih proizvoda unutar trgovinskih lanaca, tako da to bude u skladu sa propisima koji važe na državnom ili internacionalnom nivou. Međutim, u istraživačke i naučne svrhe često se koristi poređenje sa parametrima koji važe za fosilna goriva (Kuthe et al., 2021).

Sagorevanje briketa i ostalih proizvoda, energenata dobijenih iz OIE utiče na kvalitet vazduha i takođe podleže odgovarajućoj zakonskoj regulativi. Na osnovu člana 38. stav 1. Zakona o planskom sistemu Republike Srbije („Službeni glasnik RS”, broj 30/18), Vlada je usvojila Program zaštite vazduha u Republici Srbiji za period od 2022. do 2030. godine sa akcionim planom. Ovaj plan, osim emisije gasova, reguliše i emisiju čestica u vazduhu.

4.3. OIE i biomasa u Srbiji

Za razliku od Islanda koji ima najbolje predispozicije za korišćenje geotermalne energije kao alternativnog OIE, jer se nalazi iznad vruće tačke, tačke susretanja triju tektonskih ploča, u Republici Srbiji su prirodni resursi drugačiji. Srbija ima dobre potencijale za korišćenje svih oblika OIE, a posebno biomase.

U skladu sa takvim potencijalima, donose se i strateški programi i planovi za ubranu primenu biomase kao izvora energije u Republici Srbiji. Na Slici 4 prikazana je grafička projekcija Vlade Republike Srbije za izgradnju kapaciteta za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije za period 2015-2030 na kojoj se vidi koliki je udeo elektrana na biomasu i biogas u ukupnoj projektovanoj snazi elektrana.

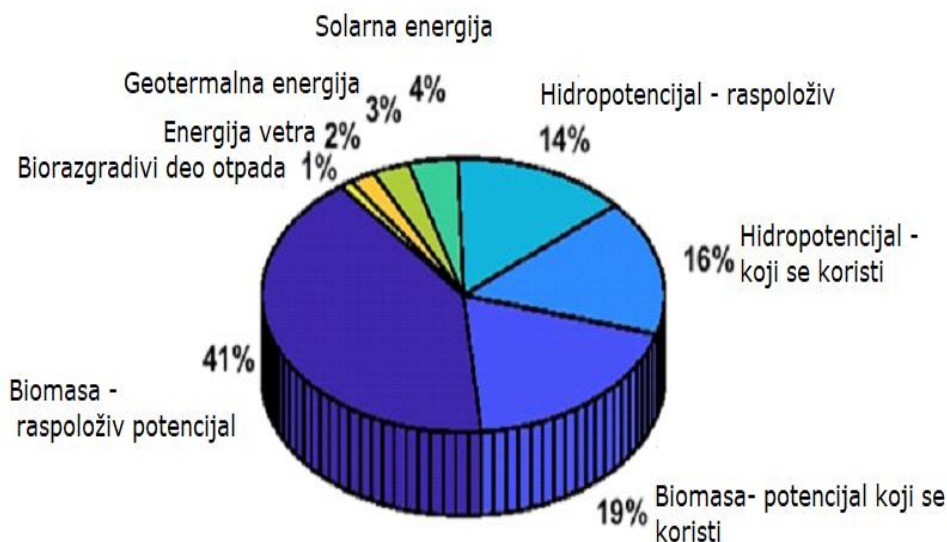


Slika 4. Projekcija Vlade Republike Srbije za izgradnju kapaciteta za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije za period 2015-2030 (Marković i sar., 2020).

Pored toga što Republika Srbija ima dobre prirodne potencijale za korišćenje svih oblika OIE, njihovo korišćenje je, još uvek, vrlo malo. U zavisnosti od regiona, najviše se koriste solarna energija, hidroenergija i energija vetra. Sve veći potencijal ima biomasa.

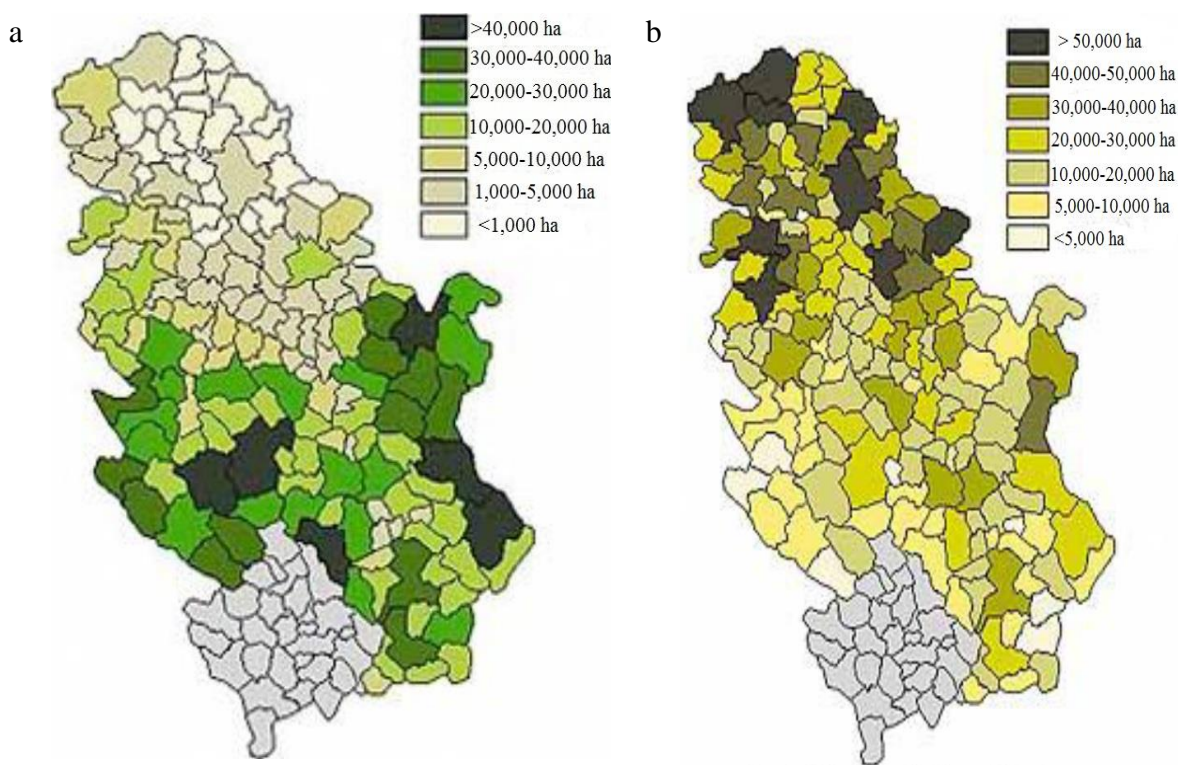
Prema Strategiji razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine (Službeni glasnik RS, br. 101/15), najveći potencijal obnovljivih izvora energije u Republici Srbiji ima biomasa, i to 3,4 toe (tona ekvivalenta nafte), što je više od polovine ukupnog nacionalnog potencijala. Biomasa je resurs koji se može koristiti za kogenerativnu proizvodnju električne i toplotne energije, a i za dobijanje biogasa koji se koristi u saobraćaju kao biogorivo. Razlog zbog koga se to u Srbiji ne radi u meri u kojoj bi moglo, je što su troškovi manipulacije i dalje visoki, zemljišni posedi razučeni, čime nema isplativosti zbog skupog transporta, a naročito zbog toga što je proizvodnja vremenski neusklađena (Ećim-Đurić et al., 2020).

Istraživanja vršena u okviru projekta EU (*keepwarmeuropa.eu*) ukazuju da je ukupan tehnički raspoloživ potencijal OIE oko 5,6 Mten/g. Najveći potencijal je u biomasi, oko 60%, od čega se koristi samo jedna trećina potencijala. Na drugom mestu je hidropotencijal sa oko 30% ukupnog tehnički raspoloživog potencijala, od čega je u upotrebi polovina. Raspodela ukupnog raspoloživog potencijala OIE u Srbiji prema rezultatima istraživanja u okviru projekta EU (*keepwarmeuropa.eu*) je grafički prikazana na Slici 5.



Slika 5. Raspodela ukupnog raspoloživog potencijala OIE u Srbiji prema projektu EU (*keepwarmeurope.eu*).

Posmatrano geografski, prirodni potencijali su takvi da biomasa nije ravnomerno raspoređena; na jugu Srbije najzastupljenija je šumska, odnosno drvena biomasa, a na severu Srbije, poljoprivredna biomasa. Na Slici 6 prikazana je geografska raspodela biomase u Srbiji; levo su prikazane površine pod šumom a desno obradivo zemljište (*keepwarmeurope.eu*).



Slika 6. Geografska raspodela biomase u Srbiji, a: površine pod šumom, b: obradivo zemljište (*keepwarmeurope.eu*). Za područje Kosova i Metohije ne postoje dostupni podaci.

Istorijski gledano, biomasa predstavlja OIE koji je najduže u upotrebi. Glavna prednost biomase, u odnosu na ostale OIE je njena kontinuiranost (Kanevče et al., 2016).

U Republici Srbiji poljoprivreda je jedna od značajnijih privrednih grana. Prema podacima Republičkog zavoda za statistiku Srbije 8,3% stanovništva bavi se poljoprivredom, koja učestvuje u formiranju bruto društvenog proizvoda sa oko 6% (Marković i sar., 2020). Pored toga, u poljoprivredi postoji značajan udeo sporednih proizvoda, koji mogu predstavljati važan doprinos ukupnom energetsom potencijalu. Republika Srbija, kao zemlja u razvoju, godišnje raspolaže sa oko 12,5 miliona tona biomase iz poljoprivrede, od čega, 9 miliona tona u AP Vojvodini.

U odnosu na celokupnu površinu Srbije, najveći deo pripada obradivim površinama (55%) i šumi (30%). Zbog toga, najznačajniji izvor biomase predstavljaju ostaci iz poljoprivredne proizvodnje. Drvna biomasa se tradicionalno u Srbiji koristi kao energent. Drvna biomasa se najčešće koristi u vidu peleta, briketa i čipsa (Brkić i sar., 2007; Savić i Adžić, 2013).

U skladu sa tim, prema resursima, postoje tri vrste energana. Energana može biti:

- na šumsku biomasu
- poljoprivrednu biomasu i
- ona koja koristi više vrsta biomase.

Prema Beloj knjizi elektroprivrede Srbije (Marković i sar., 2020), biomasa pripada vrstama otpada koje imaju energetska vrednost i predstavlja jedan od tri alternativna energenta. Grafički prikaz mesta biomase među alternativnim energentima dat je na Slici 7.



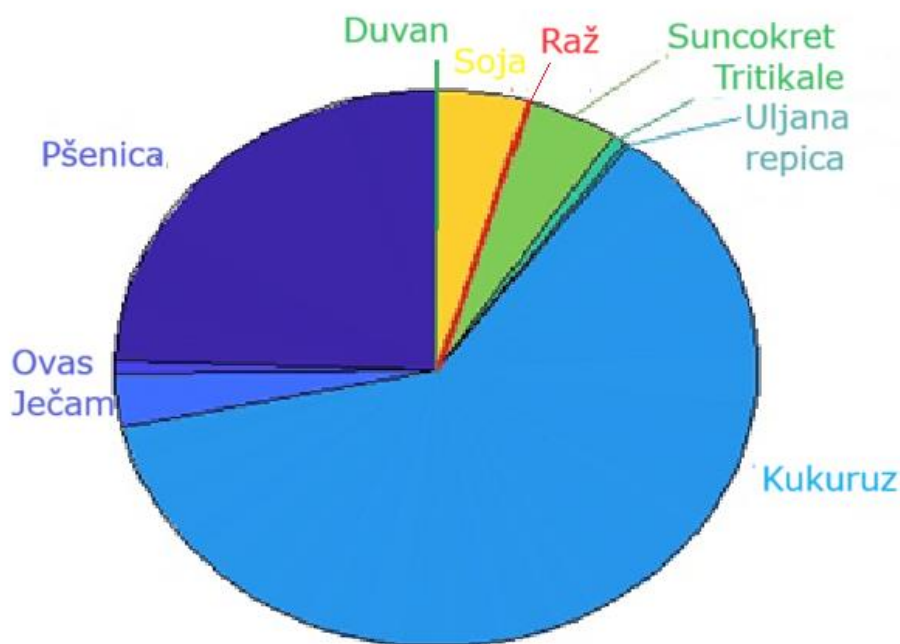
Slika 7. Podela alternativnih energenata prema Beloj knjizi elektroprivrede Srbije (Marković i sar., 2020).

Iako je površina Srbije prekrivena obradivim površinama u većem procentu nego što je prekrivena šumom, poljoprivredna biomasa nije srazmerno zastupljena kao energent, uglavnom iz tehnoloških razloga. U Srbiji se biomasa, uglavnom upotrebljava na tradicionalan način, u vidu energije za grejanje. Međutim može se koristiti i u kogeneracijskim postrojenjima za proizvodnju električne i toplotne energije, kao sirovina za biogoriva, ili u industriji za proizvodnju vlakana i hemikalija (Jovanović i Parović, 2009).

Prema statističkim podacima, biomasa iz poljoprivrede može zadovoljiti sve energetske potrebe u sektoru poljoprivrede. Smatra se da od ukupnih resursa biomase iz poljoprivredne proizvodnje oko 25% može da se iskoristi za proizvodnju toplotne energije, što je oko 3 miliona tona biomase a to je ekvivalentno 1,05 miliona tona mazuta (www.stat.gov.rs).

Potencijal biomase je prepoznat od strane domaćih i inostranih investitora koji daju potrebnu podršku za povećanje učešća obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvodnji energije. Proizvodnja energije iz biomase već je zastupljena u postrojenjima za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije, posebno u Vojvodini. Broj energana na biomasu u našoj zemlji je u stalnom porastu, ali još uvek u Srbiji ne postoji organizovano tržište biomase, pogotovo ne poljoprivredne, i još uvek je mali broj finansijski prihvatljivih pilot projekata i sistema sa uspešnim i stabilnim poslovanjem. Prema vestima Nacionalne asocijacije za biomasu (www.serbio.rs) Sremska Mitrovica je prvi grad u Vojvodini gde se, od 2012. godine, za sistem daljinskog grejanja koristi biomasa.

Najveći potencijal poljoprivredne biomase u Republici Srbiji čine ostaci kukuruza, nešto manje slama pšenice, a oko 15% ostaci ostalih biljnih vrsta poput suncokreta, soje, uljane repice, duvana, ostataka iz voćarstva i vinogradarstva (Ećim-Đurić et al., 2020). Na Slici 8 je prikazana raspodela i udeo različitih izvora biomase za period 2010.-2016. godina, koju su u svom radu prikazali Janić i sar. (2018).



Slika 8. Raspodela različitih izvora biomase (Janić i sar., 2018).

Na osnovu podataka koje je objavio Republički zavod za statistiku napravljena je Tabela 4 u kojoj su prikazani neki od mogućih izvora biomase, razvrstanih po vrstama, prinosu i godinama njihove proizvodnje. Takođe, Tabela 4 pokazuje da, pored tradicionalno gajenih poljoprivrednih biljaka, odgovarajući udeo biomase u Srbiji pripada stabljikama duvana, vrsti biomase koja je i predmet istraživanja u ovom radu.

Tabela 4. Prinosi nekih izvora biomase po godini proizvodnje, t/ha (*www.stat.gov.rs*)

Godina Proizvod	2017	2018	2019	2020	2021
Pšenica	4,1	4,6	4,4	4,9	5,7
Ječam	3,3	3,9	3,7	4,6	5,6
Kukuruz	4	7,7	7,6	7,9	5,9
Ovas	2,4	2,9	2,5	3	3,2
Raž	2,4	2,8	2,6	3,2	3,8
Tritikale	3,7	4,2	4	4,4	5,1
Uljana repica	2,5	3	2,7	3	3,2
Suncokret	2,5	3,1	3,3	2,9	2,9
Soja	2,3	3,3	3,1	3,2	2,3
Duvan	1,4	1,2	1,1	1,3	1,7

Prema izveštaju o stanju u poljoprivredi u Republici Srbiji za 2020. godinu (*www.stat.gov.rs*) koji je izdat od strane Ministarstva poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede - Sektor za poljoprivrednu politiku, kukuruz, pšenica, soja, duvan i suncokret se nalaze u prvih 10 proizvoda po vrednosti izvoza. Kao proizvođač duvana, Republika Srbija raspolaže značajnim količinama biomase koja ostaje nakon berbe listova sa stabljika duvana. Prema evropskom katalogu (EPA, 2002), kao i katalogu Ministarstva životne sredine i prostornog planiranja i Agencije za zaštitu životne sredine Republike Srbije (Katalog otpada, 2010), duvanski otpad se svrstava u netoksičan. Međutim, zbog sadržaja nikotina, duvanski otpad predstavlja opasnost po životnu sredinu (US Food and Drug Administration, *www.fda.gov*), pa se u cilju njene zaštite mora uništiti pod posebnim uslovima ili preraditi pre odlaganja na deponiju.

Od 2016. godine u Srbiji se proizvode samo krupnolisni duvani tipa Berlej i Virdžinija (TAIEX, 2018). Na osnovu činjenice da se godišnje zasadi oko 20000 – 25000 stabljika po hektaru i da je prosečna masa cele stabljike oko 350 g, može se dobiti oko 7000-8750 kg stabljika po hektaru, što je prosečno godišnje oko 45000 tona biomase. Ova količina biomase se i dalje smatra otpadom, jer je neupotrebljiva u duvanskoj industriji i nema nikakvu ekonomsku vrednost. Manje količine stabljika duvana (1/4) se obično vraćaju u zemljište zaoravanjem, dok se veća količina odlaže kao otpad ili spaljuje na njivi, što je ogovarajućim propisima zabranjeno (Kulić and Radojičić, 2011; Službeni glasnik RS 62/06, 65/08, 41/09, 101/15, 112/15, 80/17 i 95/18).

Istraživanja u Srbiji, koja se odnose na hemijske i tehnološke karakteristike briketa napravljenih od duvanske stabljike, započeli su naučni radnici sa Poljoprivrednog Fakulteta Univerziteta u Beogradu (Malnar et al., 2015a). Sadržaj nikotina u stabljici mogao bi da predstavlja problem odnosno, izvesne količine mogle bi da se pojave u produktima koji se formiraju tokom sagorevanja. Stoga, u cilju poboljšanja karakteristika briketa od duvanskih stabljika, predmet ovog istraživanja biće modifikacija briketa, i to mešanjem stabljike duvana i izabranih vrsta biomase (oklasak kukuruza, pšenična slama, sojina stabljika, ostaci glava suncokreta i piljevina od bukve) u odnosu 50:50. Na napravljenim briketima određivaće se hemijske karakteristike, toplotna moć i

produkti sagorevanja, sadržaj nikotina u briketima i produktima njihovog sagorevanja i vršice se određivanje količine i sastava pepela nakon sagorevanja briketa.

Sirovine za proizvodnju briketa izabrane su, pre svega, u odnosu na količinu dostupne biomase u Srbiji. Duvan tipa Berlej je izabran jer se, u odnosu na ostale tipove duvana, bere i suši na stabljikama, čime se olakšava proces skupljanja i transporta i omogućava ušteda u energiji potrebnoj za njihovo naknadno sušenje. Kukuruzni oklasak i pšenična slama se tradicionalno primenjuju kao biogorivo, dok se sojina stabljika i glave suncokreta ređe koriste. Piljevina od drveta bukve je u širokoj upotrebi.

U sledećem poglavlju (poglavlje 5) dat je pregled osobina različitih vrsta biomase sa tačke gledišta njihove primene za proizvodnju čvrstih energenata, konkretno briketa.

5. Osobine biomase

„Znamo da će nam ponestati mrtvih dinosaurusu za kopanje za gorivo

i da ćemo na kraju morati da koristimo održivu energiju,

pa zašto ne bismo sada prešli na obnovljive izvore

i izbegli povećan rizik od klimatske katastrofe?

Klađenje da je nauka pogrešna i da su naftne kompanije u pravu

je do sada najgluplji eksperiment u istoriji.”

Elon Musk, osnivač kompanije Tesla

Biomasa je materijal koji potiče od biljaka. Biljke koriste svetlosnu energiju sunca za pretvaranje vode i ugljen-dioksida u šećere koji se mogu skladištiti, kroz proces koji se zove fotosinteza. Neke biljke, kao što su šećerna trska i šećerna repa, čuvaju energiju kao jednostavne šećere. Oni se uglavnom koriste za hranu. Ostale biljke skladište energiju kao složenije šećere, odn. skrob. Biljke koje sadrže skrob uključuju žitarice poput kukuruza, a koriste se i za hranu. Druga vrsta biljne materije, koja se zove celulozna biomasa, sastoji se od veoma složenih polimera šećera (kompleksni polisaharidi), i generalno se ne koristi kao izvor hrane. Ova vrsta biomase će biti buduća sirovina za proizvodnju bioetanola. Specifične sirovine koje se testiraju uključuju poljoprivredne i šumske ostatke, organski urbani otpad, prehrambeni i drugi industrijski otpad i energetske useve (Wright et al., 2006).

Upotreba goriva od biomase, kao što su etanol i biodizel, u sektoru transporta je mala ali brzo rastuća. Ovo uključuje sve, od primarnih izvora useva i ostataka požnjevenih/sakupljenih direktno sa zemlje, preko sekundarnih izvora kao što su ostaci pilane, do tercijarnih izvora ostataka nakon konzumiranja koji često završavaju na deponijama. Resursi biomase takođe uključuju gasove koji nastaju anaerobnom digestijom životinjskog đubriva ili organskih materijala na deponijama.

Drvena sečka i stabljike predstavljaju resurse koji su trenutno dostupni u šumarstvu i poljoprivredi, iako nedovoljno iskorišćeni. Jedna od najvećih neiskorišćenih kategorija su suvi ostaci drveta, koje treba ukloniti iz šuma kako bi se smanjio rizik od šumskih požara. Identifikovano je

preko 8 milijardi suvih tona biomase. Količina ove biomase, potencijalno dostupne kao biogorivo, procenjuje se na oko 60 miliona suvih tona godišnje (*keepwarmeurope.eu*). Drugi veliki nedovoljno iskorišćeni šumski izvori, drvene sečke, su ostaci seče i gradski drveni ostaci. U oba slučaja, relativno su visoki troškovi uklanjanja, rukovanja i transporta u poređenju sa njihovom relativno niskom vrednošću kao energetske resursa. Postoji mnogo više godišnjih useva (trava i vrsta drveća) koji pokazuju veliki potencijal za proizvodnju cenovno konkurentne celulozne biomase.

Višegodišnje energetske kulture koje mogu biti poželjne u nekim situacijama uključuju trave sa tankim stabljikama, kao što je trska, kanarska trava, ili trava sa debelom stabljikom sa rizomima, kao što su miskantus, energetska trska ili *Arundo* drveće koje se uzgaja kao jednodredni usev, eukaliptus, srebrni javor, slatka guma i javor, ili drveće koje se uzgaja kao višestruki usev, kao što su izdanak vrbe ili topole. Neki jednogodišnji usevi se takođe procenjuju kao namenski energetske usevi uključujući kukuruz, sirak i kenaf (drvenasti jednogodišnji usev), zbog veoma visokih prinosa.

Istraživanja u okviru projekta *KeepWarm Europe (keepwarmeurope.eu)* pokazuju da je ukupan kapacitet biomase u Republici Srbiji, bez uračunavanja biorazgradivog komunalnog otpada, oko 3 208 301 toe (tona ekvivalenta nafte). Od toga, značajan deo tog kapaciteta potiče od šumske biomase (1 267 184 toe potiče od namenski gajene šumske biomase, 279 133 toe potiče od šumskih ostataka i ostataka iz prerade drveta a 34 355 toe potiče od ostataka od drveta van šume). Biomasa koja potiče od ostataka od ratarskih kultura doprinosi ukupnom kapacitetu sa 1 056 072 toe. Ostaci u voćarstvu, kao energent, doprinose sa 529 333 toe a ostaci iz stočarske proizvodnje ukupnom energetske potencijalu Republike Srbije doprinose sa 42 224 toe godišnje.

Usavršavanje tehnoloških postupaka i mehanizama za prikupljanje, pripremu, obradu, preradu i manipulaciju biomase doprinosi boljem iskorišćenju tog potencijala. Pored postupaka tokom proizvodnje, manipulisanja i distribucije energenata koji su dobijeni od biomase, bitnu ulogu imaju i postupci za karakterizaciju kako sirove biomase, tako i biomase u prerađenom stanju. Ovi postupci su značajni jer se njima određuje da li su karakteristike te biomase u skladu sa standardima.

Da bi biomasa mogla da se koristi kao energent, pre upotrebe, ona se u manjoj ili većoj meri obrađuje, da bi bila u obliku koji konkretno postrojenje može da primi (prah, bala, snop, sečka, pelet, briket...). Prilikom te pripreme vrši se i odstranjivanje nečistoća iz goriva, doziranje, unificiranje proizvoda. Na taj način, dobija se biomasa u kompaktnijem obliku koji je pogodniji i za skladištenje.

Kada se radi o gorivu dobijenom preradom biomase, naziv koji se često pojavljuje je biogorivo. Kao svetski dan biogoriva označen je 10. avgust, sa ciljem podizanja svesti o značaju biogoriva kao alternativni za fosilna goriva, kojih je sve manje. Ovaj dan obeležava se u spomen na Rudolfa Dizela, koji je 08. avgusta 1893. godine prvi put pokrenuo mehanički uređaj pomoću ulja od kikirikija i predvideo korišćenje biljnih ulja kao alternativu za korišćenje naftnih ulja (Nitske, 1965).

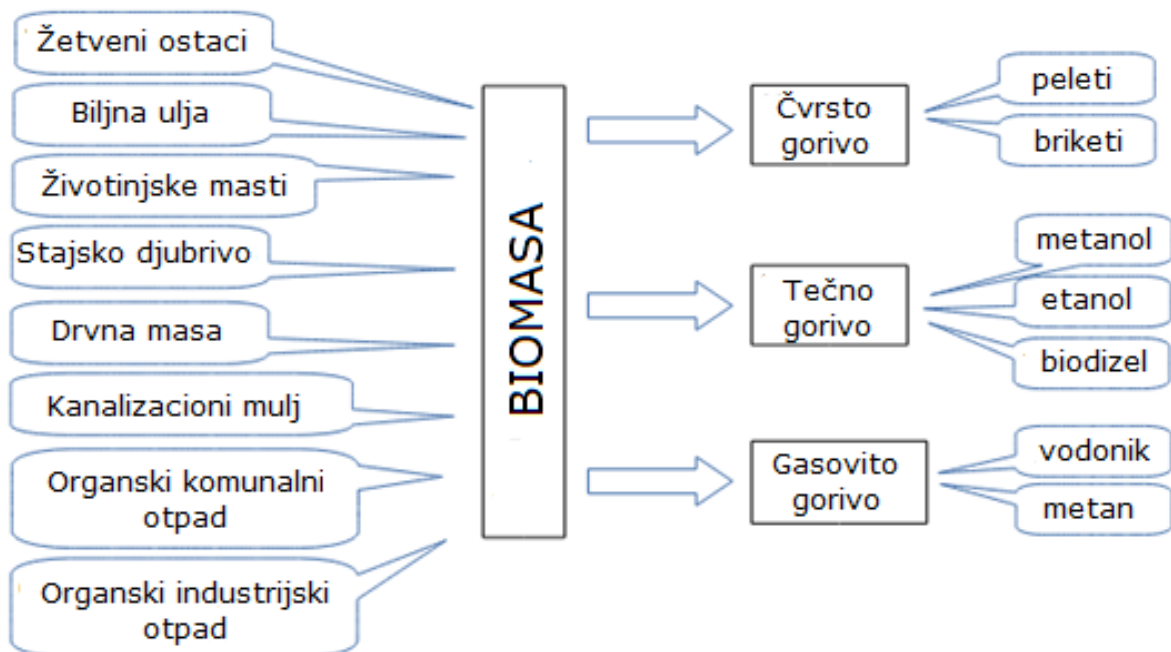
Kada se radi o biomasi kao gorivu, odnosno uopšte kao energentu, dve njene glavne karakteristike od interesa su toplotna moć i produkti sagorevanja. Ovo poglavlje opisuje definicije, podele i vrste biomase, glavne sastojke biomase (a to su celuloza, lignin, mineralne materije, a u slučaju duvana i nikotin), njen sastav (elementarni sastav), zatim način na koji sastav biomase utiče na njene karakteristike sa energetske stanovišta, kvalitet biomase kao OIE, kao i način na koji se od biomase može dobiti konkretan energent (u ovom slučaju briket, briketiranjem). Na kraju je dat pregled tih osobina za glavne vrste biomase koje su bile korišćene tokom ovog istraživanja, a to su na prvom mestu duvanske stabljike, a zatim vrste biomase koje su korišćene za dobijanje mešavina briketa: pšenična slama, sojine stabljike, ostaci glava suncokreta, oklasak kukuruza i drvo bukve.

5.1. Definicije, podele i vrste biomase

Po definiciji, u energetskom smislu, biomasu čine sve organske materije biljnog i životinjskog porekla. To samo po sebi predstavlja širok dijapazon materijala koji se među sobom veoma razlikuju po osobinama, što dovodi do toga da i krajnji proizvodi dobijeni od njih budu po svojim karakteristikama dosta različiti. Takođe, ovo dovodi i do toga da postoji mnoštvo kriterijuma i klasifikacija biomase, zavisno od kriterijuma po kome je klasiranje vršeno.

Goriva na biomasu su, među sobom, raznovrsnija od fosilnih goriva. U energetskom smislu, veće su razlike između goriva baziranih na biomasu nego što su razlike između dizel goriva i benzina.

Od biomase može se direktnim sagorevanjem dobiti toplotna energija. To je za najveći broj korisnika, posebno onih koji nemaju pristup složenijoj opremi, najprihvatljiviji način. Pirolizom i gasifikacijom dobija se hemijska energija, i to je uobičajeno za namenski građene pogone.



Slika 9. Prikaz materijala koji se mogu koristiti za dobijanje energenata na bazi biomase u čvrstom, tečnom i gasovitom stanju.

Na Slici 9 prikazani su mogući izvori biomase i goriva koja se, iz njih, preradom mogu dobiti. Bela knjiga Elektroprivrede Srbije (Marković i sar., 2020) predviđa da se čvrsto gorivo dobijeno od biomase može koristiti direktnim spaljivanjem (za proizvodnju termalne energije za grejanje, zagrevanje vode za domaćinstva i tehničke vode, sušenje poljoprivrednih proizvoda...) ili za dalju proizvodnju električne energije. Biomasa pogodna za dobijanje gasovitog goriva, biogasa, takođe može da doprinese proizvodnji električne energije.

Bela knjiga Elektroprivrede Srbije u biomasu, kao izvor energije, svrstava i plastične mase, organska jedinjenja koja nastaju iz ulja i njihov otpad. Plastične mase imaju visok energetski potencijal ali predstavlja problem to što sadrže hlor (PVC, polihlorin aromatična jedinjenja, itd.) i što sagorevanjem ispuštaju hlor i druge toksične supstance. Kao rezultat toga, insineracija plastičnih masa se organizuje u posebnim postrojenjima uz strogu kontrolu emisija. Zato je, posmatrano sa aspekta zaštite životne sredine, a i u ovom radu, ispitivanje produkata sagorevanja različitih vrsta biomase od velike važnosti.

Evropski komitet za standardizaciju (European Committee for Standardization – CEN) je (2014) izvršio podjelu biomase na čvrstu biomasu, u koju spadaju drvena biomasa, biomasa iz ratarske proizvodnje i biomasa iz voćarske proizvodnje (EN ISO 17225-1:2014), tečnu biomasu u koju spadaju tečna biogoriva (bioulja) i trans-esterifikovana biljna ulja (biodizel, bioetanol, biometanol) i gasovitu biomasu - biogas. Postoji više podjela izvora biomase, u zavisnosti od porekla ili agregatnog stanja. Prema poreklu biomase, najopštija je podjela na (www.cen.eu):

- Netretiranu drvenu biomasu,
- Energetske zasade,
- Ostatke i otpad iz poljoprivredne i životinjske proizvodnje,
- Organske ostatke i otpad iz komunalne i industrijske delatnosti.

Međutim, mnogi autori, među njima (Demirbas et al., 2009, Gvozdenac et al., 2010; Panwar et al., 2012) smatraju da je pravilnija podjela biomase prema poreklu na:

- Drvenu biomasu (ostaci iz šumarstva, otpadno drvo),
- Drvenu uzgojenu biomasu (brzorastuće drveće),
- Nedrvnu uzgojenu biomasu (brzorastuće alge i trave),
- Ostatke i otpatke iz poljoprivrede,
- Životinjski otpad i ostatke,
- Gradski i industrijski otpad

Prema agregatnom stanju, u zavisnosti od načina energetskog korišćenja, biomasa može biti čvrsta, tečna i gasovita.

Prema današnjim tehnološkim mogućnostima, izvori čvrste biomase mogu biti:

- Ostaci ratarske proizvodnje
- Ostaci rezidbe iz voćarstva i vinogradarstva
- Ostaci šumarstva
- Biljna masa brzorastućih biljaka
- Deo selektivnog komunalnog otpada
- Ostaci iz drvoprerađivačke industrije
- Ostaci primarne i sekundarne prerade poljoprivrednih proizvoda i drugo.

Izvori tečne biomase mogu biti:

- tečna biogoriva (bioulja)
- transesterifikovana biljna ulja (biodizel, bioetanol, biometanol)

Izvori gasovite biomase se jednim imenom nazivaju biogas.

Sirovine za biomasu delimo na: primarne, kada se radi o bilju nastalom zahvaljujući procesu fotosinteze, kao što su žitarice i uljarice namenjene proizvodnji goriva za transport; sekundarne, kada se radi o nusproizvodima proizvodnje i prerade primarnih sirovina, kao što su piljevina i biljna ulja i tercijarne, kada se radi o ostacima i otpacima nakon upotrebe kao što su biološki građevinski komunalni i ugostiteljski otpad.

Biomasa se pretvara u energiju kroz različite procese (Rathore and Panwar, 2021). Oni mogu biti:

1. Direktno sagorevanje (combustion) za proizvodnju toplote
2. Termohemijska konverzija za proizvodnju čvrstih, gasovitih i tečnih goriva
3. Hemijska konverzija za proizvodnju tečnih goriva
4. Biološka konverzija za proizvodnju tečnih i gasovitih goriva

Direktno sagorevanje je najčešći metod za pretvaranje biomase u korisnu energiju. Sva biomasa se može direktno sagorevati za grejanje zgrada i vode, za grejanje industrijskih procesa i za proizvodnju električne energije u parnim turbinama.

Termohemijska konverzija biomase obuhvata pirolizu i gasifikaciju. Oba su procesi termičke dekompozicije u kojima se sirovine biomase zagrevaju u zatvorenim posudama pod pritiskom, koje se nazivaju gasifikatori, na visokim temperaturama. Oni se uglavnom razlikuju po temperaturama procesa i količini kiseonika prisutnog tokom procesa konverzije. Piroliza podrazumeva zagrevanje organskih materijala na 400–500 °C u skoro potpunom odsustvu slobodnog kiseonika. Piroliza biomase proizvodi goriva kao što su drveni ugalj, bio-ulje, obnovljivi dizel, metan i vodonik. Hidrotremalna karbonizacija se koristi za preradu bioulja (proizvedenog brzom pirolizom) vodonikom pod povišenim temperaturama i pritiscima u prisustvu katalizatora za proizvodnju obnovljivog dizela, obnovljivog benzina i obnovljivog goriva za mlazne motore. Gasifikacija podrazumeva zagrevanje organskih materijala na 800–900 °C uz ubrizgavanje kontrolisanih količina slobodnog kiseonika i/ili pare u posudu da bi se proizveo gas bogat ugljenmonoksidom i vodonikom koji se zove sintetski gas – singas. Singas se može koristiti kao gorivo za dizel motore, za grejanje i za proizvodnju električne energije u gasnim turbinama. Takođe se može tretirati da bi se odvojio vodonik od gasa, a vodonik se može spaljivati ili koristiti u gorivim ćelijama (Rathore and Panwar, 2021).

Proces hemijske konverzije poznat kao trans-esterifikacija koristi se za pretvaranje biljnih ulja, životinjskih masti i masti u metil estre masnih kiselina (fatty acid methyl esters, FAME), koji se koriste za proizvodnju biodizela.

Biološka konverzija uključuje fermentaciju za pretvaranje biomase u etanol i anaerobnu digestiju za proizvodnju obnovljivog prirodnog gasa. Etanol se koristi kao gorivo za vozila. Obnovljivi prirodni gas, koji se takođe naziva biogas ili biometan, proizvodi se u anaerobnim digestorima u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda i u mlečnim i stočarskim pogonima. Takođe, može se naći i biti zahvaćen na deponijama čvrstog otpada. Pravilno tretiran obnovljivi prirodni gas ima istu upotrebu kao prirodni gas iz fosilnih goriva.

Svi procesi konverzije rezultuju finalnim proizvodom čiji kvalitet zavisi od sastava i osobina materijala izvorne biomase koja je za proizvodnju konkretnog energenta bila korišćena.

5.2. Sastav i osobine biomase

Kada se radi o svojstvima goriva, njihova kalorijska vrednost zavisi od njihovih fizičkih i hemijskih osobina. U cilju opravdanja i podsticanja korišćenja biomase kao alternative za fosilna goriva, možemo porediti fizičke i hemijske osobine sirovina biomase sa fizičkim i hemijskim osobinama sirovina kao što su ugalj ili nafta. Na primer, kada se radi o fizičkim osobinama, kao što je sadržaj vlage, karakteristike sirovina biomase su ujednačenije u odnosu na fosilna goriva. Sadržaj vlage biomase sušene na vazduhu varira između 15 % i 20 %, dok sadržaj vlage uglja može biti bilo koja vrednost između 2 % i 30 %. Hemijska svojstva sirovina biomase, sa druge strane variraju u većoj meri zbog raznovrsnijeg elementarnog sastava što biomasu čini višestruko korisnom. Osim za dobijanje biogoriva, neke sirovine biomase se mogu koristiti i za đubrenje novih useva. U poređenju sa naftnim destilatima, bioetanol ima nižu toplotnu moć za 30 %, niži pritisak pare i zapaljivost što je korisno u zatvorenim prostorima, kao što su, na primer, rudnici (Wright at al., 2006).

U sastav biomase ulaze organska i neorganska jedinjenja, prema Slici 10.



Slika 10. Hemijski sastav biomase.

Hemijski sastav biomase se utvrđuje prilikom karakterizacije materijala i postupaka za dobijanje energenata na bazi biomase. Od hemijskog sastava biomase zavisi kakav će biti kvalitet konačnog proizvoda i da li će biti zadovoljeni standardi i zakoni.

5.2.1. Elementarni sastav biomase

Elementarni sastav biomase predstavlja maseni odnos ugljenika, vodonika, sumpora, azota i kiseonika u biomasi. Na osnovu elementarnog sastava možemo predvideti kvalitet biomase i mogućnost nastanka emisije štetnih gasova.

Osnovni sastav biomase može se predstaviti izrazom (Živković i Đorđević, 2001):

$$C + H + O + N + S + A + W = 100\% \quad (5.1)$$

U izrazu (5.1) C, H, O, N, S, A i W predstavljaju masene udele ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora, pepela i vlage, u masi poljoprivredne biomase, izraženi u %, respektivno.

Kod osušene biomase ($W = 0$) elementarna analiza pokazuje hemijski sastav biomase sveden na suhu materiju. Ova analiza određena je izrazom:

$$C_s + H_s + O_s + N_s + S_s + A_s = 100\% \quad (5.2)$$

U izrazu (5.2) Cs, Hs, Os, Ns, Ss i As su oznake za maseni udeo ugljenika, vodonika, kiseonika, azota, sumpora i pepela u suvoj masi poljoprivredne biomase, koji su kao i u (5.1), izraženi u %.

Sagorivu masu goriva možemo dobiti kada iz formule (5.2) oduzmemo mineralne materije. Prisustvo azota i kiseonika smanjuje stvarno sagorljiv sastav goriva, pa oni predstavljaju balastne materije (Đorđević i sar., 1990).

Elementarna analiza se, najčešće, određuje na suvom uzorku. Analizom se određuje udeo C, H, O, N, S, kao i sadržaj pepela. Udeo kiseonika određuje se iz razlike ukupne organske supstance biomase i zbira ostalih elemenata i pepela (Silva et al., 2019).

Brkić i sar. (2007) su utvrdili najpovoljniji hemijski sastav biomase, što je prikazano u Tabeli 5.

Tabela 5. Najpovoljniji hemijski sastav biomase (Brkić i sar., 2007)

Hemijski element	Slama (%)	Oklasak (%)	Ljuske suncokreta (%)
Ugljenik	44,84	48,31	50,57
Vodonik	5,68	5,74	5,68
Kiseonik + azot	41,48	43,13+0,66	40,91+0,57
Pepeo	8,00	2,16	2,27

U poređenju sa fosilnim gorivima, biomasa ima manji sadržaj ugljenika i vodonika, mali udeo azota i sumpora, i veći sadržaj kiseonika. Zbog toga, toplotna moć biomase je, uglavnom niža, ali je samo gorivo više ekološko.

Ugljenik se u gorivu uglavnom nalazi u obliku složenih organskih jedinjenja, zajedno sa vodonikom, kiseonikom i azotom. U čvrstim gorivima, udeo ugljenika je do 76 %. Kod poljoprivrednih ostataka udeo ugljenika je 37-46 % a kod drveta oko 50 % (*keepwarmeuropa.eu*). U biomasi, ugljenik se nalazi u slobodnom i vezanom stanju (u jedinjenjima, uz vodonik, kiseonik, azot i sumpor). Toplotna moć čistog ugljenika je 33,829 MJ/kg a adijabatska temperatura sagorevanja 2240 °C. Veći sadržaj ugljenika povećava vrednost goriva. Sagorevanjem ugljenika nastaju CO i CO₂ (Brkić, 2012).

Vodonik se u biomasi nalazi samo u vezanom stanju. Procentualni udeo vodonika u biomasi je oko 5-8 %. Sagorevanje 1kg vodonika oslobađa 143,20 MJ/kg toplote kada se produkt sagorevanja nalazi u tečnoj fazi, odnosno 119,60 MJ/kg kada se nalazi u parnoj fazi (Gulić i sar., 1991). Adijabatska temperatura sagorevanja vodonika je oko 2235 °C.

Kiseonik u biomasi ima udeo 33-50 %. Kiseonik nije sagorivi deo goriva ali potpomaže i omogućava sagorevanje. U gorivima se javlja vezan sa drugim elementima. Deo kiseonika učestvuje u procesu oksidacije a deo ostaje vezan sa ostalim elementima u obliku CO ili CO₂.

Azot u biomasi učestvuje sa oko 0,5-2 %. Azot se u sastavu goriva nalazi u obliku organskih jedinjenja. Tokom sagorevanja, zajedno sa kiseonikom stvara azotne okside, NO i NO₂, i ekološki je nepoželjan.

Sumpor je neophodan tokom rasta i razvoja biljke. Tokom rasta, biljka usvaja sumpor iz zemljišta, i njegov sadržaj se je od 0,1 % do 0,5 % (Kastori, 1983; Jemcević i Đukić, 2000; Demirbas, 2005; Lucheta and Lambais, 2012). Ima toplotnu moć 9,295 MJ/kg. Nizak sadržaj sumpora je jedna od glavnih prednosti biomase u poređenju sa konvencionalnim gorivima (Brkić, 2012). Prilikom sagorevanja stvara sumpor-dioksid (SO₂) koji je ekološki nepoželjan a na nižim temperaturama sa vlagom može da gradi sumpornu i sumporastu kiselinu koje su agresivne i takođe nepoželjne.

5.2.2. Mineralne materije

Mineralne materije predstavljaju balast. Suva materija biomase sastoji se od organskog i neorganskog dela. Tokom sagorevanja, organski deo sagoreva, a neorganski (mineralni) zaostaje u vidu pepela. Sadržaj mineralnih materija u biomasi zavisi od različitih faktora, kao što su biljna vrsta, starost biljke, klimatski uslovi, pedološke osobine zemljišta i primenjene agrotehničke mere (Radanović et al., 2006). Mineralne materije čine oko 3 % suve materije većine biljaka. Procentualni udeo mineralnih materija kod šumske biomase iznosi oko 2 % a kod poljoprivredne biomase oko 6 %. Kod duvana, količina mineralnih materija je mnogo veća, pre svega u listu, gde može iznositi 8-23 %, dok je sadržaj u stabljici oko 7 % (Malnar et al., 2015b).

U sastav pepela ulaze silicijum-dioksid, oksidi aluminijuma, gvožđa i kalcijuma. U manjoj količini prisutni su i oksidi magnezijuma, natrijuma, kalijuma i titanijuma.

Reakcijom alkalnih elemenata i silicijuma formiraju se alkalni silikati, npr. Na_2SiO_3 koji se tope ili omekšavaju na nižim temperaturama, tako da dolazi do postepenog omekšavanja čestica pepela i do njihovog slepljivanja.

Ako pored veće količine alkalnih elemenata, biomasa sadrži i hlor (Cl) u većim količinama, dolazi do formiranja kalijum hlorida (KCl), jedinjenja niske tačke topivosti (oko 790 °C) koje ima važnu ulogu u mehanizmu korozije.

Prilikom sagorevanja, silicijum, kalijum i hlor se talože i uzrokuju abraziju grejnih površina. Zbog toga pepeo predstavlja jedan od najvećih problema tokom sagorevanja biomase. Usled visokih temperatura, mineralne materije se tope, a nakon toga očvšćavaju. To može dovesti do problema u samoj peći, kao i začepjenja odvoda za dovod goriva.

Problemi topivosti se mogu rešiti termički (sagorevanjem na nižoj temperaturi što se izbegava zbog povećane koncentracije ugljen monoksida) ili hemijski (hemijskim tretmanom biomase pre sagorevanja).

U procesu pripreme biomase ona se može tretirati aditivima koji mogu biti organski, metal organski, neorganski ili kombinovani. Primer za to je PAC-KK-S Mg-Nit, koji, testiran u laboratorijskim uslovima, potvrđeno sprečava nastajanje naslaga na grejnim površinama i dodatno dovodi do povećanja stepena hemijskog iskorišćenja goriva (*keepwarmeurope.eu*).

Dok je pepeo konvencionalnih goriva štetan za životnu sredinu, pepeo biomase se može koristiti kao mineralno đubrivo (Brkić i sar, 2007; Obernberger and Supančić., 2009). Istraživanje Schiemenz et al. (2011) pokazalo je da dodavanje pepela poreklom iz poljoprivredne biomase (uljana repica, slama i žitarice) za gajenje heljde, obogaćuje siromašna zemljišta kao što je ilovača, pre svega u sadržaju fosfora. Ipak, ponovna upotreba pepela iz biomase kao đubriva može se koristiti samo ako je prisustvo teških metala u okviru zakonskog okvira. Međutim, postoje metode stabilizacije pepela zasnovane na upotrebi drugih nusproizvoda biomase kojima se i pored početnog većeg prisustva teških metala koji se mogu naći u pepelu, dobija konačni materijal boljih karakteristika (Pasquali et al., 2018).

5.2.3. Celuloza i lignin

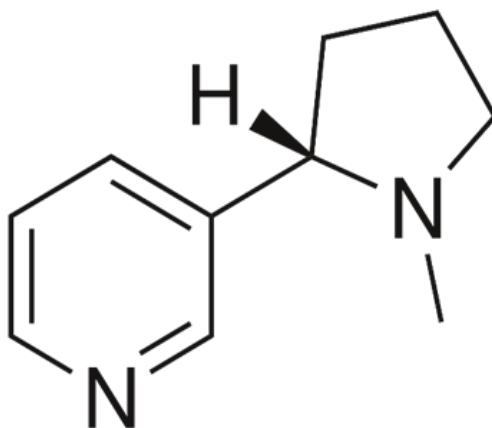
Glavne komponente biomase su celuloza i lignin.

Celuloza je nerastvorljiva u vodi i organskim rasvaračima. Sadržaj celuloze zavisi od biljne vrste. Kod listopadnog drveća sadržaj celuloze je 43-45 %, dok je kod četinarara 53-54 %. Kod duvana, sadržaj celuloze je najveći u stabljici, i iznosi do 35 %.

Lignin je komponenta koja spaja celulozu i hemicelulozu u biljnim ćelijama. To je polimer aromatičnih ugljovodonika i samim tim ima vrlo specifičnu strukturu. U listu duvana nalazi se u količini od 4-5 %, a u stabljici čak do 20-30 %. Kod listopadnog drveća, sadržaj lignina je 19–26 %, dok je kod četinarara 26–29 % (Radojičić, 2011; Savić i Adžić, 2013).

5.2.4. Nikotin

Nikotin $C_{10}H_{14}N_2$ je glavni alkaloid biljke duvana, koji sadrži nekondenzovane petočlane i šestočlane ugljenične prstenove. Sadržaj nikotina varira, u zavisnosti od tipa i sorte duvana i može biti 0,3-10 %. Struktura nikotina je prikazana na Slici 11 (Nikolić, 2004).



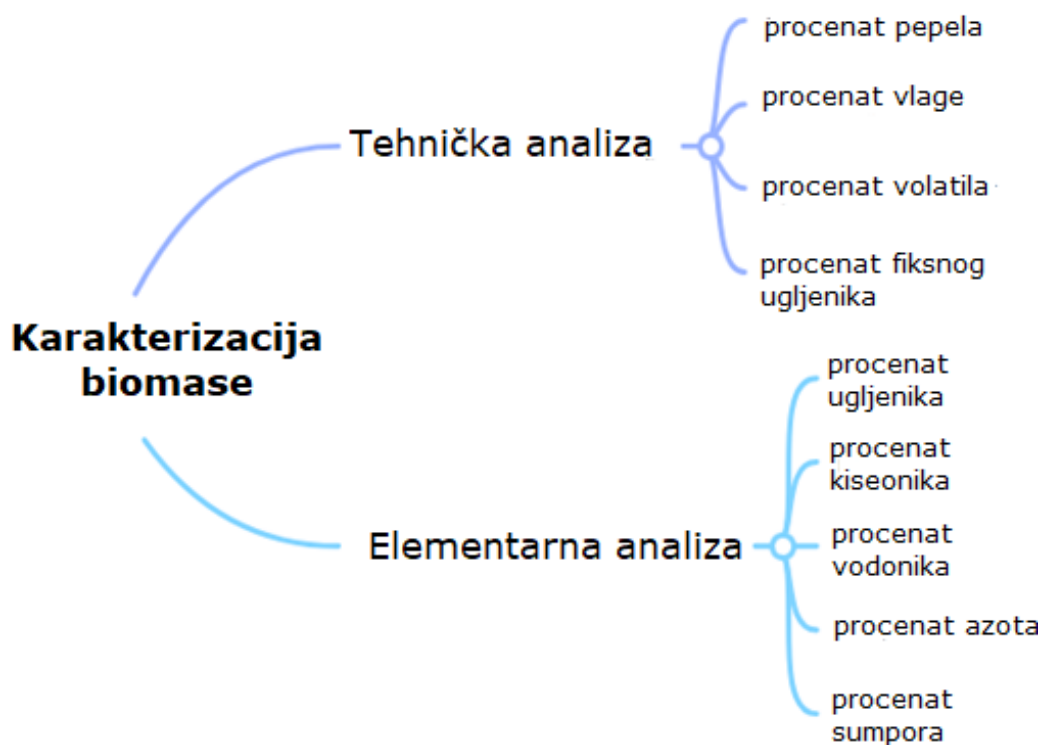
Slika 11. Hemijska struktura nikotina (Nikolić, 2004).

Nikotin je bezbojna uljasta tečnost. U dodiru sa vazduhom, nikotin tamni i postaje svetlosmeđe boje.

Sadržaj nikotina u duvanu može se odrediti gravimetrijskom, spektrofotometrijskom analizom, ili hromatografijom (tečnom i gasnom) (Đorđević, 1981; Nikolić, 2004; Radojičić, 2011).

5.2.5. Karakterizacija biomase

Za karakterizaciju biomase koriste se tehnička i elementarna analiza. Kao što je prikazano na Slici 12, tehničkom analizom (proximate analysis) se određuje procenat količine vlage, pepela, isparljivih materija - volatila (VOC, volatile organic matter) i vezanog ugljenika (FC, fixed carbon), a elementarnom analizom se određuje količina ugljenika, kiseonika, vodonika, azota i sumpora.



Slika 12. Metode za karakterizaciju biomase.

5.3. Osobine biomase kao OIE

Sa energetskeg stanovišta, glavne osobine biomase kao OIE su toplotna moć i produkti sagorevanja. Toplotna moć je bitna zato što njome karakterišemo u kojoj je meri biomasa kvalitetna kao energent, koliko energije i pod kojim uslovima iz nje može da se dobije. Produkti sagorevanja su bitni zato što od njih zavisi u kojoj meri sagorevanje biomase, tokom njene upotrebe kao OIE, u praksi zadovoljava standarde za zaštitu životne sredine i da li produkti sagorevanja mogu da se upotrebe za đubrenje ili obnovu zemljišta.

5.3.1. Toplotna moć

Toplotna moć je količina toplote koja se oslobađa sagorevanjem jedinice biomase. Uslovljena je vrstom i sastavom biogoriva, kao i sadržajem vlage (www.psegs.vojvodina.gov.rs).

Toplotna moć biomase u velikoj meri zavisi od sadržaja vlage u biljnom materijalu. Veći sadržaj vlage, osim što otežava sakupljanje i transport materijala, zauzima mesto gorivoj masi i time uslovljava nižu toplotnu moć.

Toplotna moć može se odrediti računski i eksperimentalno. Eksperimentalno, gornja toplotna moć određuje se u kalorimetrijskoj bombi. Produkti sagorevanja se hlade na temperaturu okoline, a vodena para se kondenzuje, pri čemu predaje toplotu faze („latentnu toplotu“) okolini.

Donja toplotna moć (voda se nalazi u obliku vodene pare), može se izračunati iz izraza:

$$H_{ds} = H_{gs} - 24,4 W \text{ (kJ/kg)} \quad (5.3)$$

Gde je W - količina vodene pare u produktima sagorevanja, procentualno izražena u odnosu na apsolutnu suhu masu goriva (%).

Toplotna moć zavisi od elementarnog sastava biomase. Ukoliko je on poznat, moguće je izračunati toplotnu moć, na osnovu formule, koju su predložili Sheng and Azevedo (2005):

$$HHV = -1,3675 + 0,3137 (C) + 0,7009 (H) + 0,0318 (O) \quad (5.4)$$

Sličnu vezu predložili su i Brkić i sar. (2007):

$$HHV = 340 (C) + 1420,5 (H-O/10) \quad (5.5)$$

Mnogi autori (Demirbas, 1997; Sheng and Azevedo, 2005; Chun-Yang, 2011) našli su vezu između toplotne moći i sadržaja lignina i pepela. Demirbas (2001) je predložio formulu koja pokazuje linearnu vezu između toplotne moći i sadržaja lignina:

$$HHV = 0,0889 (L) + 16,8218 \quad (5.6)$$

2005. godine Sheng and Azevedo (2005) su predložili formulu koja pokazuje vezu između toplotne moći i sadržaja pepela:

$$HHV = 19,914 - 0,2324 \text{ Ash} \quad (5.7)$$

Jedan od novijih izraza za proračun toplotne moći na osnovu rezultata elementarne analize, konkretno na osnovu poznatih količina ugljenika, vodonika, kiseonika i azota dali su Chumsawat i Tippayawong (2020):

$$HHV \text{ (MJ/kg)} = 33,5 (C) + 142,3 (H) - 15,1 (O) - 24,5 (N) \quad (5.8)$$

Oni su, takođe, dali i izraz za izračunavanje toplotne moći kada sadržaj azota nije dat:

$$HHV \text{ (MJ/kg)} = 33,5 (C)/100 + 142,3 (H)/100 - 15,4 (O)/100 \quad (5.9)$$

Brkić i sar. (2007) navode da toplotna moć pšenične i sojine slame iznosi 12,7-16 MJ/kg, oklaska kukuruza 14,7 MJ/kg, a ljuske od suncokreta 15,6-17,5 MJ/kg. Radojičić et al. (2014a; 2014b) navode da je HHV (Higher Heating Value) duvanske stabljike 18,24-18,94 MJ/kg.

Postojanje svih ovih matematičkih modela je pokazatelj toga da je zavisnost toplotne moći od sastava biomase veoma složena za modelovanje, pa novija istraživanja idu u smeru primene veštačke inteligencije za modelovanje te zavisnosti (Laković et al., 2021). U takvoj vrsti modelovanja eksperimentalni rezultati se koriste za obučavanje veštačke neuralne mreže čija je uloga da koriguje zavisnost toplotne moći od definisanih ulaznih parametara. U radu Lakovića et al., (2021) opisani su rezultati tehničke analize - procenti količina pepela, volatila tj. isparljivih materija i fiksnog ugljenika, ponaosob. Cilj je bio videti koji od ta tri parametra (količina pepela, volatila tj. isparljivih materija i fiksnog ugljenika) u najvećoj meri utiče na brojnu vrednost toplotne moći. Po njihovim zaključcima, na brojnu vrednost toplotne moći najviše utiče količina pepela.

5.3.2 Produkti sagorevanja

Kao što je već napomenuto, osnovni sastav biomase čine ugljenik, kiseonik, vodonik, azot, sumpor, lignocelulozni materijal, mineralne primese i voda. Sagorevanjem dolazi do oslobađanja gasovitih zagađujućih supstanci: ugljenikovih oksida, sumpornih oksida, azotnih oksida i lako isparljivih ugljovodonika. Količina zagađujućih supstanci koje će se emitovati sagorevanjem zavisi od procentualne zastupljenosti elemenata koji ulaze u sastav goriva, oblika u kome se nalaze u gorivu i načina sagorevanja, kao i primenjenih mera za zaštitu životne okoline.

Sagorevanje ugljenika

Ugljenik je najvažnija komponenta goriva, njegovim sagorevanjem nastaje najveći deo toplote koju gorivo oslobađa. Da bi sagorevanje bilo moguće ugljeniku je potrebna određena količina kiseonika.

Potpunim sagorevanjem ugljenika nastaje CO₂, a nepotpunim CO. Za razliku od fosilnih goriva, sagorevanjem biomase ne dolazi do povećanja CO₂. Sagorevanjem biomase emituje se količina CO₂ koja je ekvivalentna onoj koju je biljka usvojila tokom rasta (Čojbašić i sar., 2011).

Reakcija potpunog sagorevanja je:



Odnosno:



Ili:



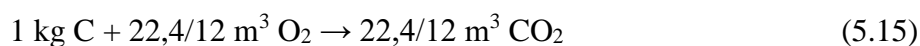
Stehiometrijska jednačina sagorevanja jedinice mase jedinjenja je:



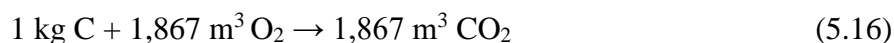
Ili:



Nakon normiranja to je:



Odnosno:



Zapremina nastalog CO₂ u m³/kg, pri normalnim uslovima (t=0°C, P = 101325 Pa) usled sagorevanja ugljenika biće (Ćojbašić i sar., 2011):

$$V (\text{CO}_2) = 1,867 \cdot C/100 \quad (5.17)$$

Sagorevanje sumpora

Sagorevanjem sumpora uz prisustvo dovoljne količine vazduha, dolazi do obrazovanja SO₂ i SO₃.

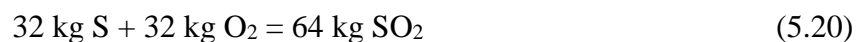
Reakcija potpunog sagorevanja sumpora je (Ćojbašić i sar., 2011):



ili:



Ili:



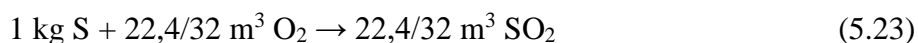
To je:



Odnosno:



Zatim normiramo sa 32:



Čime se dobije:



Zapremina nastalog SO₂ u m³/kg, pri normalnim uslovima je (Ćojbašić i sar., 2011):

$$V(\text{SO}_2) = 0,7S/100 \quad (5.25)$$

Kao što je već rečeno, biomasa uglavnom ne sadrži sumpor, pa ne dolazi ni do stvaranja sumpornih oksida.

Sagorevanje vodonika

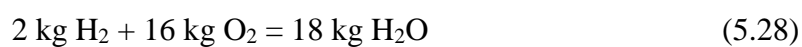
Sagorevanje vodonika opisujemo sledećom jednačinom (Ćojbašić i sar., 2011):



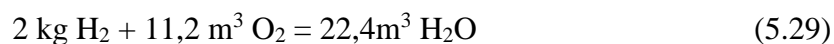
Molarni odnos:



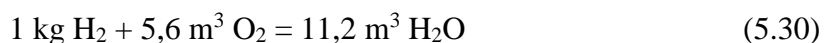
Maseni:



Odnosno:



Ili:



U produktima sagorevanja prisutna je i vlaga (W) koja potiče iz goriva, tako da je njena zapremina (u m³/kg), pri normalnim uslovima (Ćojbašić i sar., 2011):

$$V (\text{H}_2\text{O}) = 11,2 \text{ H}_2/100 + 1,24 \text{ W}/100 \quad (5.31)$$

Sagorevanje azota

U produktima sagorevanja prisutan je azot (N₂). Elementarni azot koji se nalazi u gorivu, tokom sagorevanja pretvara se u N₂O, NO, ili u N₂ (Ćojbašić i sar., 2011).

$$1 \text{ mol N}_2 \text{ zauzima } 22,4 \text{ dm}^3 \quad (5.32)$$

Odnosno:

$$22,4 / (14+14) = 0,8 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (5.33)$$

Zapremina N₂, V (N) u produktima sagorevanja je:

$$V (N) = 0,8N_2/100 + 79/100 L_{\text{min}} \quad (5.34)$$

Pri čemu se prvi član ove jednačina odnosi na prisustvo N₂ u gorivu, a drugi na prisustvo azota u vazduhu (79 %).

Određivanje minimalno potrebne količine vazduha i kiseonika

Minimalno potrebna količina kiseonika predstavlja neophodnu količinu kiseonika za potpuno sagorevanje svih gorivih elemenata. Izračunava se na osnovu poznatog elementarnog sastava goriva i minimalno potrebnih količina kiseonika za potpuno sagorevanje svih gorivih elemenata. Minimalnu količinu kiseonika možemo da izračunamo na osnovu izraza:

$$O_{\text{min}} = [1,867C + 5,6(H - O/8) + 0,7S] / 100 \quad (5.35)$$

Potrebne količine kiseonika za gorive elemente dobijene su iz stehiometrijskih jednačina sagorevanja i iznose za ugljenik $O_{\text{min}} = 1,867 \text{ m}^3/\text{kg}$, vodonik $O_{\text{min}} = 5,6 \text{ m}^3/\text{kg}$ i za sumpor $O_{\text{min}} = 0,7 \text{ m}^3/\text{kg}$ (Živković i Đorđević, 2001).

Da bi sagorevanje bilo moguće, neophodan je kiseonik iz vazduha, zbog čega je potrebno odrediti minimalnu količinu vazduha koja će sadržati minimalno potrebnu količinu kiseonika za sagorevanje (Štrbac i sar., 2011). Izračunava se na osnovu poznate minimalno potrebne količine kiseonika i učešća kiseonika u vazduhu (L_{min} , m^3/kg):

$$L_{\text{min}} = O_{\text{min}}/0,21 \quad (5.36)$$

Gde je 0,21 približna vrednost masenog učešća kiseonika u vazduhu.

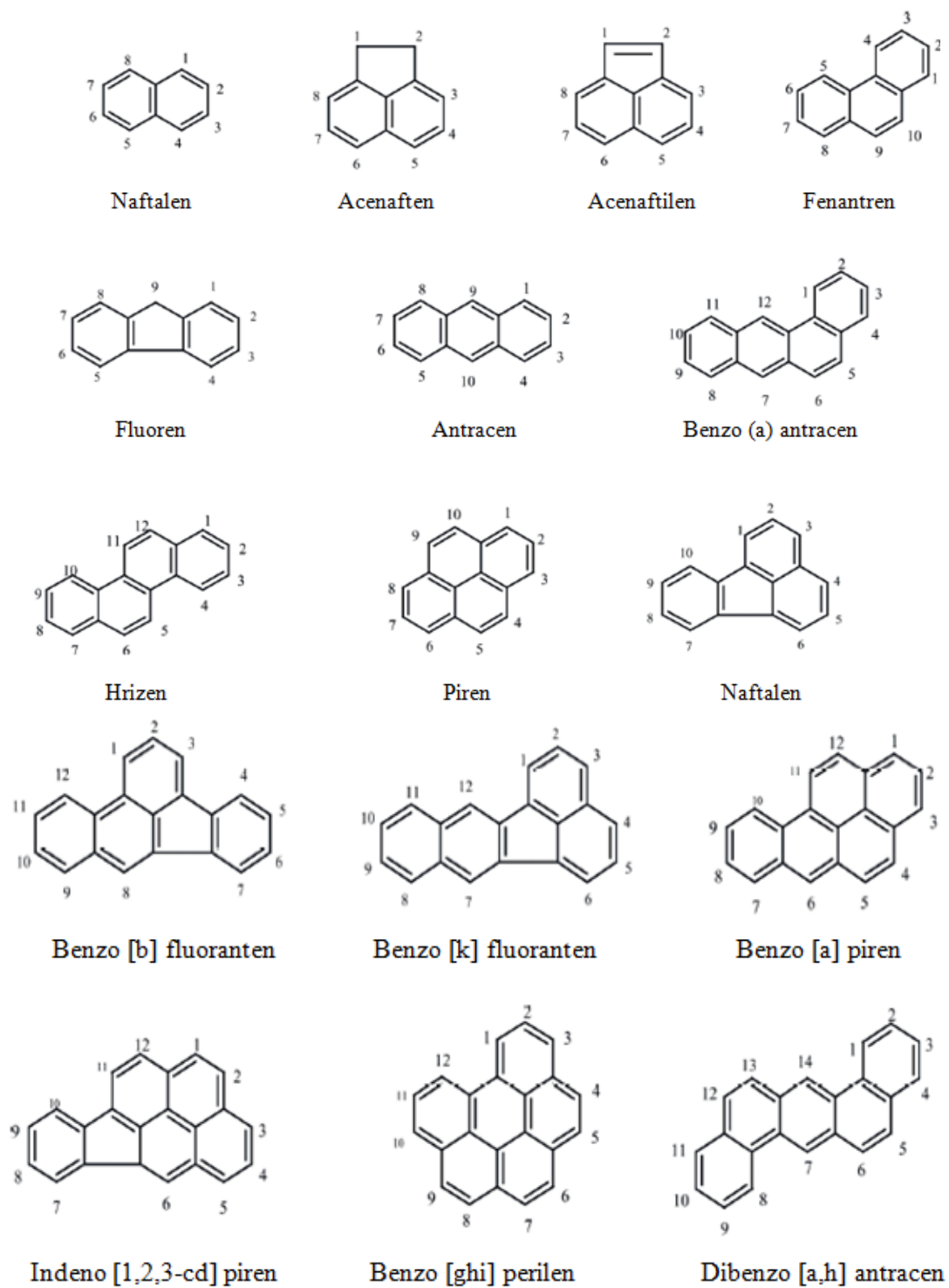
5.3.3 Policiklični aromatični ugljovodonici

Dekarbonizacija atmosfere je jedan od stubova Zelene agende koja predstavlja strategiju Evropske komisije za odgovor na izazove klimatskih promena i očuvanje životne sredine. Dekarbonizacija podrazumeva smanjenje emitovanja gasova staklene baste, najviše ugljen-dioksida, u atmosferu smanjenjem upotrebe fosilnih goriva - uglja, nafte i gasa, i korišćenjem obnovljivih izvora energije, poput solarne i energije vetra ali i geotermalne energije, hidroenergije, kao i biomase. Međutim, korišćenje biomase ne obezbeđuje dekarbonizaciju atmosfere kako bi se očekivalo, jer kao posledica njenog nepotpunog sagorevanja nastaju čestice čađi i različita organska jedinjenja, među kojima su najznačajniji i najzastupljeniji policiklični aromatični ugljovodonici.

Policiklični aromatični ugljovodonici (PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons) su grupa organskih jedinjenja sa dva ili više kondenzovanih aromatičnih prstenova. To su uglavnom nepolarna, lipofilna jedinjenja koja lako isparavaju. Postoji veliki broj prirodnih i antropogenih emisionih izvora ovih jedinjenja. Prirodni izvori su vulkanske erupcije i požari (Bao et al., 2019), dok su antropogeni izvori mnogostrukih: sagorevanje fosilnih goriva, industrijski procesi, saobraćaj, sagorevanje biomase (Tobiszewski and Namieśnik, 2012). Kao razlog za nastanak PAH-ova ističu se procesi pirolize i nepotpuno sagorevanje organske supstance, pri čemu znatno veći doprinos ukupnoj količini prisutnih PAH-ova u vazduhu, zemljištu i sedimentima daju antropogeni izvori od kojih je najznačajnije sagorevanje goriva (Ravindra et al., 2008). Ukupna globalna emisija PAH-ova je procenjena na oko 520 Gg godišnje u 2004. godini, od kojih je preko 80% bilo iz zemalja u razvoju, a procenjuje se da više od polovine nastaje sagorevanjem biomase (Hussain et al., 2016; Sun et al., 2018). Ovako visok udeo PAH jedinjenja koja nastaju sagorevanjem biomase najvećim delom je posledica nekontrolisanog sagorevanja biomase u domaćinstvima, pre svega u ruralnim područjima.

Sveprisutnost PAH-ova u geosferi (litosferi, hidrosferi, atmosferi), pored mnogostrukih mogućnosti nastanka, u velikoj meri je rezultat njihovih fizičko-hemijskih osobina. Uzimajući u obzir i njihovu visoku toksičnost, ali i mutagena, kancerogena i teratogena svojstva velike većine ovih jedinjenja, PAH-ovi predstavljaju veliki ekološki izazov, te je praćenje njihove koncentracije u uzorcima iz životne sredine i hrane od izuzetnog značaja.

Ukupno je otkriveno više od 100 jedinjenja iz grupe PAH-ova, ali je Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (eng. Environmental Protection Agency, EPA USA) definisala 16 prioriternih PAH jedinjenja čije se koncentracije prate u životnoj sredini. Preporuka za praćenje ovih 16 jedinjenja je usvojena i od strane Evropske Unije, a zasniva se na pretpostavci da su ovi PAH-ovi štetniji od drugih, da su u odnosu na ostale PAH-ove zastupljeniji u životnoj sredini, te je i izloženost živih bića ovim jedinjenjima znatno verovatnija (Liu et al., 2008). Izabrani PAH-ovi su: naftalen, acenaftilen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, piren, krizen, benzo(a)antracen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)piren, indeno(1,2,3-c,d)piren, benzo(g,h,i)perilen i dibenzo(a,h)antracen. Molekulske formule ovih jedinjenja, skraćenice koje se uobičajeno koriste i njihova molekulska masa su date u Tabeli 6, a njihove strukturne formule su prikazane na Slici 13.



Slika 13. Strukturne formule 16 prioritenih EPA PAH-ova.

Tabela 6. Spisak prioritetnih PAH jedinjenja

Naziv	Skraćenica	Hemijska formula	Molekulska težina	Broj prstenova
Naftalen	NAP	C ₁₀ H ₈	128	2
Acenaftilen	ACE	C ₁₂ H ₈	152	3
Acenaften	ACY	C ₁₂ H ₁₀	154	3
Fluoren	FLU	C ₁₃ H ₁₀	166	3
Fenantren	PHE	C ₁₄ H ₁₀	178	3
Antracen	ANT	C ₁₄ H ₁₀	178	3
Fluoranten*	FLT	C ₁₆ H ₁₀	202	4
Piren	PYR	C ₁₆ H ₁₀	202	4
Benzo[a]antracen*	BaA	C ₁₈ H ₁₂	228	4
Hrizen*	CHR	C ₁₈ H ₁₂	228	4
Benzo[b]fluoranten*	BbF	C ₂₀ H ₁₂	252	5
Benzo[k]fluoranten*	BkF	C ₂₀ H ₁₂	252	5
Benzo[a]piren*	BaP	C ₂₀ H ₁₂	252	5
Indeno[1,2,3-cd]piren	I123cdP	C ₂₂ H ₁₂	276	6
Dibenzo[a,h]antracen*	DBahA	C ₂₂ H ₁₂	276	6
Benzo[g,h,i]perilen*	BghiPe	C ₂₂ H ₁₂	278	6

* EPA klasifikovani kao potencijalno kancerogeni PAH-ovi

5.3.3.1. PAH u briketima od biomase i njihova emisija

Već je istaknuto da značajna količina PAH jedinjenja prisutnih u životnoj sredini potiče od sagorevanja biomase (Hussain et al., 2016; Sun et al., 2018). Količina PAH-ova koja će se formirati pri sagorevanju biomase zavisi od niza faktora, a najvažniji su: sastav biomase, sadržaj isparljivih i neisparljivih materija, uslovi sagorevanja (temperatura sagorevanja, količina dostupnog kiseonika, vrsta peći) i sadržaj kalijumovih soli (Zhang et al., 2022).

U prisustvu dovoljne količine kiseonika, sagoreva neisparljivi deo biomase, pri čemu se formiraju gasovi i pepeo. Međutim, sagorevanje u realnim uslovima je drugačije i dešava se uz nedovoljno prisustvo kiseonika, kiseonik reaguje sa isparljivim materijama iz biomase i sa ugljenikom u biomasi, i dolazi do nepotpunog sagorevanja. Ovi procesi dovode i do formiranja PAH-ova.

Veći sadržaj isparljivih jedinjenja u biomasi dovodi i do većih emisija PAH-ova. Ovaj problem se, donekle, može rešiti briketiranjem ili karbonizacijom, koji smanjuju isparljivi sadržaj biomase. Sun et al. (2019) su primetili da je emisija PAH-a sagorevanjem karbonizovanog kukuruza niža za 85%, odnosno 88% u slučaju karbonizovane pšenice, u odnosu na njihovo sagorevanje bez prethodne obrade. Formiranje briketa smanjuje formiranje fenil radikala i PAH-ova tokom sagorevanja. Dodatnim kombinovanjem više različitih vrsta biomasa i njihovim briketiranjem, takođe se može se uticati na intenzitet formiranja PAH-ova.

Sadržaj neisparljivih jedinjenja u biomasi ima veliki uticaj na formiranje PAH-ova. Visok sadržaj lignoceluloznog materijala, karakterističan za biomasu, značajno povećava sadržaj PAH-ova. Smatra se da povećanje sadržaja celuloze za 200-500 mg u gramu biomase povećava sadržaj PAH-ova sa 14 µg/g na čak 24 µg/g (McGrath et al., 2003).

Istaknuto je da bitnu ulogu tokom formiranja PAH-ova ima i sadržaj kalijumovih soli. Smatra se da su kalijumove soli katalizatori pirolize lignina, procesa u kojem nastaju jedinjenja koja pirosintezom daju PAH jedinjenja (Zhang et al., 2022).

Povećanje sadržaja vlage biomase, takođe dovodi do veće emisije PAH-ova. Veći sadržaj vlage izaziva nepotpunu oksidaciju biomase, što dovodi do intenzivnijeg stvaranja PAH-ova (Zhang et al., 2022).

Gustina biomase takođe utiče na formiranje i emisiju PAH-ova. Procesi peletiranja i briketiranja povećavaju gustinu biomase, što smanjuje brzinu sagorevanja i omogućava potpunije sagorevanje. Takođe, briketiranje smanjuje sadržaj vlage i isparljivih materija, što opet dovodi do manje emisije PAH-ova. Smatra se da peletiranje biomase može smanjiti emisiju PAH-ova preko 60 % (Zhang et al., 2022). Chen et al. (2015) ispitivali su uticaj briketiranja na emisiju PAH-ova uporednom analizom 20 kombinacija (5 vrsta uglja i četiri vrste peći). Rezultati su pokazali da su za tu grupu proizvoda merene vrednosti emisije za briketirane komade bile 1,9 – 3,7 puta manje nego merene vrednosti neobrađenih komada. Autori smatraju da na ovaj rezultat utiče način proizvodnje briketa i navode da je količina emisije čestične faze smanjena tokom briketiranja uzoraka.

Međutim, konačno formiranje PAH-ova zavisiće i od pritiska i relativne vlažnosti, ali i temperature gorenja, dostupnosti kiseonika i vrste peći. Viša temperatura sagorevanja dovodi do veće emisije PAH-ova, što je najverovatnije posledica efikasnije sinteze PAH-ova iz fragmenata koji su pirolizovali tokom sagorevanja (Zhang et al., 2022).

Na formiranje PAH-ova značajan uticaj ima i dizajn peći, ukoliko je neodgovarajući dovodi do niskih toplotnih performansi i visokog zagađenja. Veličina prostora i opterećenje peći utiču na emisiju PAH-ova tako što manje slobodnog prostora u peći i visoko napunjeno gorivo uzrokuju nagli porast temperature tokom sagorevanja biomase, što ubrzava nepotpuno sagorevanje. Neadekvatan put protoka vazduha, dovodi do nedovoljnog mešanja kiseonika sa gorivom i podržava nepotpuno sagorevanje, te novije projektovane peći za sagorevanje peleta i briketa od biomase omogućavaju efikasniju cirkulaciju vazduha pa time i dovoljnu količinu kiseonika za sagorevanje, što omogućava odgovarajuću kontrolu temperature sagorevanja (Zhang et al., 2022).

Količina formiranih PAH-ova u velikoj meri zavisi i od načina sagorevanja, tj. da li se ono događa u pećima ili na otvorenom (šumski požari, paljenje poljoprivrednog otpada na njivama). Koncentracije PAH-ova u situacijama kada se biomasa pali na otvorenom, veće su 2,80-9,54 puta u odnosu na sagorevanje biomase u peći, što znači da tradicionalno spaljivanje biomase na njivi, osim rasipanja resursa dovodi i do ozbiljnih ekoloških problema (Zhang et al., 2022).

Na osnovu prikazanih istraživanja može se zaključiti da je načinom dobijanja proizvoda koji se sastoje od takozvanih blokova biomase, tj. peletiranjem i briketiranjem, moguće povećati gustinu biomase i efikasnost njenog sagorevanja i pri tome dodatno i smanjiti količinu PAH-ova koji se pojavljuju prilikom njihovog formiranja i u produktima sagorevanja biomase (Zhang et al., 2022).

5.3.3.2. Emisioni faktori PAH jedinjenja nastalih sagorevanjem biomase

Emisioni faktori su kvantitativne vrednosti koje predstavljaju količinu PAH jedinjenja emitovanih po jedinici sagorene mase goriva. Vrednosti emisionih faktora PAH jedinjenja nastalih iz biomase značajno se razlikuju među različitim vrstama biomase, ali mogu biti značajno različiti i za istu vrstu biomase, što zavisi i od vrste sagorevanja (otvoreno sagorevanje, sagorevanje u pećima, kotlovima), tehnologije sagorevanja, temperature sagorevanja i drugih faktora (Zhang et al., 2022). Tako da izmerene vrednosti variraju u zavisnosti od okolnosti sagorevanja, a uz činjenicu da je kvantifikacija ovih emisija prilično složena postoje velike razlike u emisijama PAH jedinjenja i za istu vrstu biomase, što se jasno može videti i u primerima izdvojenim u Tabeli 7. U nekim slučajevima se vrednosti emisije PAH jedinjenja razlikuju po nekoliko puta, pa čak i za red veličine. Tako su za sagorevanje kukuruzne stabljike dobijene vrednosti emisije PAH jedinjenja u rasponu od 5,61 do 229 mg kg⁻¹. (Shen et al., 2013, Du et al., 2020, Zhang et al., 2022)

Tabela 7. Emisioni faktori pojedinih vrsta biomase i ugljeva

Emisioni izvor	Emisioni faktor (mg kg⁻¹)	Napomena	Referenca
Ostaci različitih vrsta biomase	13,9 – 49,4	11 vrsta biomase, 16 PAH	Singh et al., 2013
Pšenična slama	27 - 142	Peć u domaćinstvu, 16 PAH	Shen et al., 2011
Pirinčana slama	5,26	Konstruisana peć za oglede, 16 PAH	Zhang et al., 2011
Pirinčana slama	9,29 – 23,6	Mereno na različitim temperaturama sagorevanja	Lu et al., 2009
Slama od mahunarki	3,13 – 49,9	200 – 700 °C	
Drva za grejanje	21,1 – 66,7	13 vrsta drva za grejanje, različite peći	Singh et al., 2013
Drva za grejanje	74,2 ± 50,1	Peći sa gasifikatorom, 22 PAH	Shen et al., 2015
Drva za grejanje	179 ± 248	Peći u domaćinstvima, 22 PAH	Du et al., 2020
Briketi od piljevine	260	Mala peć u domaćinstvima, 17 PAH (16 PAH + BeP), HPLC	Kim O. et al., 2002
Kukuruzna stabljika	19,0	Zidana peć za kuvanje	Zhang et al, 2022
Kukuruzna stabljika	16,7	Konstruisana peć	Zhang et al, 2022
Kukuruzna stabljika	39,3	Peći u domaćinstvima, 16 PAH	Shen et al., 2013
Kukuruzna stabljika	169 -229	16 PAH, Peć u domaćinstvu	Du et al., 2020
Kukuruzna stabljika	5,61 – 85,0	16 PAH	Zhang et al., 2022
Klip kukuruza	8,19	16 PAH, Laboratorijska konstruisana peć	Fakinle et al., 2022
Pšenična slama	65,2	Zidana peć za kuvanje	Zhang et al, 2022
Komadi uglja	2,27 ± 1,607	Konstruisana peć za oglede, 16 PAH	Zhang et al., 2011
Antracit	6,25 ± 1,16	Peć u domaćinstvu, 16 PAH	Shen et al., 2010

Generalno se smatra da biomasa daje niže emisione faktore u odnosu na fosilna goriva, pre svega zbog visokog sadržaja aromatskih jedinjenja u fosilnim gorivima. Opet, i ovde treba istaći da veoma važnu ulogu u formiranju i emisiji PAH-ova imaju i tehnologije sagorevanja, pa u nekim slučajevima emisije PAH jedinjenja nastalih sagorevanjem biomase mogu biti više od onih koje nastaju sagorevanjem fosilnih goriva (Tabela 7). Međutim, iz tabele se vidi da čak i sagorevanjem u pećima za domaćinstva antracit može dati niže emisije u odnosu na druge vrste uglja, ali i na mnoge vrste biomase. Ovo je posledica činjenice da antracit ima manji sadržaj isparljivih jedinjenja u odnosu na druge vrste uglja, pa se i manje PAH jedinjenja formira.

5.3.3.3. Metode za određivanje PAH-ova nastalim sagorevanjem biomase

Analiza PAH-ova nastalih sagorevanjem biomase je složen proces i obuhvata više faza: uzimanje uzorka, odnosno „trapovanje“ PAH jedinjenja, ekstrakciju PAH-ova, prečišćavanje dobijenih ekstrakata i kvalitativno, odnosno kvantitativno određivanje PAH jedinjenja. Vezivanje PAH jedinjenja iz dima je prvi bitan korak pri određivanju PAH-ova i za tu svrhu se najčešće koriste „glass fiber filtri“, ali i filtri na bazi celuloze (Mastral and Callen, 2000).

Tako vezana PAH jedinjenja se zatim ekstrakcijom nekim slabo polarnim organskim rastvaračem ekstrahuju tradicionalnim ekstrakcionim metodama, Soxhlet ekstrakcijom, ultrazvučnom ekstrakcijom ili „supercritical fluid ekstrakcijom“ (Pandey et al., 2011, Castro-Guijarro et al., 2021). Za ekstrakciju PAH-ova koriste se slabo polarni organski rastvarači, najčešće dihlormetan, toluen ili smeše rastvarača, kao smeša aceton/heksan, benzen/heksan. Pošto organski rastvarači nisu dovoljno selektivni, iz uzorka se pored PAH-ova ekstrahuju i neka druga jedinjenja, pa se njihovo uklanjanje postiže prečišćavanjem dobijenog ekstrakta.

Za kvalitativnu i kvantitativnu analizu PAH-ova najjednostavnija je primena hromatografije, pri čemu su najefikasnije metode tačne hromatografije visokih performansi (HPLC), gasne hromatografije – detekcije jonizacije plamena (GC-FID) ili gasne hromatografije – masene spektrometrije (GC-MS). Sve ove metode su našle svoju primenu i podjednako se koriste u analizi PAH-ova.

6. Briketiranje

Problem šire upotrebe biomase predstavlja njena veličina, što uslovljava probleme sa transportom, skladištenjem i čuvanjem. Rešenje je u briketiranju, u postupku prethodne pripreme biomase. Postupak briketiranja zasniva se na presovanju lignoceluloznog materijala, pri čemu se dobijaju kompaktni briketi velike zapreminske mase (Radovanović i sar., 1995; Brkić i sar., 1995).

Briketiranjem se postiže smanjenje dimenzija goriva, što olakšava skladištenje, kao i automatizaciju procesa doziranja u ložište u sistemima za grejanje koji su projektovani za brikete.

Briketi se proizvode mehaničkim ili hidrauličkim presama (Zubac, 2012). Prva presa za briketiranje starog papira upotrebljena je 1918. g. u Švajcarskoj. Briketiranje biomase počinje od 1923. godine. U Srbiji, briketiranje je prvi put izvršeno 1984. u Vojvodini, u Debeljači, a prvo briketiranje slame i kukuruza u Novom Miloševu (Radovanović i sar., 1995).

Briketi se mogu formirati presovanjem usitnjenih čestica lignoceluloznog materijala sa ili bez dodataka vezivnih sredstava. Sa ekonomske i ekološke strane, prihvatljiviji su briketi napravljeni samo od biljnog materijala, bez dodataka vezivnih sredstava. Da bi ovo bilo moguće, neophodno je da budu ispunjeni uslovi u pogledu vrste materijala, veličine čestice, pritiska, temperature i sadržaja

vlage u materijalu. Torefikacijom, odnosno sušenjem pomoću zagrevanja, postiže se poboljšanje svojstava goriva biomase.

Briketi su najčešće valjkastog oblika. Prečnik briketa može biti 25-90 mm, a dužina je promenljiva. Prilikom presovanja zapreminska masa se smanjuje oko 10 puta (Brkić i sar., 2007).

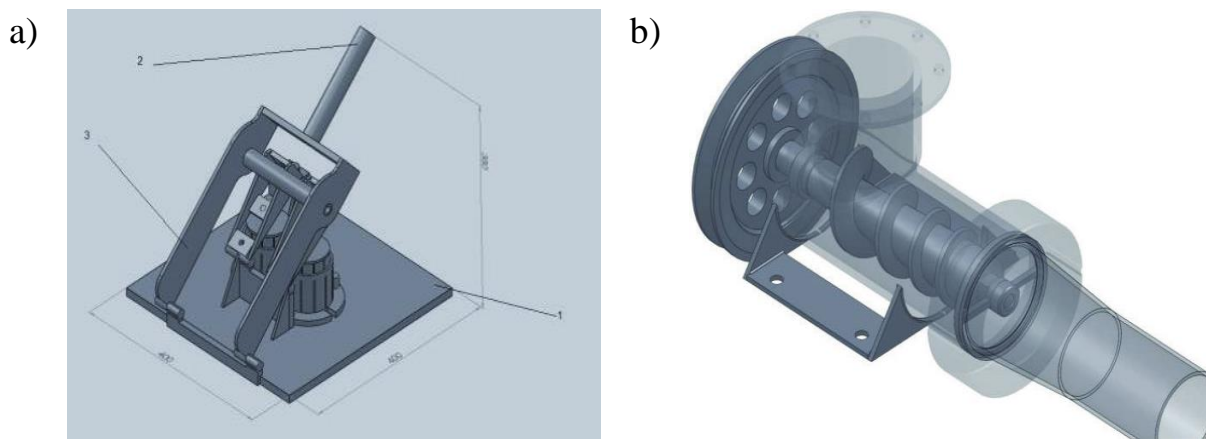
Optimalna granulacija biljnog materijala treba da bude do 3 mm. Sadržaj vlage je oko 10-15 %. Napravljeni briketi se pakuju u termoskupljajuću foliju, kartonske kutije, papirne ili plastične vreće. Toplotna vrednost briketiranog materijala je od 16-18 MJ/kg. Sagorevanje briketa je ekološko jer se tokom sagorevanja izdvaja manja količina pepela u odnosu na količinu prilikom sagorevanja fosilnih goriva, a istovremeno nema oslobađanja sumpornih oksida.

Pored toga što su jeftinije gorivo od fosilnih goriva i što imaju manje ili nimalo sumpora, pa ne zagađuju životnu sredinu kao tokom upotrebe fosilnih goriva, briketi od biomase imaju manji udeo pepela (2-10 % za razliku od 20-40 % koliko je obično kod uglja) i ravnomernije sagorevanje (Kuthe et al., 2021). Velika prednost upotrebe briketa od biomase je mogućnost njihove proizvodnje blizu mesta upotrebe i smanjivanje problema koji su vezani za transport i logistiku na velikim rastojanjima.

Briketiranje, a i peletiranje, imaju niz prednosti u odnosu na biomasu u neprerađenom obliku. Pre svega, to su već pomenuti unificiranost oblika, mogućnost automatizacije doziranja, manja količina vlage i povećana toplotna moć. Međutim nedostatak je visoka cena. Za cenu peleta od 150-200 EUR/t je, u okviru istraživanja tokom projekta KeepWarm Europe (keepwarmeuropa.eu), imajući u vidu toplotnu moć peleta od oko 14 MJ/kg, procenjeno da jedna ekvivalentna tona nafte ove biomase vredi 600 EUR. U trenutku pisanja ove disertacije jedna tona peleta vredi 323 EUR a jedna tona briketa čak 365 EUR (www.ogreviverak.com).

U tehnologiji briketiranja se za oblikovanje briketa može koristiti klipni kalup, kada se odvija šaržno briketiranje ili se može koristiti pužni kalup, i u tom slučaju se radi o kontinualnom briketiranju.

Komitov and Kehajov (2016) su u svom radu opisali mašine za prikupljanje i upotrebu ostataka biomase prilikom proizvodnje duvana. Oni su, između ostalog, dali skice te dve vrste kalupa, koje su prikazane na Slici 14 a) (kalup sa ručnom klipnom presom) i 14 b) (kalup sa pužnom, odnosno vijčanom presom i ekstruderom).



Slika 14 .a) Klipna presa: 1 podloga, 2 poluga kojom se pritiska klip 3 oslonac poluge; b) kalup sa pužem.

U istraživanju (Kuthe et al., 2021) izvršeno je poređenje dva tipa presa u kalupima za pravljenje briketa: vijčana, kružna ekstruder presa, iz koje se biomasa ekstrudira stalno zavrtnjem kroz zagrejanu konusnu matricu, i klipna presa iz koje biomasa izlazi pod pritiskom koji na nju pravi klip. Potrošnja energije prilikom korišćenja prese sa vijčanim ekstruderom je manja od potrošnje

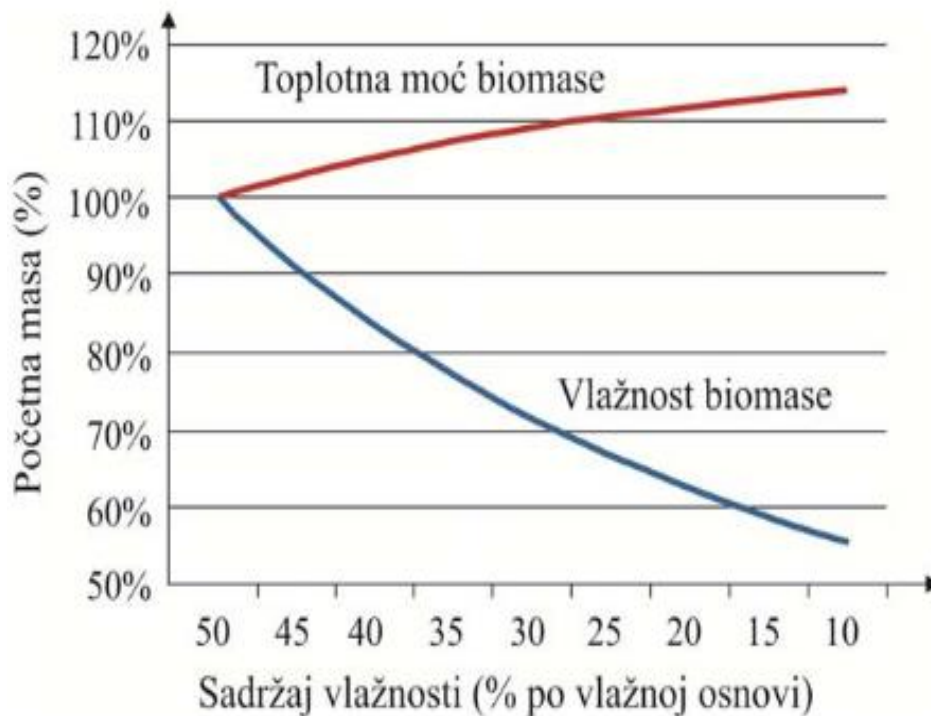
energije prilikom korišćenja klipne prese. Prese sa vijčanim ekstruderom se smatraju tehnološki naprednijim. Razlog je osovina oko koje se formiraju briketi. Kad briketi izađu iz prese, unutra su šuplji. Tokom sagorevanja ovakvi briketi sagorevaju ravnomernije.

Sirovu biomasu je, pre sabijanja u brikete, potrebno najpre sušiti, usitniti i prečistiti. Slika 15 prikazuje dva primera za sušenje biomase, podnim grejanjem i u rotacionoj sušari.



Slika 15. Oprema za sušenje usitnjene drvene biomase. Levo: pomoću podne ventilacije, desno: pomoću rotacione sušare (www.biomasa.undp.org.rs).

Kao što je prikazano na Slici 16, količina vlage u biomasu je obrnuto srazmerna njenoj toplotnoj moći. Što je bolje sušenje biomase to je manje vlage u njoj i utoliko je veća njena toplotna moć. Samim tim konačni proizvod biomase, dobijeni briket, bolji je i kao energent i kao izvor energije.

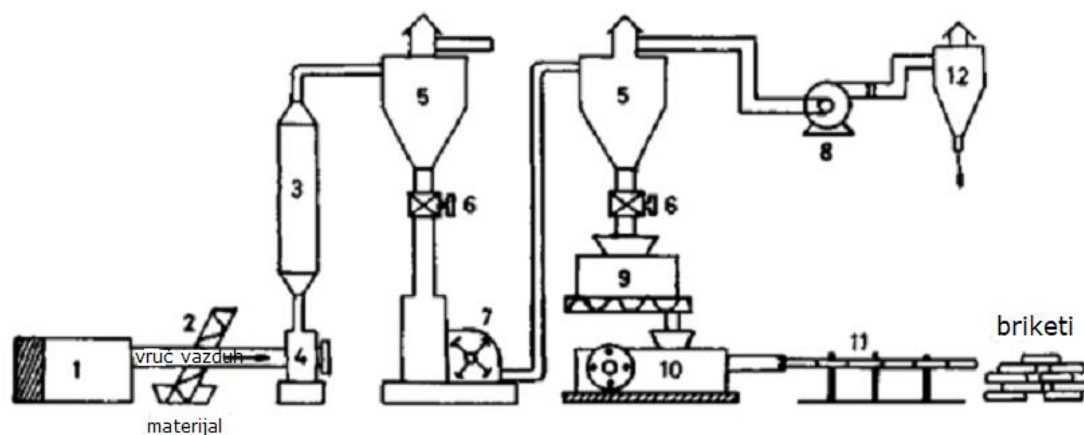


Slika 16. Zavisnost toplotne moći od smanjenja vlažnosti biomase tokom sušenja (www.biomasa.undp.org.rs).

Nakon sušenja, biomasa se usitnjava radi postizanja željene granulacije i radi usitnjavanja dugačkih celuloznih vlakana. Celulozna vlakana nije lako usitniti. Zato se u postrojenjima koristi mlin čekićar sa više rotirajućih diskova, koji mogu imati brzinu udara i do 110 m/s ili mlin sa noževima koji ima velike brzine (i do 900 o/min) ali zato manji kapacitet mlevenja (do 2 t/h).

Skladištenje osušene i usitnjene biomase je takođe od uticaja na konačan kvalitet dobijenih proizvoda. Usled biohemijske razgradnje postoji opasnost od samozapaljenja. U pogonima se to kontroliše merenjem sastava gasova, posebno detekcijom ugljen-monoksida koji se pojavljuje na početku samozapaljenja (*keepwarmeurope.eu*).

Slika 17 prikazuje šematski redosled postupaka tokom procesa dobijanja briketa od biomase.



Slika 17. Redosled postupaka u postrojenju za briketiranje i njegovi delovi: 1. peć / generator topleg vazduha, 2. kosi pužni dovod, 3. kolona za sušenje, 4. turbo mlin, 5. ciklonski separator, 6. vazdušne brave, 7. mlin čekićar, 8. ventilator, 9. prihvatna kanta, 10. presa za briketiranje, 11. linija za hlađenje, 12. sekundarni ciklon.

Na Slici 17 vidimo da je, osim sabijanja pripremljenog, usitnjenog i separatisanog materijala od biomase (koji se na ovoj šemi odvija u tački 10), posle njegovog sabijanja potrebno da se on kontrolisano ohladi. Istraživanja pokazuju da je faza hlađenja važan deo tehnologije proizvodnje briketa (Savić i Adžić, 2013), kao i da se briketi bolje hlade kontrolisano u liniji za hlađenje nego ako se ostave na spontanom hlađenju tokom skladištenja.

Na Slici 17 nisu ucrtani delovi za manipulaciju biomasom - kranovi za šaržno doziranje i transporter između i unutar skladišta koji su, bar sa ekonomskog stanovišta, takođe bitni za projektovanje jedne energane na biomasu.

Fizička svojstva briketa koji se proizvode u Srbiji su data u Tabeli 8.

Tabela 8. Fizička svojstva drvenih briketa koji se proizvode u Srbiji (*keepwarm europe.eu*)

Parametar, jedinica	Karakteristika	Vrednost
	Prečnik, mm	40-120
	Dužina, mm	<400
	Nasipna gustina, t/m ³	>1,00
	Sadržaj vlage, %	<10
	Sadržaj pepela, %	<0,5
	Gornja toplotna moć, MJ/kg	>18,0
	Sadržaj aditiva, %	<2

Ako uporedimo ove vrednosti sa vrednostima standarda ONORM M1735:1990, prikazanim u Tabeli 3, vidimo da je sadržaj vlage u ovim briketima manji nego što je po tom standardu zahtevano (ovde je maksimum 10 % a po standardu ONORM M1735:1990 dozvoljeno je do 18%). Zatim, sadržaj pepela je znatno manji od bilo koje granice date u standardima iz Tabele 3, a gornja toplotna moć je na nivou najviših vrednosti prikazanih standarda u toj kategoriji.

U poglavlju 4, takođe, pokazano je da je teritorija sa koje je moguće sakupljanje drvene biomase manja u odnosu na teritoriju (zemljište) sa koje je moguće sakupljanje poljoprivredne biomase (ukupan potencijal drvene biomase je manji od ukupnog potencijala poljoprivredne biomase). Uprkos tome, na tržištu su briketi od drvene biomase zastupljeniji.

7. Žetveni ostaci kao sirovina za OIE

Žetveni ostaci su biomasa koja se prikuplja i priprema neposredno nakon žetve. Žetveni ostaci imaju višestruku ulogu u poljoprivrednim godišnjim ciklusima jer se mogu koristiti:

- kao stočna hrana (neposredno ili u prerađenom obliku)
- kao prostirka u stočarstvu
- za zaoravanje u zemljište
- za malčovanje
- za kompostiranje
- za pripremanje stajnjaka
- kao građevinski materijal
- kao materijal za dobijanje energije

Ono što se takođe dešava, a nikako nije preporučljivo, iako je fizički najlakše, je spaljivanje žetvenih ostataka nakon žetve na njivama. Pad plodnosti poljoprivrednog zemljišta je evidentirana činjenica i između ostalog je i posledica ovakve prakse. Problem je i smanjenje procenta humusa u zemljištu, jer se on sporo stvara. Zaoravanjem žetvenih ostataka deo hranljivih materija se vraća

prirodi i pomaže očuvanju kvaliteta zemljišta. Korišćenje viška biomase za pripremu materijala za dobijanje energije, nakon čega se deo opet može vratiti u prirodu u obliku đubriva, je ekološki najprihvatljivije.

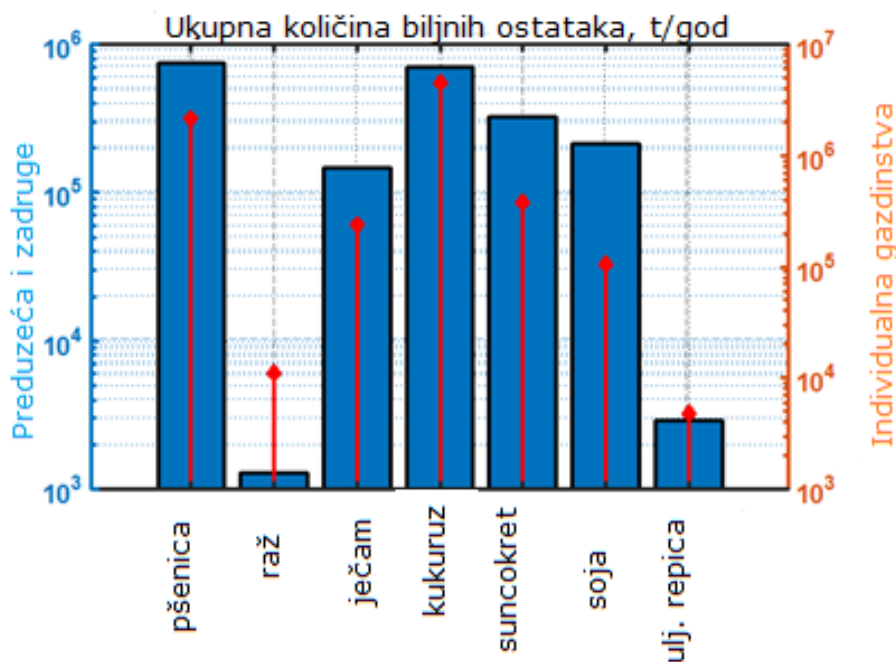
Tokom procesa pripreme biomase vrši se baliranje (presovanje u bale), koje mogu biti različitih veličina i oblika (Slika18).



Slika 18. Vrste baliranja. Gore levo: male četvrtaste bale, Gore desno: velike četvrtaste bale, dole levo: valjkaste bale, dole desno: baliranje šumske biomase (*keepwarmeurope.eu*).

Baliranjem se biomasa ujednačava po obliku i priprema za dalji transport radi direktne upotrebe u postrojenjima, koja su projektovana za biomasu u obliku bala na ulazu, ili se priprema za transport radi dalje pripreme i prerade sa ciljem proizvodnje energenata u drugim oblicima (kao što su na primer briketi).

Na Slici 19 grafički su prikazani najnoviji podaci o ukupnoj količini biljnih ostataka u Republici Srbiji koji su tabelarno dati u izveštaju projekta (*keepwarmeurope.eu*).



Slika 19. Ukupna količina biljnih ostataka prema podacima iz izveštaja projekta (*keepwarmeurope.eu*).

Kada se saberu količine biljnih ostataka koje nastanu u individualnim gazdinstvima, preduzećima i zadrugama, za biljne vrste prikazane na Slici 19, dobije se vrednost od oko 9,6 miliona tona godišnje. Pošto su žetveni ostaci od velikog značaja za agroekosistem, jer sadrže veliki broj biogenih elemenata i mogu da doprinesu očuvanju kvaliteta zemljišta, od ukupne količine biljnih ostataka za gorivo se uzima deo. Po nekoj gruboj proceni, može se računati da je od ukupne količine žetvenih ostataka oko trećina raspoloživo za gorivo, što u prikazanom primeru jeste 3 367 815 tona godišnje. Sa procenom donje toplotne moći od 13 MJ/kg ta biomasa može da obezbedi 1,05 miliona tona ekvivalenta nafte godišnje.

Hemijski sastav i masa žetvenih ostataka jako variraju jer zavise od mnogih faktora. Neki od bitnijih faktora su klimatski i vremenski uslovi, biljna vrsta i njen genotip, plodnost zemljišta, primenjene agrotehničke mere i dr. U poglavljima koja slede razmatraju se, sa stanovišta potencijalnog materijala za dobijanje energije iz obnovljivih izvora, različite biljne vrste biomase koje su bile predmet istraživanja ove doktorske disertacije:

- stabljike duvana
- glave suncokreta
- pšenična slama
- oklasak kukuruza
- sojine stabljike
- piljevina drveta bukve

7.1. Stabljika duvana

Kao osnovna sirovina za izradu uzoraka briketa korišćena je stabljika duvana tipa Berlej, koja zaostaje kao otpad nakon branja listova duvana. Visina stabljike je u proseku 180 cm. Gustina rasađivanja duvana tipa Berlej u polju je od 20 000 - 25 000 stabljika po hektaru, što omogućuje

značajnu količinu biomase, s obzirom na dimenzije i težinu koja zaostaje nakon branja listova (Radojičić, 2016).

Glavna uloga stabljike je ukorenjavanje biljke na njivi, gde predstavlja glavni rezervoar hrane. Duvanska stabljika može biti cilindrična, člankovita, pokrivena sitnim dlačicama (Uzunoski, 1987). S obzirom, da je glavni proizvod biljke duvana list, stabljike duvana su još uvek nedovoljno ispitane. Poznato je da se u stabljici nalaze značajne količine lignina (40-45 %), što daje mogućnost da se iskoriste za sagorevanje, kao gorivo. Duvanske stabljike imaju i visok sadržaj celuloze (35-40 % suve materije) (Peševski et al., 2010).

Sušenje stabljike duvana zahteva duži vremenski period u odnosu na sušenje listova. Duvan tipa Berlej je pogodan jer je proces sušenja stabljika moguće obaviti istovremeno sa sušenjem listova. Na taj način ostvaruje se ušteda u energiji koja bi bila potrebna da se pripremi za proces sušenja (Malnar et al., 2016).

Potencijalna količina biomase u proizvodnji duvana u Republici Srbiji iznosi oko 45 000 t godišnje. S obzirom na to da se oko 30 % ostavlja na njivi i zaorava, u cilju poboljšanja plodnosti i kao zaštita od eolske erozije zemljišta, raspoloživo bi bilo oko 31 500 t godišnje. Jovanović i Parović (2009), u svojim istraživanjima ističu da donja toplotna moć duvanskih stabljika iznosi 13,85 MJ/kg. Oni su pokazali da je $0,26 \times 10^3$ t duvanskog otpada ekvivalentno količini od $0,09 \times 10^3$ t ulja za loženje, što znači da je potrebno 2,89 puta ($0,26/0,09$) više biomase duvanskih stabljika. Do sličnih vrednosti došli su i istraživači sa Poljoprivrednog fakulteta u Beogradu (2,86 puta više).

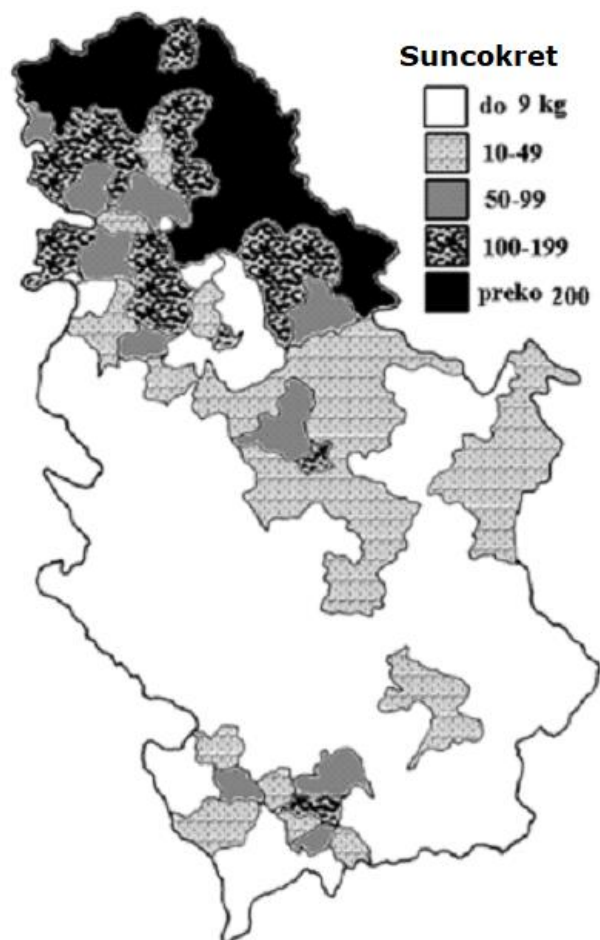
Osim primene biomase stabljika duvana za proizvodnju briketa za loženje, iz njih se energija može dobiti i hidrotermalnom karbonizacijom tako da krajnji proizvod bude hidročad. Time se, u zavisnosti od karakteristika dobijene hidročadi, postiže fleksibilnost u primeni biomase jer se hidročad, sem za direktno dobijanje energije, kada se koristi kao zamena za fosilni ugalj, može upotrebiti kao adsorbent različitih polutanata ili kao dodatak sredstvima za remedijaciju kvaliteta zemljišta. Osnovne reakcione mehanizme, uticaj procesnih parametara na kvalitet dobijene hidročadi od stabljika duvana, kao i karakterizacija same hidročadi dobijene od biomase stabljika duvana su ispitivali su Cai et al. (2016).

Ispitivanja primene duvanske biomase kao izvora energije na Tajlandu pokazuju da se ostaci duvana, u njihovom slučaju glavno rebro i prašina, mogu procesom ablativne pirolize uspešno konvertovati u biogorivo i biočad (Chumsawat and Tippayawong, 2020).

7.2. Glave suncokreta

Suncokret (*Helianthus annuus L.*) je značajna biljna vrsta u svetu i kod nas. Ukupna proizvodnja suncokreta u svetu je 23 000 000 t na oko 18 000 000 ha, dok je prosečan prinos oko 1,2 t/ha. U Republici Srbiji suncokret se gaji na oko 250 000 ha, od kojih je oko 90% u Vojvodini.

Suncokret predstavlja najznačajniji izvor biomase, kako zbog velike površine pod kojom se uzgaja, tako i zbog težine materijala biomase koji zaostaje nakon žetve. Ljuska koja zaostaje nakon ceđenja ulja, stabljika suncokreta i glava suncokreta čine oko 13% od ukupne količine godišnje biomase (Nakomčić-Smaragdakis i sar., 2015).



Slika 20. Prosečni prinos suncokreta na 100 ha obradive površine (*keepwarmeurope.eu*)

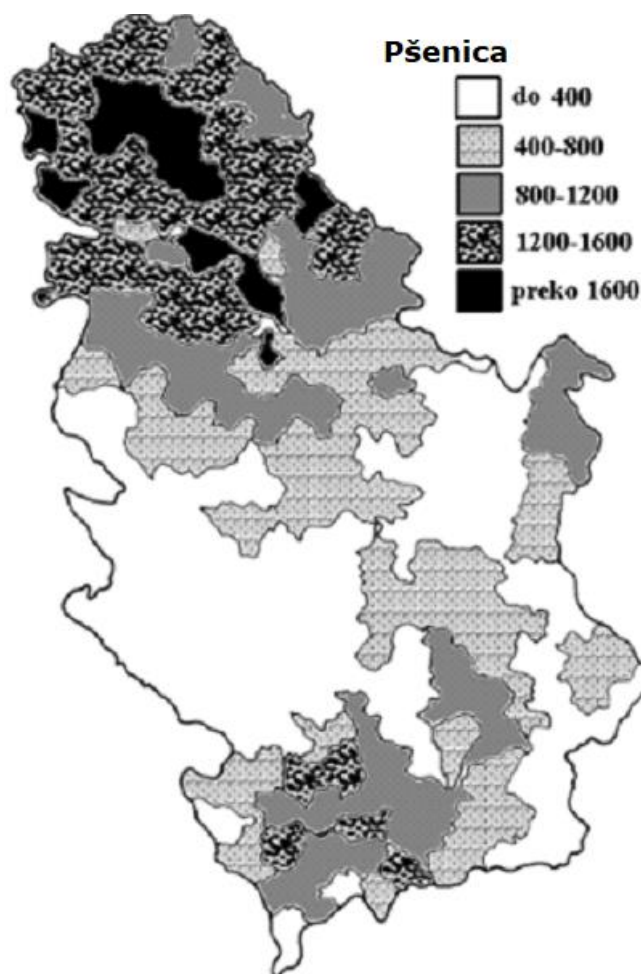
Na osnovu prinosa glava suncokreta i gornjeg dela stabljike, određuje se količina biomase koja može da se ubere pri odsecanju ispod nivoa glave. Prosečna količina žetvenih ostataka nakon ubiranja suncokreta, koja može da se iskoristi, je 32 % ukupnih žetvenih ostataka; ostala količina je potrebna kao zaštita od eolske erozije. Količina biljnih ostataka suncokreta je 2,1 puta veća od zrna. To daje žetveni indeks 0,32 (Rosentrater et al., 2009). Odnos zrno: glava: stabljika (sa granama i lišćem) je 1:1,3:2,9 (Martinov, 1982).

Žetveni indeks biljke suncokreta niži je nego kod većine ratarskih biljnih vrsta (tipično oko 0,5 za pšenicu i kukuruz). To znači da pri proizvodnji suncokreta na parceli ostaje više biljnih ostataka, odnosno, ukoliko se u obzir uzme niži prinos zrna, količina biljnih ostataka može da bude na nivou koji je uporediv sa pšenicom ili sojom. Na raspolaganju su i značajne količine ljuske suncokreta, koje ostaju pri preradi u uljarama, a uglavnom se koriste u energetske svrhe. Vrednost donje toplotne moći za vazdušno suhu stabljiku iznosi 13,9 MJ/ka, a 16,3 MJ/kg za pelete od ljuski suncokreta (Lindley et al., 1988). Gornja toplotna moć suve mase ljuski suncokreta je, prema merenjima sprovedenim u Srbiji, oko 19,1 MJ/kg, a najviše zavisi od postupka odvajanja, odnosno udela drobljenog zrna (koje ima visok sadržaj ulja i znatno višu toplotnu moć).

7.3. Pšenična slama

S obzirom da je pšenica (*Triticum* spp.), jedna od najčešće gajenih kultura, korišćenje žetvenih ostataka predstavlja potencijalno veliki izvor energije. Pšenica je, pre svega, mlinski proizvod a njen najvažniji nusproizvod - slama predstavlja stabljiku pšenice koja zaostaje nakon skidanja zrna u polju. Prema podacima o količinama zasejanih površina u Republici Srbiji

(www.stat.gov.rs) pšenična slama predstavlja jednu od najznačajnijih sirovina u pogledu korišćenja kao izvora energije.



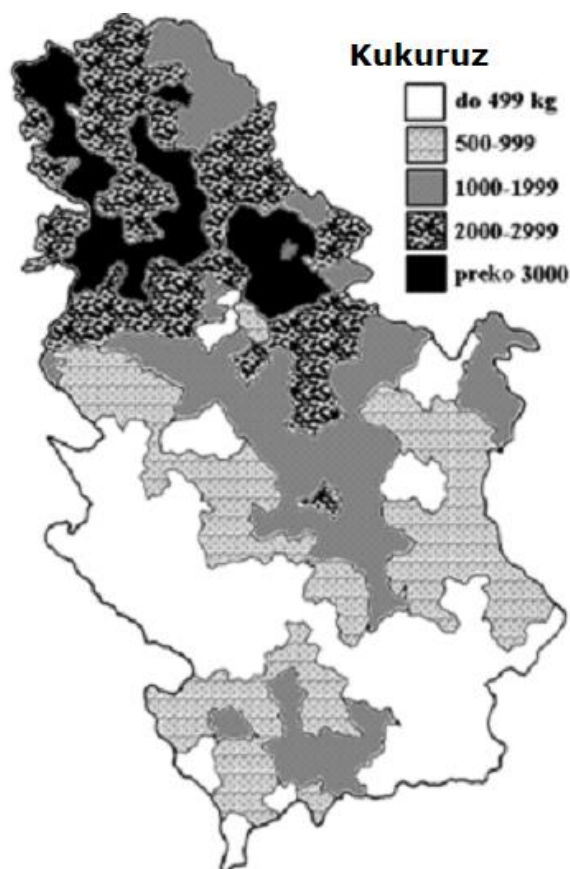
Slika 21. Prosečni prinos pšenice na 100 ha obradive površine (keepwarmeurope.eu)

Pošto izvesna količina ostaje na njivi i zaorava se, samo u Vojvodini, količina otpadne biomase koja se može iskoristiti je oko 6 miliona tona, od čega pšenična slama čini 18,7 % (1,12 miliona tona). Ako se uzme u obzir da se trećina biomase može iskoristiti u energetske svrhe, procena je da je energetska potencijal biomase iz pšenične slame 5300 TJ godišnje, odnosno 130 hiljada tona lož ulja. Vrednosti prosečnog žetvenog indeksa iznose 0,49 (Višković i sar., 2012) a zavisne su kako od ispitivanih genotipova tako i od sistema gajenja (Dolijanović et al., 2022). Na osnovu zbirnog masenog udela stabljika po visini, Jovanović i Parović (2009) su odredili količine ubrane slame i žetvenih ostataka na polju, za visinu reza kosionog aparata 15 cm, koji iznose 2,04 Mg/ha i 3,15 Mg/ha, a njihovi udeli u masi nadzemnih žetvenih ostataka iznose 39,3 % i 60,7 %, tj. oko 40-55 % u odnosu na masu zrna, zavisno od agroklimatskih uslova. Preostali žetveni ostaci na polju omogućavaju adekvatnu zaštitu od eolske erozije.

Pšenična slama ima malu toplotnu moć (oko 14 MJ/kg), ali se njenom primenom osnovni produkti zagađenja životne sredine, pre svega emisije sumpornih oksida, značajno smanjuju i gotovo su u tragovima. Takođe, mali je i sadržaj pepela (oko 11%) nakog sagorevanja (Nakomčić-Smaragdakis i sar., 2015).

7.4. Oklasak kukuruza

Kukuruz (*Zea mays* L.) je jednogodišnja biljka čija je osnovna uloga ishrana ljudi i životinja. Zajedno sa pšenicom i pirinčem, predstavlja jednu od najčešće gajenih žitarica.



Slika 22. Prosečni prinos kukuruza na 100 ha obradive površine (*keepwarmeurope.eu*)

Biljka kukuruza raste 1-3 m. Stabljika je snažna, a listovi su cevasti, linearno postavljeni. Vegetacioni period traje od aprila do oktobra. Biljka zahteva dosta svetlosti i toplote. Prosečan prinos zavisi od količine padavina. Kukuruz najbolje uspeva na černoze, crnici i aluvijalnim tipovima zemljišta (Dragović, 2008; Glamočlija, 2012; Steduto et al., 2012; Nastić, 2014).

Iz kukuruznih ostataka, kao biomase, moguće je dobiti veliku količinu energije. Kukuruzni oklasak, koji nastaje kao nusproizvod prilikom skidanja zrna kukuruza u žetvi, uobičajen je u našim krajevima kao ogrevno sredstvo. Energetska vrednost oklaska je visoka i u zavisnosti od istraživača iznosi 14,7 MJ/kg (Nakomčić-Smaragdakis i sar, 2015), odnosno oko 16,6 MJ/kg (Brkić i sar, 1979). Zbog toga, može da se koristi za dobijanje toplotne energije potpunim ili nepotpunim sagorevanjem (gasifikacijom). Osim u domaćinstvu, oklasak se može koristiti i za sušenje poljoprivrednih proizvoda. Međutim, veliki problem predstavlja skladištenje i čuvanje, često vlažne balirane kukurozovine, do momenta njene upotrebe (Brkić i sar., 1979). Ukoliko bi se oklasci briketirali ili peletirali, postiglo bi se bolje sagorevanje i veća iskorišćenost energije, a istovremeno smanjio prostor za skladištenje. Oklasak čini oko 1/5 ukupne količine biomase kukuruzovine i prosečan prinos samog oklaska je 1,033 t/ha, što predstavlja veliki izvor potencijalne energije (Brkić i sar, 2007). Zajedno sa stabljikom ukupan prinos biomase kukuruzovine iznosi 54,8 %, od ukupne količine biomase koja se može dobiti iz ratarskih kultura.

7.5. Sojine stabljike

Soja (*Glycine max*) je ratarska biljna vrsta, čija je osnovna namena za ishranu ljudi i domaćih životinja, kao i za preradu u industriji. Ona u sebi sadrži preko 40% proteina, preko 20% ulja i preko 30% ugljenih hidrata.

U skladu sa svetskim i evropskim trendom, posebno direktivom EU/2009/28/EC, soja se smatra važnim resursom obnovljive energije. Predviđeni potencijal sojine slame samo za Vojvodinu iznosi 280 000 Mg godišnje (Martinov i sar., 2015). Sojina slama predstavlja stabljiku biljke koja može da naraste od 0,2-2 m u zavisnosti od zemšljista i klime. Ukupan udeo sojine slame u količini biomase koja se može dobiti od biljke soje je oko 25% (Đurić i sar., 2015)

Sojina slama, sa 14% vlage, ima toplotnu vrednost 15-16 MJ/kg (Kiš i sar., 2010), što prevazilazi vrednosti biljnih ostataka drugih useva. Veća toplotna vrednost objašnjava se određenom količinom ulja, koje je sadržano u izgubljenim zrnima, koja su ostala na polju sa slamom nakon ubiranja žitnim kombajnom. Korišćenje sojine slame kao energenta već se praktikuje u Vojvodini i regionu Panonske nizije (Kiš i sar., 2010).

Prosečan žetveni indeks za 2011. godinu iznosio je 0,47 (Veselinov i sar., 2012), što je tipično za visok prinos zrna, ali i za visok prinos žetvenih ostataka, koji je iznosio 5,3 Mg/ha suve materije. U sezoni 2012., prosečan žetveni indeks je smanjen na vrednost 0,41, kao posledica smanjenja prinosa zrna, ali i smanjenja prinosa žetvenih ostataka. Procentualni odnos delova žetvenih ostataka biljke: stabljike, granje/lišće, mahune, u 2011. godini iznosio je 48:19:33%, a u 2012. 39:29:31%, što ukazuje na značajno smanjenje količine slame. Pri berbi soje primenjuje se mala visina reza kosionog aparata da bi se smanjili gubici, pa su ovde razmotrene visine 7,5 i 10 cm (Veselinov i sar., 2012).



Slika 23. Ostaci soje u sirovom i osušenom stanju (www.researchgate.net)

Žetveni ostaci soje imaju višestruku upotrebu (Zubac, 2012). Sojine stabljike se koriste kao materijal za proizvodnju briketa i peleta za ogrev, zatim iz sojine slame se može proizvoditi briketirana i peletirana stočna hrana za zimsku ishranu divljači, što je neophodan uslov za organizovano održavanje fonda divljači koje žive na našim poljima (srne, jeleni, zečevi i sl.), može se koristiti i kao materijal od kog se proizvode peleti za đubrivo i obogaćivanje zemljišta.

7.6. Piljevina drveta bukve

Drvena biomasa predstavlja značajan, ali nedovoljno iskorišćen izvor energije. Razlog je problem sakupljanja drvene biomase (koju najvećim delom čine ostaci drvene proizvodnje i ostaci iz voćarske proizvodnje), koja iziskuje troškove, a time dodatno utiče na ekonomsku opravdanost dobijanja energije.

U drvnoj industriji šumska biomasa se dobija nakon seče šuma, koja se obavlja radi nege šuma (selekcije i vađenje stabala lošijeg kvaliteta) sa jedne strane, i radi obnavljanja šume sa druge strane (prebirna seča). U svakoj fazi prerade drveta, od biljke u šumi do finalnog proizvoda, postoje ostaci pogodni za biomasu. Nakon seče nastaju šumski ostaci, nakon primarne prerade dobijaju se okrajci i piljevina, a nakon finalne obrade ostaju piljevina i prašina a istrošeni proizvodi predstavljaju komadne otpatke.

Statistički podaci za 2017. godinu pokazuju da je oko 2,2 miliona hektara u Republici Srbiji pod šumom. Od te količine, 87,7 % čine listopadne šume, a ostatak, 12,3 % četinarske. Najzastupljenije listopadno drvo je bukva (Banković i sar., 2009).

Godišnje se na teritoriji Republike Srbije poseče 1,009 m³ drveta bukve, što predstavlja 40% ukupne količine posečenih šuma i predstavlja najveći izvor energije iz drvnog materijala (Orfao et al., 1999; Grieco and Baldi, 2011). Bukva (*Fagus sylvatica* L.) pripada porodici *Fagaceae*. Rasprostranjena je u Centralnoj i Južnoj Evropi. Stablo je visoko 20-40 m, krošnja je, najčešće okrugla, pravilno formirana. Kora je glatka, tanka, najčešće sive boje (Gajić i sar., 1992).

Piljevina drveta bukve nastaje prilikom rezanja/struganja drveta bukve na pilanama i kod nas se sve više koristi za proizvodnju iverice i u kombinaciji sa drugim sirovinama u proizvodnji energetskih briketa.

Izraz "piljevina" obuhvata širok spektar komada drveta. Prečnik komada drveta (namenjenog biomasi) može biti i do 500 mm (*keepwarmeurope.eu*). Priprema tih komada obuhvata lomljenje, sečenje i sprašivanje.

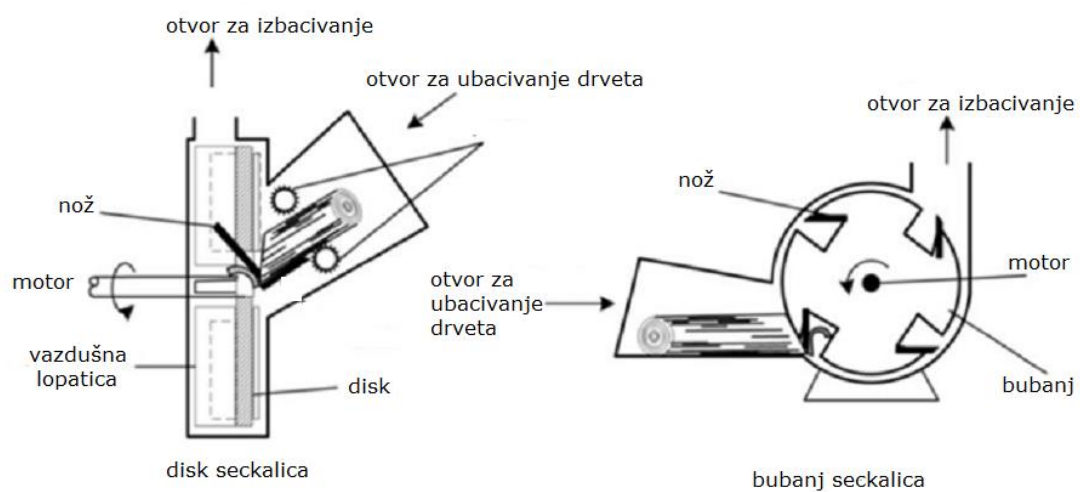
Da bi drvena biomasa bila ekološki opravdana, potreban je složen sistem koji obuhvata transport, mehanizaciju, manipulaciju, obradu i isporuku biomase, što je potrebno optimizovati. Osobine koje utiču na kvalitet rezultujućeg energenta su toplotna vrednost, količina kore, granulacija, sadržaj vlage, vrsta drveta i poreklo biomase.

Na Slici 24 prikazane su dve vrste seckalica za drvo koje se za tu svrhu obično koriste; levo je seckalica u obliku diska u koju se komadi ubacuju bočno pod uglom, a desno je seckalica u obliku bubnja u koju se komadi ubacuju horizontalno.

Na Slici 25 prikazana je mobilna seckalica u obliku bubnja.

Kada se radi o drvenoj biomasi koja je nastala od isluženih proizvoda (što može biti površinski tretirano drvo, impregnirano drvo, drvo koje sadrži i veziva, metalne ili plastične materijale), kao i običnoj otpadnoj drvnoj masi (kao što je npr. kora), onda je proces pripreme drvene biomase složeniji.

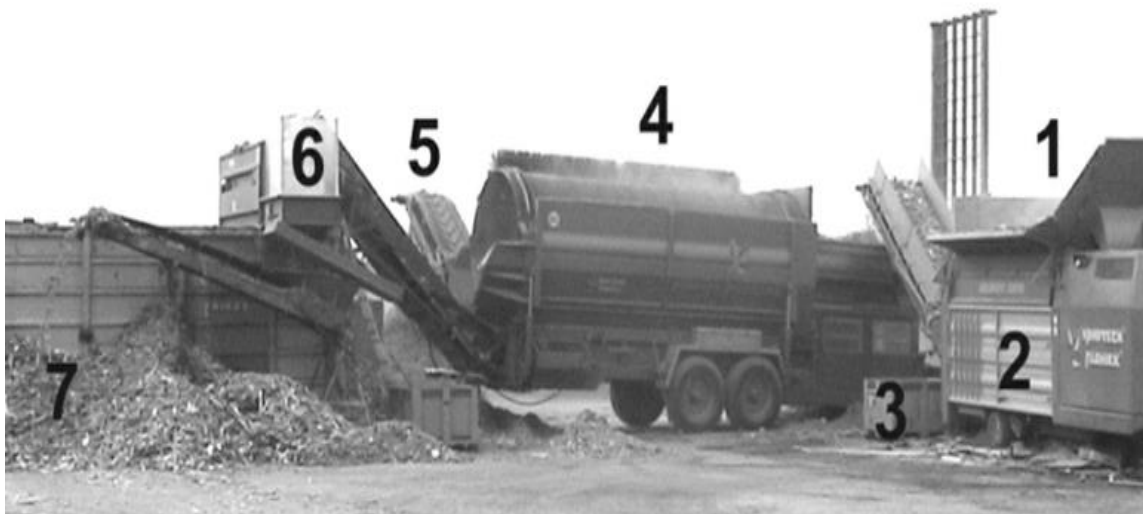
Proces dobijanja drvene biomase od otpadnog drveta prikazan je na Slici 26. Proces obuhvata ulaz otpadnog drveta, drobilicu, izdvajač gvožđa (magnetnih metala), sito od 4 mm, izdvajanje sitnih komada, i izdvajač nemagnetnih metala.



Slika 24. Seckalice za drvo. Levo: seckalica u obliku diska, desno: seckalica u obliku bubnja (*keepwarmeurope.eu*).



Slika 25. Mobilna seckalica u obliku bubnja (*keepwarmeurope.eu*).



Slika 26. Priprema otpadnog drveta: 1. ulaz, 2. drobilica, 3. izdvajač gvožđa (magnetnih metala), 4. sito od 4mm, 5. izdvajanje sitnih komada, 6. izdvajač nemagnetnih metala, 7. pripremljena drvena biomasa.

EKSPERIMENTALNI DEO

8. MATERIJALI I METODE RADA

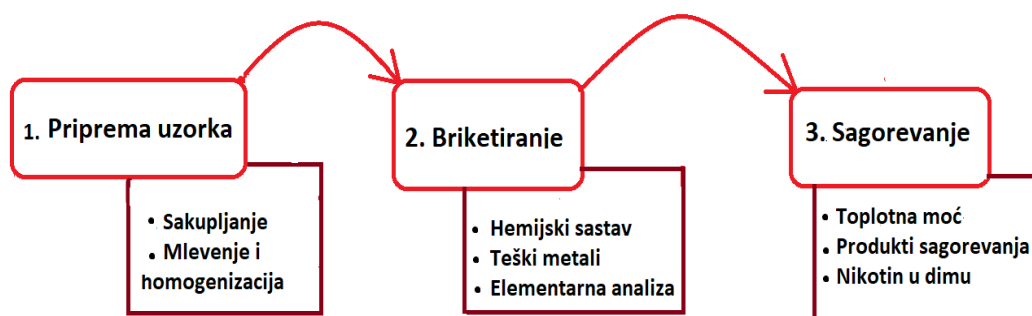
Eksperiment je pitanje koje nauka postavlja prirodi,

a merenje je snimanje odgovora prirode.

Max Planck

Metode ispitivanja biomase kao alternativnog, obnovljivog izvora energije obuhvataju ispitivanje samih izvora biomase i karakterizaciju dobijenih briketa. Pošto direktno sagorevanje biomase nije ekonomično zbog postojanja vlage i zbog male gustine energije, sušenjem, zapravo torefikovanjem, termičko-hemijskim tretmanom biomase pri odsustvu kiseonika na temperaturama od 250-300 °C biomasa se konvertuje u masu veće gustine u obliku briketa, i time kvalitet biomase kao izvora energije postaje veći. Koliki je zaista kvalitet biomase saznajemo na osnovu kvantitativnog poređenja sa rezultatima koji bi se odnosili na ekvivalentne količine uglja. Očekivani rezultati su da toplotna moć briketa dobijenih od biomase bude manja od toplotne moći ekvivalentne količine uglja, sa jedne strane, međutim očekivano je i da produkti sagorevanja biomase budu povoljniji po životnu sredinu, sa manje oksida ugljenika, azota i sumpora. Nakon merenja se taj odnos može kvantifikovati i ti rezultati su od pomoći prilikom ekonomskih proračuna i tehničkog projektovanja pogona za proizvodnju energije u potpunosti korišćenjem biomase ili hibridnih pogona u kojima se biomasa kombinuje sa fosilnim gorivima.

Dijagram toka postupka, tokom proizvodnje i ispitivanja briketa od različitih vrsta biomase, koji je sproveden tokom istraživanja koje je bilo cilj ovog rada, grafički je prikazan na Slici 27.



Slika 27. Dijagram toka proizvodnje, pripreme i ispitivanja analiziranih briketa.

8.1. Materijal

Za potrebe ove disertacije, kao materijal korišćeni su žetveni ostaci pet različitih ratarskih biljnih vrsta:

1. stabljike duvana tipa Berlej (proizvodno područje Šabac, preuzeta od kompanije Alliance One Tobacco-Šabac),

2. pšenična slama (proizvodno područje Stara Pazova, preuzeta od individualnih poljoprivrednih proizvođača),

3. oklasak kukuruza (proizvodno područje Stara Pazova, preuzeta od individualnih poljoprivrednih proizvođača),

4. sojine stabljike (proizvodno područje Stara Pazova, preuzeta od individualnih poljoprivrednih proizvođača),

5. glave suncokreta (proizvodno područje Stara Pazova, preuzeta od individualnih poljoprivrednih proizvođača) iz kojih smo ručno odstranili semenke,

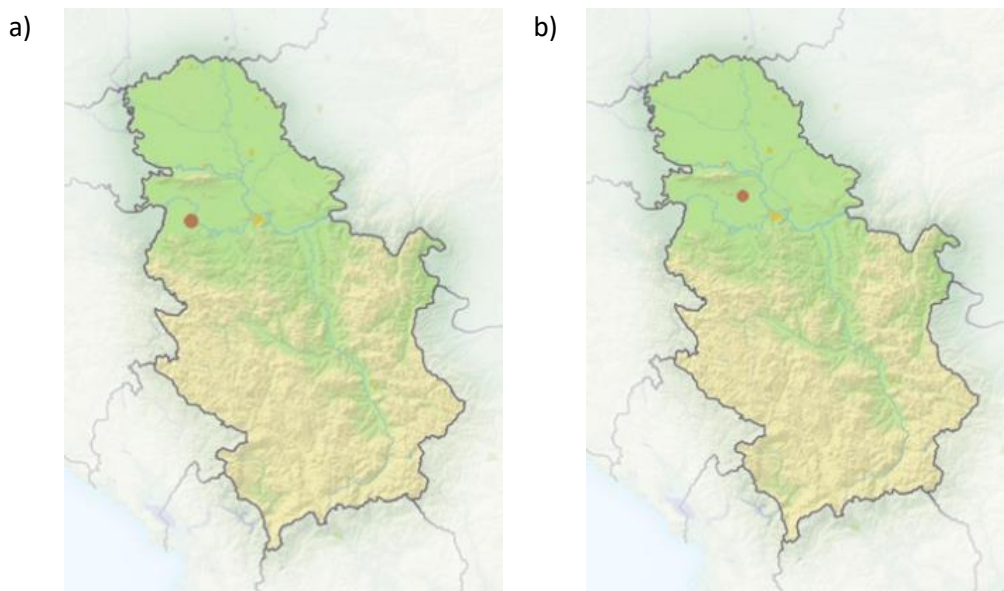
kao i

- piljevina od drveta bukve, kao ostatak tokom prerade drveta, preuzeta od preduzeća Saga drvo d.o.o iz Stare Pazove, nepoznatog porekla.

Sve sirovine sakupljene su 2015. godine, kada je počelo istraživanje.

Sakupljeni materijal je pripremljen i kombinovane su njihove mešavine i to:

1. mešavina materijala od stabljika duvana i pšenične slame u odnosu 50:50,
2. mešavina materijala od stabljika duvana i oklaska kukuruza u odnosu 50:50,
3. mešavina materijala od stabljika duvana i sojinih stabljika u odnosu 50:50,
4. mešavina materijala od stabljika duvana i glava suncokreta u odnosu 50:50,
5. mešavina materijala od stabljika duvana i piljevine drveta bukve u odnosu 50:50.



Slika 28. Lokaliteti sa kojih su uzimani materijali za uzorke tokom istraživanja: a) Šabac, b) Stara Pazova.

8.2. Metode

Metode korišćene tokom ovih istraživanja su obuhvatale:

1. Pripremu uzoraka,
2. Određivanje sadržaja vlage pre briketiranja,
3. Briketiranje,
4. Određivanje sadržaja vlage u briketima,
5. Određivanje sadržaja pepela u briketima,
6. Određivanje sadržaja celuloze u briketima,
7. Određivanje sadržaja lignina u briketima,
8. Određivanje sadržaja nikotina u briketima,
9. Određivanje sadržaja mineralnih materija u pepelu (Pb, Cd, Cu, Fe, Mn, Zn Mg, Hg, As, N, Ca i P),
10. Elementarna analiza briketa
11. Određivanje toplotne moći briketa
 - 1) Predviđanjem, računski
 - 2) Eksperimentalno

12. Određivanje produkata sagorevanja

- 1) Predviđanjem, računski
- 2) Eksperimentalno (SO, SO₂, CO, CO₂, NO_x)
- 3) Nikotin
- 4) PAH jedinjenja

13. Statistička obrada podataka

Istraživanja su rađena u Laboratoriji Katedre za tehnologiju ratarskih proizvoda, Poljoprivrednog fakulteta, Univerziteta u Beogradu; Laboratoriji Centra za hemiju Instituta za hemiju, tehnologiju i metalurgiju i Hemijskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu; Laboratoriji Instituta za zemljište, Beograd; Laboratoriji Naučnog Instituta za veterinarstvo Srbije, Odeljenje za hemiju i biohemiju i ispitivanje lekova, Beograd; kompanijama „PIONIR“ u Vojki i „TERMOMONT“ u Šimanovcima.

8.2.1. Priprema uzoraka

Jedna od najvažnijih faza analize, od koje u velikoj meri, zavisi tačnost i reprezentativnost rezultata, predstavlja uzorkovanje i priprema uzoraka. Uzorci biomase, koji su korišćeni u istraživanju (izuzev stabljika duvana i piljevine drveta bukve), sakupljeni su na njivi, neposredno nakon žetve. Radi dobijanja što tačnijih podataka, vodilo se računa da se uzorci sakupe sa različitih delova parcela. Ukupno je sakupljeno 120 kg uzoraka, odnosno po 20 kg svakog od uzoraka.

Stabljike duvana dobijene su od preduzeća (Alliance One Tobacco) za obradu duvana. U trenutku preuzimanja, stabljike duvana, bile su suve. S obzirom da je u pitanju duvan tipa Berlej, koji se suši na vazduhu, u hladu, stabljike su pokošene i sušene istovremeno, sa listovima. Ovo je bio jedan od ključnih razloga zašto je za ispitivanje izabran baš duvan tipa Berlej, jer je sa ovakvim načinom branja i sušenja, olakšan transport, skladištenje, a ostvarena je i ušteda u energentima. Nakon sušenja listovi duvana korišćeni su za proizvodnju cigareta.

Piljevina od bukve je, takođe, dobijena u suvom stanju. Ovaj uzorak je izabran kao jedan od najduže korišćenih energenata u Srbiji.

Svi ostali uzorci sakupljeni su na njivi i upakovani su u polietilensku ambalažu, tj džakove. Svaki džak je obeležen, upisani su tip i masa uzorka, a nakon toga su dopremljeni u laboratoriju Poljoprivrednog Fakulteta u Zemunu. Polietilenski džakovi su korišćeni jer su pogodni za transport, kako ne bi došlo do rasipanja i mešanja uzoraka, ili njihove kontaminacije. U laboratoriji, uzorci su izvađeni iz džakova, stavljeni na suvo mesto, gde su se sušili na vazduhu. Povremeno su uzorci mešani, radi poboljšanja sušenja. Uzorci su se, pod ovakvim uslovima, sušili 30 dana.

Nakon sušenja na vazduhu, uzorci su samleveni na potrebnu veličinu čestica, a zatim homogenizovani. Izuzetak su predstavljale glave suncokreta, jer je njih, zbog veličine, bilo potrebno izlomiti ručno, pa tek onda primeniti usitnjavanje u mlinu. S obzirom da je u pitanju biljni materijal, mlevenje uzoraka urađeno je u mlinu, koji je sastavni deo mašine za briketiranje (model Macinatore MAC 500, CO.MA.FER, Collebeato, Italy), koji radi na principu intenzivnog udaranja i razbijanja

grubo usitnjene biomase. Veličina čestica nakon mlevenja, odgovarala je krupnoći uzorka piljevine, zbog toga se ovaj uzorak nije dodatno usitnjavao.

Nakon mlevenja, svaki uzorak je stavljen u papirni džak, obeležen i zatvoren. Uzorci su, do korišćenja, čuvani na mestu zaštićenom od spoljašnjeg uticaja.

8.2.2. Sadržaj vlage

Određivanje sadržaja vlage u uzorcima biomase obavljeno je prema standardu SRPS ISO E.P1.010:1986, koje se zasniva na gravimetrijskom određivanju, tako što se 3 g uzorka suši 3 sata u sušnici (Digitheat 80 L, JP Selecta, Abrera, Spain) na 105 °C, hladi u eksikatoru 1 sat, nakon čega se ponovo meri. Vrednost vlage dobija se iz razlike mase vlažnog i apsolutno suvog uzorka i izražava se u procentima.

8.2.3. Briketiranje

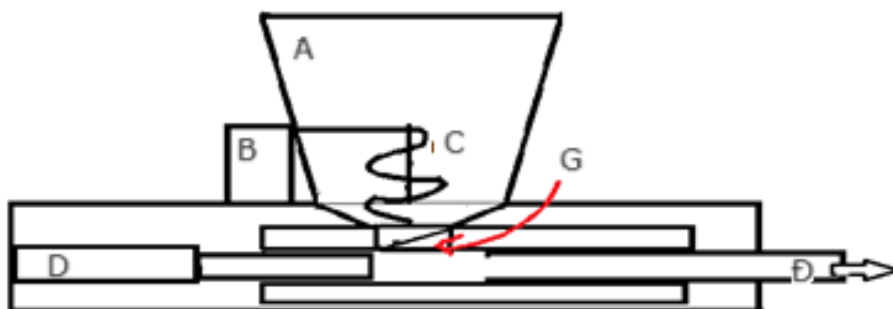
Od pripremljenih uzoraka napravljeno je 5 različitih energetskih briketa i to od mešavina duvanske stabljike sa uzorcima pšenične slame, ostataka glava suncokreta, oklaska kukuruza, piljevine drveta bukve i sojinih stabljika, u odnosu 50:50.

Briketi predstavljaju kompaktnu formu biomase čija je zapreminska masa veća od zapremine mase materijala od koje je briket napravljen. Postupak briketiranja sastoji se u sabijanju lignoceluloznog materijala u što manju zapreminu uz pomoć presa. Za izradu svakog uzorka, pomešano je 10 kg duvanskih stabljika i 10 kg drugog izabranog uzorka, prethodno pripremljenih na opisan način. Materijal ubačen u briketirku, (Macinatore, MAC 500, Slika 29), koja radi na pritisku od 1000 kPa i izlaznom snagom od 50-150 kg/h, na izlasku iz briketirke imao je kompaktnu formu u obliku cilindričnog valjka. Prečnik dobijenih briketa bio je 6 cm, dok je dužina varirala između 6 i 10 cm. Međutim, zbog što bolje reprezentativnosti rezultata, za sagorevanje su korišćeni samo briketi dužine 8 cm. U zavisnosti od prirode uzoraka, boja dobijenih briketa varirala je od svetlo žute do tamno braon. Važno je napomenuti da su briketi dobijeni samo od uzoraka biomase, tj nije dodavan nijedan vezivni materijal. Napravljeni briketi čuvani su u impregniranim papirnim džakovima, u izolovanoj prostoriji, 40 dana, pre nego što su im određene toplotna moć i produkti sagorevanja. Razlog za to je istraživanje koje su uradili Obernberger and Thek (2010), i utvrdili da skladištenje u trajanju 4-6 nedelja obezbeđuje peletu kvalitet koji se može postići biološkim dodacima.



Slika 29. Briketirka koja je korišćena za pravljenje briketa.

Principska blok šema na kojoj se vide postupci tokom briketiranja u briketirci koja je korišćena tokom eksperimentalnog dela istraživanja prikazana je na Slici 30. Materijal se ubacuje u hranilicu, konusnog oblika (A). Motor na vrhu hranilice (B), pokreće konusnog puža (V), meša materijal i gura ga na izlazu (G). Kada iz hranilice izađe materijal, aktivira se klip (D), koji radi na pritisku od 10 bara i pri naponu od 380V. Klip sabija i presuje materijal i gura ga ka kraju cevi (E).



Slika 30. Principska blok šema briketirke.

Na dobijenim briketima urađena je fizička i hemijska analiza. U skladu sa standardnim metodama za ispitivanje pojedinih parametara, u uzorcima briketa određeni su sadržaj: vlage, pepela, celuloze i lignina.

Rezultati ispitivanja su iskazani kao rezultat na suv uzorak i prikazani su u poglavlju 9.1. Radi tačnosti rezultata, sve analize obavljene su u tri ponavljanja.

8.2.4. Sadržaj pepela u briketima

Sadržaj pepela određivan je prema standardu SRPS EN 14775:2011. Količina pepela u uzorku određuje se žarenjem uzorka na 810 °C (najčešće mase 1g) u peći za žarenje. Uzorci su kontrolisano spaljivani na Bunzenovom plameniku, nakon čega su žareni do konstantne mase. Sadržaj pepela preračunava se na suhu materiju, a rezultati su prikazani u poglavlju 9.1.1.

8.2.5. Sadržaj celuloze u briketima

Sadržaj celuloze određen je standardnom metodom, SRPS ISO 6541:1997. Metoda se zasniva na hidrolizi uzoraka biomase u kiseljoj sredini. Uzorak se razara smešom azotne i sirćetne kiseline kuvanjem uz povratni hladnjak. Rastvor se zatim filtrira preko staklenog filtra, a talog suši u sušnici, tokom 60 minuta na 130 °C. Talog se, zatim, žari u peći za žarenje na 550 °C u trajanju od 30 minuta, a nakon toga se hladi i meri. Izmerena masa celuloze preračunava se na suhu materiju. Dobijeni rezultati prikazani su u poglavlju 9.1.1.

8.2.6. Sadržaj lignina u briketima

Sadržaj lignina određen je standardnom metodom, ISO 21436:2020, koja podrazumeva razaranje uzorka smešom sumporne i hlorovodonične kiseline, mešanjem na sobnoj temperaturi. Rastvor se zatim zagreva, filtrira preko staklenog filtra, suši u sušnici (60 minuta na 105 °C), žari (60 minuta na 450 °C) i meri. Rezultati su prikazani u poglavlju 9.1.1.

8.2.7. Sadržaj nikotina u briketima

S obzirom na korišćenje duvanskih stabljika u svim vrstima briketa, problem je mogao da predstavlja sadržaj nikotina, jer se, prema propisima Evropske Unije (Novotny and Zhao,1999), duvanski otpad sa sadržajem nikotina preko 500 ppm deklariše u kategoriju opasnog otpada. Zbog toga, urađeno je i ispitivanje sadržaja nikotina kako u briketima, tako i u produktima njihovog sagorevanja High Performance Liquid Chromatography metodom, (HPLC, Waters Breeze, Binari Pump systems, Milford, Massachusetts, USA).

Uzorci su samleveni u mlinu na veličinu 2 mm i sušeni do konstantne mase na 60 °C. Izvršena je vodena ekstrakcija mlevenog uzorka uz dodatak natrijum fosfatnog pufera (pH 7,8) na 30 °C tokom 24 h uz stalno mešanje. Vodeni ekstrakt je filtriran, razblažen deset puta sa vodom i prebačen u vijalu da bi se omogućilo automatsko ubrizgavanje alikvota od 20- μ L. U cilju odvajanja alkaloida, korišćena je C₁₈ reverzna faza kolone, sa mobilnom fazom od 40 % metanola, koja sadrži 0,2 % fosforne kiseline puferovane na pH 7,25 sa trietilaminom, pri brzini protoka od 0,5 mL/min.

Nikotin je identifikovan na UV talasnim dužinama između 210 i 400 nm i kvantifikovan na 254 nm (Mandić et al., 2023). Rezultati su prikazani u poglavlju 9.3.3.

8.2.8. Sadržaj mineralnih materija u pepelu nakon sagorevanja briketa

Od pepela svakog uzorka biomase odmereno je oko 1 g uzorka na analitičkoj vagi. Svaki uzorak je tretiran sa 20 ml HNO₃, a reakcija razaranja trajala je oko 18-20 sati na sobnoj temperaturi. Nakon tog perioda, reakciona smeša je lagano zagrevana do pojave smeđih para. Po prestanku izdvajanja smeđih para reakciona smeša je ohlađena. Ohlađena smeša je tretirana sa 3 ml koncentrovanog H₂O₂ i ponovo zagrevana do izdvajanja smeđih para. Reakciona smeša je ohlađena (biomasa potpuno razorena) i kvantitativno prenesena u normalni sud od 50 ml. Za filtriranje je korišten filter papir srednje gustine i srednje brzine ceđenja. Pripremljeni rastvori se analiziraju na ICP- OES-u (iCAP 6300 ICP-OES Spectrometer, Thermo Scientific, USA) u skladu sa propisanim standardima. Dobijeni rezultati su prikazani u poglavlju 9.4.

8.2.9. Elementarna analiza briketa

Homogenizovani uzorci biomasa sa analitičkom vlagom ispitivani su na aparatu Elemental analyser Vario Vario EL III, (GmbH, Germany), prema standardnim metodama za ugljenik, vodonik, azot (EN 15104:2011), sumpor (EN 15289:2011). Sadržaj kiseonika dobijen je prema formuli (Demirel, 2012):

$$O (\%) = 100 - C (\%) - H (\%) - N (\%) - S (\%) - Ash (\%) \quad (8.1)$$

Rezultati su prikazani u poglavlju 9.1.2.

8.2.10. Određivanje toplotne moći

8.2.10.1. Predviđanje HHV (Higher heating value)

Pre eksperimentalnog određivanja u kalorimetru, na osnovu hemijskog sastava uzoraka, izračunata je toplotna moć (HHV).

S obzirom da je eksperimentalno određivanje vrlo skupo i zahteva specifičnu opremu, uobičajno je da se, pre nego što se pristupi eksperimentu, radi predviđanje, tj izračunavanje očekivane toplotne moći u odnosu na elementarni sastav. Ukoliko je dobijena vrednost zadovoljavajuća, tj pokaže da se ispitivani uzorci mogu koristiti kao biogorivo, dalje se pristupa eksperimentalnom određivanju.

U proračunu su korišćene sledeće formule preuzete iz literature, koje su prikazane u Tabeli 9. (Demirbas, 2001; Sheng and Azevedo, 2005; Brkić i sar., 2007). Dobijeni rezultati prikazani su u poglavlju 9.2.1.

Tabela 9. Računsko predviđanje toplotne moći

Matematički izraz	Referenca
$HHV = 0,0889 (L) + 16,8218$	(Demirbas, 2001)
$HHV = 340C + 1420,5 (H - O/10)$	(Brkić i sar., 2007)
$HHV = 19,914 - 0,2324 Ash$	(Sheng i Azevedo, 2005)
$HHV = -1,3675 + 0,3137 C + 0,7009 H + 0,0318O$	(Sheng i Azevedo, 2005)

Gde su: L- sadržaj lignina, C-sadržaj ugljenika, H- sadržaj vodonika, O-sadržaj kiseonika

8.2.10.2. Eksperimentalno određivanje toplotne moći

Toplotna moć goriva određuje se spaljivanjem uzoraka u kalorimetrijskoj bombi, pri čemu se produkti sagorevanja hlade na temperaturu okoline, a vodena para iz produkata sagorevanja se kondenzuje, pri čemu predaje toplotu faze (tzv. „latentnu toplotu”) okolini. Spaljivanje uzoraka obavljeno je na kalorimetru IKA C400 Adiabatisch (EN 14918:2011).

Gornja toplotna moć izračunata je na osnovu razlike u količini oslobođene toplote i toplote oslobođene tokom stvaranja sumporne i azotne kiseline tokom sagorevanja u kalorimetrijskoj bombi. Donja toplotna moć izračunata je na osnovu količine raspoloživih vodonika i vlage. Ona predstavlja realan parametar za procenu toplotne vrednosti biomase. Dobijeni rezultati prikazani su u poglavlju 9.2.2.

8.2.11. Određivanje produkata sagorevanja

8.2.11.1 Predviđanje zapremine produkata sagorevanja

Proračun zapremine produkata sagorevanja izvršen je na osnovu elementarnog sastava ispitivanih uzoraka, korišćenjem stehiometrijskih jednačina sagorevanja ugljenika, sumpora, vodonika i azota, koje se nalaze u poglavlju 5.3.2, a dobijeni rezultati prikazani su u poglavlju 9.3.1.

8.2.11.2. Eksperimentalno određivanje produkata sagorevanja

Produkti sagorevanja određeni su sagorevanjem briketa i korišćenjem analizatora dimnih gasova MRU (VARIO plus industrial, MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH, Wiener Neustadt, Austria). Karakteristike mernog opsega korišćenog analizatora MRU prikazane su u Tabeli 10.

Tabela 10. Karakteristike MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH, Austria

Komponenta	Merni opseg	Tačnost, % mernog opsega
CO	0-10000 ppm	±5
NO	0-300 ppm	±5
NO ₂	0-500 ppm	±5
SO ₂	0-5000 ppm	±5
O ₂	0-25 % Vol	±0,8
Temperatura	-40 °C-1200 °C	±0,5
Brzina	0-40 m/s	±0,4

Sagorevanje svih uzoraka obavljeno je pod identičnim uslovima, u istoj peći toplotne snage 65 KW, koja je predviđena za sagorevanje biomase. Sagorevanje svakog uzorka trajalo je 10 minuta, tokom kojih je izvršeno 3 merenja u istim vremenskim intervalima, u prvom, petom i u devetom minutu. Temperatura sagorevanja bila je 1000 °C. Komora je imala fiksnu mrežu, a uzorci biomase su ubacivani ručno. Peć je detaljno čišćena posle sagorevanja jedne vrste briketa, kako bi se izbegla kontaminacija narednog uzorka. Na izlazu iz dimnjaka, na mestu gde počinje izduvna cev, nalazila se merna sonda. Rezultati analize očitani su na ekranu MRU uređaja. Analiza je urađena u skladu sa Pravilnikom o graničnim vrednostima emisije, načinu i rokovima merenja i evidentiranja podataka (Sl. glasnik RS, br. 30/97, 35/97), a po metodi UP.53.540.01 (po standardnu SRPS M. E2.203:1980), kojom su definisani uslovi ispitivanja produkata sagorevanja. Sve analize obavljene su u tri ponavljanja, a rezultati su prikazani kao srednja vrednost sa standardnom devijacijom (poglavlje 9.3.2.). Izgled peći gde je vršeno sagorevanje sa priključenim MRU uređajem prikazana je na Slici 31.



Slika 31. Peć sa MRU uređajem

Izračunavanje emisijskog faktora CO₂

Emisijski faktor (Directive 2018/2066) CO₂ je prosečna količina emisije ovog oksida kao jednog od gasova staklene bašte u odnosu na podatke o izvoru emisije, pod pretpostavkom da se sav ugljenik iz biomase potpuno oksiduje (sagoreva) i prevede u CO₂. Izračunava se na osnovu podataka o količini ugljenika u gorivu kod donje toplotne vrednosti goriva, prema jednačini:

$$EF = \frac{m(C)}{100} \times \frac{3,664}{LHW} \times 1000 \quad (\text{tCO}_2/\text{TJ}), \quad (8.2.)$$

gde je:

m (C) - maseni sadržaj ugljenika u gorivu sa ukupnom vlagom izražen u %;

LHW – donja toplotna vrednost goriva sa ukupnom vlagom izražena u MJ/kg

3,664 - stehiometrijski koeficijent.

8.2.12. Određivanje sadržaja nikotina u produktima sagorevanja

Da bi ispitali da li je sagorevanje briketa ekološki opravdano (po zakonima EU, količina nikotina treba da bude <500 ppm), merena je količina nikotina u produktima sagorevanja. Tokom sagorevanja 1 kg briketa svakog od uzoraka, na vrhu dimnog kanala peći za sagorevanje biomase postavljen je 92mm-ski disk (Cambridge filter) za prikupljanje dimnih gasova. Na kraju sagorevanja svakog uzorka, filter je laboratorijskom pincetom prenešen sa dimnog kanala peći i stavljen u nosač filtera, kako bi se zaštitio od spoljašnjeg uticaja. Izvršena je ekstrakcija nikotina i određivanje HPLC metodom, kao što objašnjeno u poglavlju 8.2.7., a dobijeni rezultati prikazani su u poglavlju 9.3.3.

8.2.13. Određivanje policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) u dimu

Određivanje policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) u dimu je rađeno za sagorevanje kombinacija ispitivanih biomasa, ali i za pojedinačne primenjene biomase da bi rezultati mogli da se međusobno porede. Sagorevanje svih uzoraka obavljeno je pod identičnim uslovima u istoj peći. PAH jedinjenja iz dima nastala sagorevanjem briketa pojedinačnih biomasa, kao i briketa kombinacija biomasa su uzorkovana na celuloznim filtrima, koji su potom ekstrahovani primenom Sokslet ekstrakcije u vremenu od 32 časa, korišćenjem dihlormetana kao rastvarača. Tako dobijeni ekstrakti su potom prečišćeni hromatografijom na koloni. Za identifikaciju i kvantifikaciju PAH jedinjenja korišćen je gasni hromatograf Agilent GC System 7890 A sa kapilarnom kolonom HP-5 MS, dimenzija 30 m x 0,25 mm x 0,25 μm. Noseći gas je bio helijum, sa protokom 1,5 ml/min. Gasni hromatograf kuplovan je sa kvadropolnim masenim sprektroskopom Agilent Inert MSD 5975 C (70 eV), koji je imao ulogu detektora.

Tokom snimanja uzoraka, uslovi su podešeni tako da je kolona na početnoj temperature od 60 °C održavana 5 minuta, a potom je zagrevana do 300 °C brzinom 8 °C/min. Temperatura od 300 °C je održavana još 10 min. Ubrizgivan je 1 μl pripremljenog prečišćenog ekstrakta.

Za identifikaciju 16 prioriternih PAH jedinjenja u analiziranim uzorcima korišćeni su sledeći joni: naftalen (*m/z* 128), metilnaftaleni (*m/z* 142), acenaftilen (*m/z* 152), dimetilnaftaleni (*m/z* 156), trimetilnaftaleni (*m/z* 170), tetrametilnaftaleni (*m/z* 184), fenantren i antracen (*m/z* 178),

metilfenantreni (m/z 192), fluoranten i piren (m/z 202), fluoren (m/z 166), benzo(a)antracen, hrizen (m/z 228), benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten i benzo(a)piren (m/z 252), indeno(1, 2, 3-cd)piren i benzo(ghi)perilen (m/z 276), dibenzo(ah)antracen (m/z 278).

U cilju kvantifikacije 16 prioriternih PAH jedinjenja korišćeni su standardni kalibracioni rastvori, napravljeni od sertifikovanog rastvora PAH mix, AccuStandard, USA, Z-014G-R koncentracije 1000 ppm.

8.2.14. Statistička obrada podataka

Statistička analiza urađena je u statističkom paketu IBM SPSS Statistic V23.0 (IBM Corp. Released 2015). Nakon urađenih eksperimenata, dobijeni podaci izraženi su kao srednje vrednosti \pm standardna devijacija (SD). Za upoređivanje srednje razlike između uzoraka korišćena je jednosmerna analiza varijanse (ANOVA). Korelacije između uzoraka testirane su Pirsonovim koeficijentom korelacije.

9. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Nije važno koliko vam je teorija lepa, niti koliko ste pametni.

Ako se ne slaže sa eksperimentom, to je pogrešno.

Richard P. Feynman

Imajući u vidu da su briketi od biomase čvrsto gorivo napravljeno kompresijom otpada biomase, kao što su poljoprivredni ostaci, šumski otpad ili industrijski nusproizvodi, njihov kvalitet nije moguće proceniti samo na osnovu jednog parametra. Kvalitet briketa od biomase može se oceniti na osnovu vrednosti više parametara, uključujući toplotnu moć, hemijski sastav, sadržaj i sastav pepela, kao i sadržaj vlage. Svi ovi faktori su važni u određivanju kvaliteta i efikasnosti briketa kao goriva. Iako se kvalitet i efikasnost briketa od biomase kao izvora goriva uobičajeno određuje na osnovu prethodno pomenutih parametara, kod briketa napravljenih od duvanske stabljike postoji još jedan važan parametar, a to je sadržaj nikotina, te je za potrebe ovog istraživanja, odnosno utvrđivanja kvaliteta ispitivanih briketa, određen i sadržaj nikotina.

U ovom poglavlju prikazani su rezultati dobijeni primenom prethodno opisanih metoda, a zatim je izvršena analiza dobijenih rezultata merenja koja se odnose na fizičko-hemijske osobine briketa, elementarni sastav briketa, njihovu toplotnu moć, analizu pepela, produkte sagorevanja i sadržaj pepela, sa tačke gledišta ispunjenja kriterijuma standarda kojima se određuje pogodnost korišćenja ispitivanih briketa od biomase za dobijanje energije.

9.1. Rezultati hemijskog sastava briketa

Kao što je navedeno u poglavlju 8.2.3., briketiranje je obavljeno na briketirci čiji je prečnik 6 cm. Dužina briketa bila je 6-10 cm, što je u saglasnosti sa zahtevima standarda za brikete (ONORM M 1735:1990; DIN 51731:1996). Težina briketa kretala se od 120-350 g. Svi briketi napravljeni su bez dodataka vezivnih sredstava, što je proizvodnju učinilo jeftinijom i ekološki prihvatljivijom. Izgled briketa na izlazu iz briketirke prikazan je na Slici 32, dok su karakteristike napravljenih briketa prikazane u Tabeli 11.



Slika 32. Izgled briketa na izlazu iz briketirke.

Tabela 11. Karakteristike briketa

Parametar Briket	Količina početnog uzorka (kg)	Količina nebriketiranog dela (kg)	Težina briketa (g)	Vlaga (%)	Dužina briketa (cm)
DS-SS	10 + 10	0,6	320	10,24	6-10
DS-PS	10 + 10	1	210	9,66	7-10
DS-GS	10 + 10	0	350	10,85	6-10
DS-KO	10 + 10	2,5	190	9,90	6-10
DS-P	10 + 10	2,5	120	9,44	6-10

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Prilikom pravljenja briketa, deo materijala je zaostao u vidu sitnjevine. Briketi napravljeni od mešavine duvanska stabljika-glave suncokreta bili su kompaktni, nisu se rasipali, tj. celokupan polazni materijal pretvoren je u brikete, bez gubitaka. Najveće količine nebriketiranog dela imale su mešavine duvanska stabljika-kukuruzni oklasak i duvanska stabljika-piljevina, koje su imale i najniži sadržaj vlage.

Sadržaj vlage, je iznosio od 9,44 % (kod uzorka briketa napravljenih od duvanske stabljike-piljevine) do 10,85 % (kod uzorka briketa napravljenih od duvanske stabljike-ostaci glava suncokreta).

Kod svih ispitivanih uzoraka rezultati analize sadržaja vlage su u saglasnosti sa evropskim zakonodavstvom. Po nemačkom standardu za sadržaj vlage DIN 51 731:1996, biomasa treba da sadrži manje od 12 % vlage, dok austrijski standard ONORM M 1735:1990 dozvoljava sadržaj vlage do 18 %, što je u saglasnosti i sa rezultatima istraživanja Peševskog i sar. (2010).

9.1.1. Sadržaj pepela, lignina i celuloze

Mereni parametri od značaja za hemijske osobine briketa su sadržaj vlage, pepela, lignina i celuloze. Oni utiču na efikasnost sagorevanja i mogu da variraju u zavisnosti od korišćenih metoda obrade i pripreme. Pošto se sadržaj pepela odnosi na količinu nezapaljivog materijala ili ostatka koji zaostaje u opremi nakon sagorevanja, on utiče na rukovanje i čišćenje ostataka pepela. Sa druge strane sadržaj vlage je količina vode prisutna u gorivu i može uticati na zapaljivost i stabilnost skladištenja briketa od biomase. Rezultati određivanja sadržaja pepela, lignina i celuloze su prikazani u Tabeli 12, dok je sadržaj vlage prikazan u Tabeli 11, u poglavlju 9.1. Radi lakše uporedivosti rezultata na Slici 33 prikazan je uporedni prikaz sadržaja pepela, lignina i celuloze.

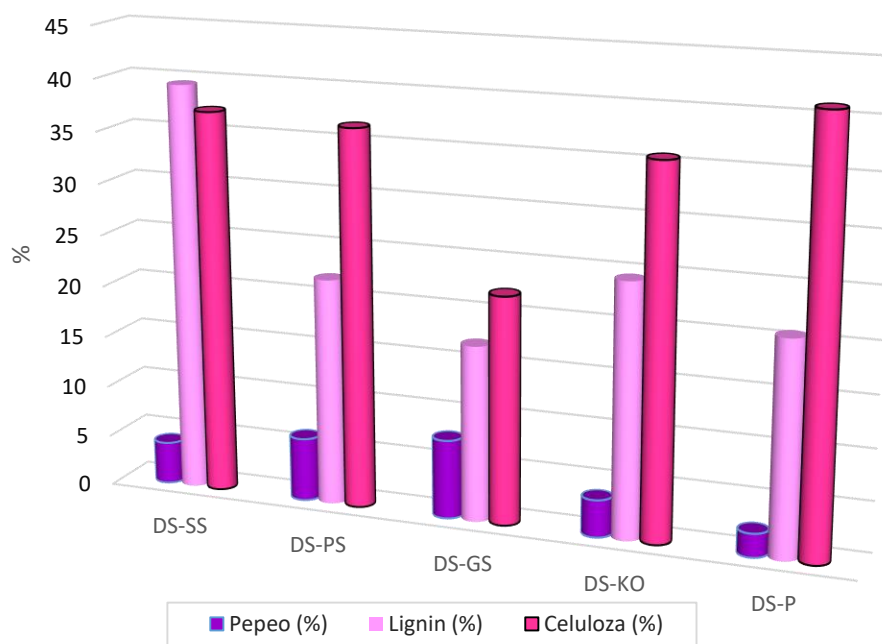
Tabela 12. Hemijski sastav ispitivanih briketa

Briket	Parametar	Pepeo (%)	Lignin (%)	Celuloza (%)
	DS-SS	4,13	39,51	37,14
	DS-PS	6,20	22,04	36,57
	DS-GS	7,73	17,09	32,09
	DS-KO	3,66	24,57	35,66
	DS-P	2,31	20,76	40,97

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Kvalitet briketa od biomase u velikoj meri zavisi od sastava njihove sirove biomase. Stabljike duvana se većim delom sastoje od celuloze, hemiceluloze i lignina, dok je sadržaj vlage u stabljikama duvana uglavnom nizak, pa ga to čini pogodnim za briketiranje. Tokom procesa briketiranja, lignin prisutan u stabljikama duvana deluje kao prirodno vezivo, što rezultira kohezivnijim briketom.

Pošto se tokom sagorevanja energija troši delom na eliminisanje vlage, a pepeo predstavlja problem za održavanje opreme, oni ne doprinose efikasnom korišćenju briketa od biomase kao izvora energije, pa su za njih standardima definisane maksimalno dozvoljene vrednosti. Za razliku od sadržaja vlage i pepela, procenutalne zastupljenosti sadržaja lignina i celuloze poželjno je da su što veće.



Slika 33. Sadržaj pepela, lignina i celuloze u ispitivanim briketima.

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PŠ –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Kao što je napomenuto, količina pepela koja nastaje nakon sagorevanja biomase, izuzetno je bitan parametar za procenjivanje kvaliteta biogoriva. U ispitivanim uzorcima **količina pepela** je u opsegu 2,31-7,73 %. Najniži sadržaj pepela (2,31 %) izmeren je kod mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, dok je najviši sadržaj pepela nađen kod mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, 7,73 (Tabela 12, Slika 33).

Poređenja radi, u istraživanju koje je obuhvatilo brikete napravljene od čistih biomasa, sadržaj pepela kod briketa napravljenih od piljevina bio je najniži (0,54 %), u odnosu na brikete napravljene od oklasaka kukuruza (1,26 %), sojine stabljike (3,15 %), pšenične slame (7,11 %), dok je najviši sadržaj pepela pronađen kod briketa napravljenih od glava suncokreta (12,17 %) (Kulić, 2021). Mešanjem duvanske stabljike sa navedenim čistim biomasama, dobijeni briketi su pratili navedene odnose.

Prema rezultatima dosadašnjih istraživanja (Badger, 1999; Radojičić, 2011, Mijailović et al., 2014, Malnar et al., 2015a) očekivani sadržaj pepela kod biomase je ispod 10 %, što je izmereno i kod svih ispitivanih uzoraka. Takođe, svi ispitivani briketi, osim mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (sa sadržajem pepela od 7,73 %), zadovoljavaju i kriterijume standarda ISO 17225-1:2014, po kome sadržaj pepela u briketima treba da bude ≤ 7 %.

Međutim, nijedan od uzoraka briketa ne ispunjava zahtev nemačkog standarda DIN 51731:1996, po kome sadržaj pepela u briketima treba da bude $\leq 1,5$ %. Prema standardu Austrije ONORM M 1735:1990, zadovoljavajući sadržaj pepela u briketima je ≤ 6 %. Ovaj zahtev ispunjavaju briketi napravljeni mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika, duvanska stabljika-piljevina drveta bukve i duvanska stabljika-oklasak kukuruza. Briketi napravljeni od mešavina duvanska stabljika-pšenična slama i duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta ne zadovoljavaju nijedan od datih kriterijuma u navedenim nacionalnim standardima.

Sadržaj lignina ispitivanih uzoraka bio je u opsegu 17,09–39,51 % (Tabela 12, Slika 33). Najniži sadržaj lignina utvrđen je kod briketa napravljenih od mešavine duvanske stabljike-ostaci glava suncokreta i iznosio je 17,09 %, dok je najviši sadržaj lignina, 39,51 %, utvrđen je kod briketa od mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika. Prema istraživanju Anwar et al. (2014) sadržaj lignina u biomasi može iznositi i do 40 %. Dobijeni podaci su u saglasnosti sa literaturnim. Ipak, ovako dobijeni rezultati za sadržaj lignina nisu u saglasnosti sa dobijenim rezultatima za čiste biomase (Kulić, 2021), gde je najniži sadržaj lignina utvrđen kod briketa od sojine stabljike (14,34 %), zatim kod briketa od ostataka glava suncokreta (18,28 %), briketa od pšenične slame (20,18 %), briketa od piljevine drveta bukve (21,96 %), a najviši kod briketa od oklasaka kukuruza (26,64 %). Razlog ovakvog odstupanja, verovatno, leži u nedovoljnoj homogenizaciji uzoraka. Iako je posebna pažnja bila posvećena homogenizaciji tokom pripreme uzoraka (homogenizacija mešavina biomase je delimično postignuta tokom procesa mlevenja u mlinu, a zatim i ručnim mešanjem), mora se uzeti u obzir da je završno mešanje vršeno ručno, što bi moglo biti uzrok moguće nehomogenosti.

Sadržaj celuloze u briketima bio je u opsegu 32,09-40,97 % (Tabela 12, Slika 33). Kod briketa napravljenih od mešavine duvanske stabljike-ostaci glava suncokreta, utvrđen sadržaj celuloze iznosio je 32,09 %, dok je najviši sadržaj, 40,97 %, utvrđen kod briketa napravljenih od mešavine duvanske stabljike-piljevina drveta bukve. Ovakav rezultat je u saglasnosti i sa ispitivanjem Kulićeve (2021), gde je kod briketa od čistih biomasa, najniži sadržaj celuloze utvrđen kod briketa od ostataka glava suncokreta (25,77 %), zatim kod briketa od sojine stabljike (31,55 %), briketa od pšenične slame (36,02 %), briketa od oklasaka kukuruza (39,54 %), dok je najviši sadržaj celuloze utvrđen kod briketa od piljevine drveta bukve (40,12 %).

Sadržaj celuloze dobijen ispitivanjem uzoraka u skladu je sa podacima koje su dobili drugi istraživači koji su ispitivali biljnu biomasu. Brkić i sar. (2007) su u svojim istraživanjima naveli da sadržaj celuloze u biljnom materijalu iznosi do 35 %, dok je Janić (2000), kod pšenične slame, utvrdio sadržaj celuloze od 36 %, a Kulić and Radojičić (2011) su ispitivanjem biomase duvanskih stabljika izmerili sadržaj celuloze od 35,97 %. Sagorevanjem briketa sa ovako visokim sadržajem celuloze, očekuje se da će se osloboditi velika količina energije, što će povećati vrednost ispitivanim uzorcima briketa.

Visok sadržaj lignoceluloznog materijala u briketima je pokazatelj da oni mogu imati dobar potencijal za korišćenje kao biogorivo.

9.1.2. Elementarni sastav briketa

Elementarna analiza biomase, takođe ima bitnu ulogu u određivanju vrednosti briketa od biomase. Na elementarni sastav biomase utiče geografsko podneblje na kome je biljka rasla, uslovi gajenja, navodnjavanja, đubrenja, kao i moment berbe sirovina (Casler and Boe, 2003; Gokcol et al., 2009; Vilček, 2013). Rezultati elementarnog sastava mogu se koristiti za preliminarno određivanje toplotne moći, jednostavnim postupkom koji pruža relativno pouzdane rezultate. Dobijeni rezultati analize elementarnog sastava briketa prikazani su u Tabeli 13, a zbog lakše preglednosti su grafički predstavljeni i na Slici 34.

Tabela 13. Elementarni sastav uzoraka briketa i emisijski faktor CO₂ (%)

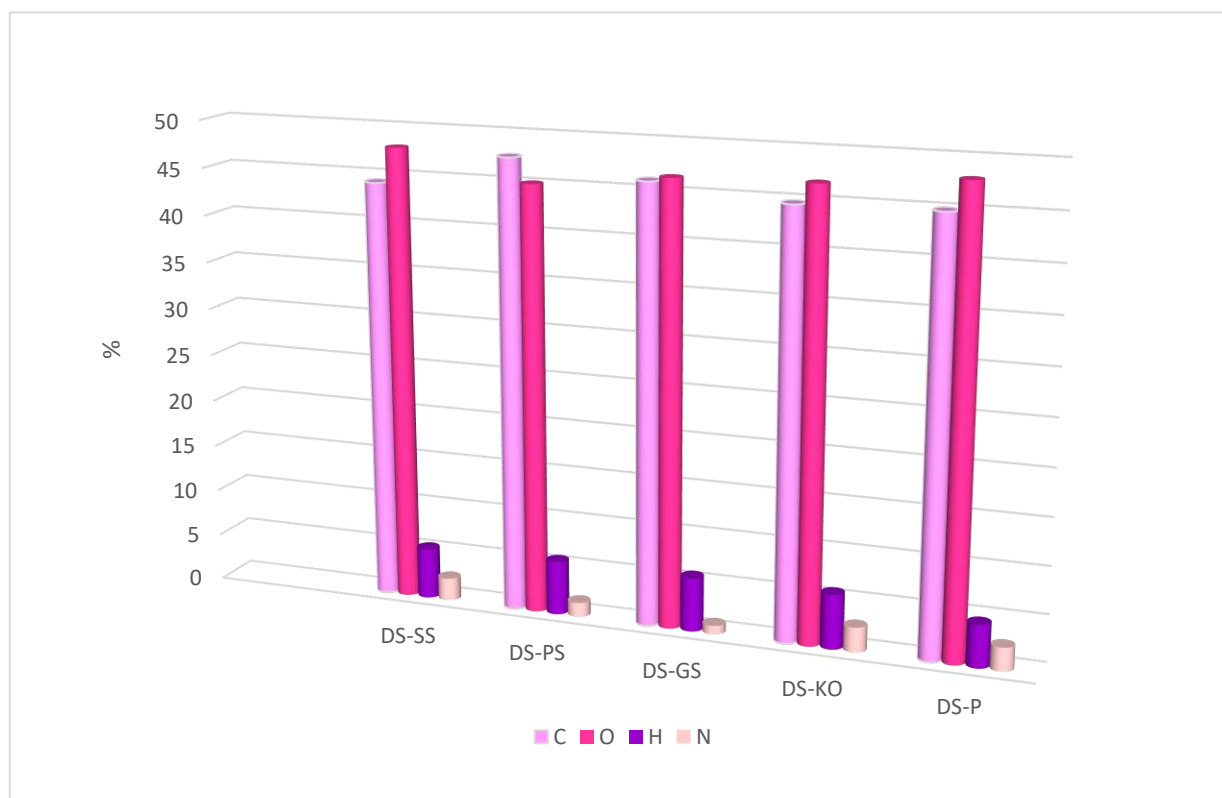
Parametar Briket	C	H	N	S	O*	EF
	%					(tCO ₂ /TJ)
DS-SS	44,23	5,42	2,41	U tragovima	47,94	101,54
DS-PS	47,63	5,74	1,55	U tragovima	45,08	112,66
DS-GS	46,06	5,77	0,93	0,70	46,54	107,08
DS-KO	44,69	5,81	2,66	U tragovima	46,84	99,42
DS-P	44,90	4,57	2,52	U tragovima	48,01	95,21

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, * Vrednost O proračunata je u odnosu na sadržaj ostalih elemenata.

Glavni elementi biomase koji utiču na svojstva goriva su ugljenik, vodonik, kiseonik, azot i sumpor. Sadržaj ugljenika određuje energetski sadržaj materijala, dok sadržaj vodonika i kiseonika utiče na zapaljivost i količinu pepela koji nastaje tokom sagorevanja. Azot i sumpor, sa druge strane, doprinose emisiji NO_x i SO_x tokom sagorevanja, što ima negativan uticaj na životnu sredinu.

Zastupljenost ugljenika u gorivu je merilo njegove toplotne vrednosti koju prisustvo svih drugih biogenih elemenata u biogorivu umanjuje. Analizom uzoraka briketa utvrđeno je da je sadržaj ugljenika u ispitivanim briketima u uskom opsegu, 44,23 – 47,63 % (Tabela 13, Slika 34), pri čemu briketi od mešavine duvanska stabljika-sojine stabljike (44,23 %) imaju najniži sadržaj ugljenika, a najviši sadržaj ugljenika je izmeren u mešavini duvanska stabljika – pšenična slama (47,63 %). Kod briketa napravljenih od čistih oblika biomase (Kulić, 2021), najniži sadržaj ugljenika imali su briketi od duvanske stabljike (43,09 %), zatim briketi od pšenične slame (43,25 %), briketi od sojine stabljike (44,44 %), briketi od oklaska kukuruza (46,67 %), briketi od glave suncokreta (47,77 %), dok je naveći sadržaj ugljenika utvrđen kod briketa od piljevine drveta bukve (48,97 %).

Sadržaj vodonika u uzorcima briketa neznatno se razlikuje u većini ispitivanih briketa (5,42 – 5,81 %), sa izuzetkom briketa od mešavine duvanske stabljike i piljevine drveta bukve kod kojih je taj sadržaj nešto niži (4,57 %). Najviši sadržaj vodonika nađen je kod briketa napravljenih u mešavini duvanska stabljika-kukuruzni oklasak (5,81 %), dok i briketi od mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (5,77 %) i mešavine duvanska stabljika-pšenična slama (5,74 %) imaju vrlo bliske vrednosti sadržaja vodonika. Kada pogledamo brikete od čistih oblika biomase (Kulić, 2021) najniži sadržaj vodonika imali su briketi od pšenične slame (5,12 %), briketi od duvanske stabljike (5,37 %), briketi od sojine stabljike (5,66 %), briketi od piljevine drveta bukve (5,78 %), briketi od ostataka glava suncokreta (5,80 %), a najviši briketi od oklaska kukuruza (5,91 %).



Slika 34. Elementarni sastav briketa.

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Sadržaj azota je najzastupljeniji u biomasi mešavine stabljika duvana-kukuruzni oklasak (2,66 %), dok je njegov sadržaj najmanji u mešavini duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (0,93 %). Kod briketa od čiste piljevine azot nije pronađen (Kulić, 2021). Sadržaj azota u briketima od pšenične slame iznosio je 0,72 %, kod briketa od oklaska kukuruza 1 %, kod briketa od sojine stabljike 1,60 %, a kod briketa od ostataka glava suncokreta 1,63 %. Kod briketa od duvanske stabljike sadržaj azota iznosi čak 3,70%.

Kao što je već istaknuto, azot je najzastupljeniji u biomasi stabljike duvana (3,70 %), pri čemu najveći deo potiče iz nikotina, a što može negativno uticati na efikasnost sagorevanja i povećanje emisije gasova. Zbog toga je biomasa stabljika duvana u Srbiji, prema zakonskoj regulativi o otpadu, svrstana u opasan otpad (Katalog otpada, 2010). Deo azota, u duvanskim stabljikama, vodi poreklo iz đubriva, kao posledica prekomerne upotrebe NPK đubriva (Radojičić, 2011). Međutim, visok sadržaj azota se, donekle, može korigovati, mešanjem sa drugim oblicima poljoprivredne biomase. U eksperimentu je stabljika duvana mešana sa drugim uzorcima biomase, pri čemu se sadržaj azota značajno redukovao. Na taj način dobijeni su briketi sa poboljšanim vrednostima.

Prema nemačkom (DIN 51 731:1996 ($\leq 0,3$ %)) i austrijskom (ONORM M 1735:1990, ($\leq 0,6$ %)) standardu za kvalitet briketa, nijedan od ispitivanih uzoraka nije zadovoljio kriterijume ovih standarda po pitanju sadržaja azota. Međutim, zastupljenost azota je slična u odnosu na količinu azota u uglju 0,68-2,18 %, koji se tradicionalno koristi kao energent, te vrednosti ovog parametra ne bi trebalo da već u startu eliminišu ove tipove briketa kao moguća biogoriva.

Sadržaj sumpora je u većini uzoraka bio ispod nivoa osetljivosti mernog uređaja. Detektovan je samo u mešavini duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta u količini od 0,70 %. Kod

briketa od čistih biomasa, sadržaj sumpora utvrđen je jedino kod briketa od ostataka glava suncokreta i to u količini od 0,63% (Kulić, 2021). Svi ovi rezultati su u saglasnosti sa rezultatima Peševskog et al. (2010) koji navode da je sadržaj sumpora zanemarljiv kod biomase. Dobijeni rezultati za sadržaj sumpora zadovoljavaju i standarde Nemačke (DIN 51731:1996) i Austrije (ONORM M1735:1990) po kojima je poželjno da biomasa ima sadržaj sumpora $\leq 0,08\%$, što biomasi daje ključnu ekološku prednost u odnosu na fosilna goriva.

U cilju prave procene kvaliteta biomase, ali i u cilju poređenja biomase sa fosilnim gorivima neophodno je uporediti njen elementarni sastav sa elementarnim sastavom fosilnih goriva, koji su u upotrebi. Prema Huntu (1996) elementarni sastav uglja iznosi 83 % C, 5 % H, 1 % S, 1 % N i 10 % O, dok je kod nafte 84,5 % C, 13 % H, 0,5 % S, 0,5 % N i 0,5 % O. Što se sastava uglja u našoj zemlji tiče, Životić et al. (2013) navode da ugalj iz rudnika Kovin ima 52,25-74,02 % C, 2,61-6,65 % H, 0,68-1,89 % N i 0,21-4,40 % S, dok ugalj iz rudnika Soko ima 57,05-67,62 % C, 5,62-7,26 % H, 1,12-2,18 % N i 1,06-3,56 % S. Rezultati ispitivanih uzoraka briketa pokazali su da je sadržaj C značajno niži u biomasi u odnosu na elementarni sastav fosilnih goriva, dok su vrednosti sadržaja H i N u biomasi bliski vrednostima u fosilnim gorivima.

U poređenju sa ugljevima, kod kojih sadržaj sumpora može biti u rasponu 0,1 pa čak do 15% (Speight, 2015), a imajući u vidu da je u nekim ugljevima sa našeg područja sadržaj sumpora veći i od 5 % (Životić et al., 2013) ovde dobijeni rezultati za sadržaj sumpora značajno favorizuju ispitivane brikete kao gorivo u odnosu na ugalj sa ekološke tačke gledišta.

Emisijski faktor CO₂ za sve ispitivane biomase izračunat je na osnovu dobijenih podataka o količini ugljenika i donje toplotne moći (Tabela 13). Izračunati faktor emisije jednog od gasova staklene bašte smanjio bi emisiju CO₂ za oko 100 tCO₂/TJ, koji se inače emituje iz fosilnih goriva za dobijanje toplotne energije. Ovo je dodatni ekološki razlog zašto treba koristiti duvanske stabljike kroz mešavinu sa drugim biogorivima, kao zamenu za ugljeve.

9.2. Toplotna moć ispitivanih briketa

9.2.1. Računsko predviđanje toplotne moći (Higher heating value -HHV)

Prednost predviđanja toplotne moći (Higher heating value - HHV) računskim putem, u odnosu na eksperimentalno određivanje, ogleda se u brzini i ceni postupka. Izračunavanje toplotne moći na osnovu sastava se koristi za dobijanje preliminarnih rezultata, na osnovu kojih bi se mogao proceniti kvalitet briketa od biomase u pogledu njihovog korišćenja kao obnovljivog izvora energije. Važno je napomenuti da je vrednost tako dobijene HHV uvek veća od eksperimentalno određene toplotne moći goriva.

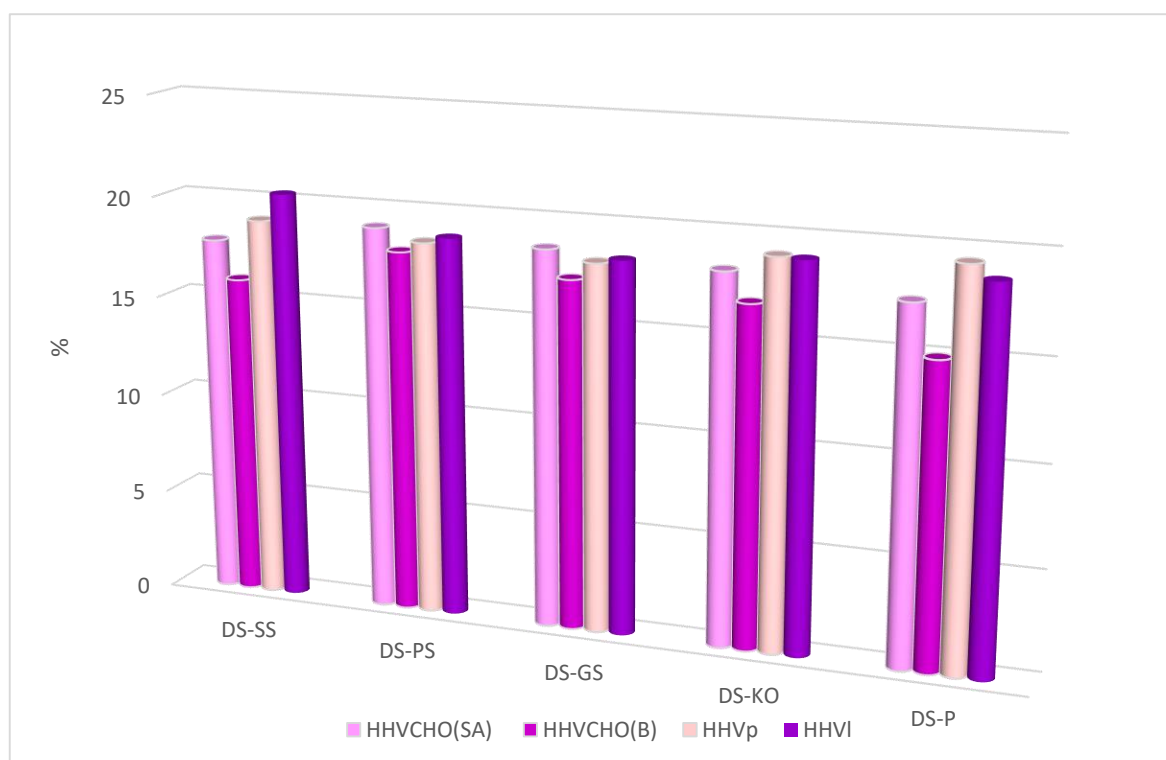
Već je istaknuto da postoje mnoge formule koje se mogu koristiti za predviđanje HHV briketa od biomase, a koja će se od njih primeniti, pre svega, zavisi od dostupnosti opreme i cene analiza koje su istraživačima na raspolaganju.

U ovom istraživanju predviđanje toplotne moći je izračunato na osnovu elementarnog sastava, sadržaja pepela i lignina. Za proračun HHV upotrebljene su formule, koje su navedene u Tabeli 9 (poglavlje 8.2.10.1.), a dobijeni rezultati prikazani su u Tabeli 14 i na Slici 35.

Tabela 14. Predviđanje toplotne moći u odnosu na elementarni i hemijski sastav

Parametar	HHV _{CHO(SA)}	HHV _{CHO(B)}	HHV _p	HHVI
	MJ/kg			
Briket				
DS-SS	17,83	15,93	18,95	20,33
DS-PS	19,03	17,94	18,47	18,78
DS-GS	18,61	17,25	18,12	18,34
DS-KO	18,21	16,79	19,06	19,00
DS-P	17,45	14,93	19,37	18,67

HHV_{CHS(SA)} (toplotna moć ozračunata na osnovu sadržaja C, H, O na osnovu formula Shenga and Azeveda, 2005), HHV_{CHS(B)} (toplotna moć ozračunata na osnovu sadržaja C, H, O na osnovu formula Brkića i sar., 2007), HHV_p (toplotna moć ozračunata na osnovu sadržaja pepela), HHVI (toplotna moć ozračunata na osnovu sadržaja lignina), DS-SS – duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS – duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO – duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve



Slika 35. Predviđanje toplotne moći.

DS-SS – duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS – duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO – duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Za proračun HHV na osnovu elementarnog sastava korišćene su dve formule. Prema formuli koju su dali Sheng and Azevedo (2005), najvišu vrednost ima mešavina duvanska stabljika-pšenična slama, i to 19,03 MJ/kg, dok je najniža vrednost izračunata kod mešavine duvanska stabljika-piljevina bukve 17,45 MJ/kg. Prema formuli Brkića i sar. (2007), takođe, najvišu vrednost, ima

mešavina duvanska stabljika-pšenična slama, 17,94 MJ/kg, dok je najniža vrednost izračunata kod mešavine duvanska stabljika- piljevina bukve i iznosi 14,93 MJ/kg. Proračun Kulićeve (2021), korišćenjem formule Shenga i Azeveda (2005), pokazao je malo drugačiji rezultat gde su briketi od piljevine imali najvišu HHV (19,48 MJ/kg), a briketi od pšenične slame najnižu vrednost (17,41 MJ/kg). Briketi napravljeni od čiste duvanske stabljike, koristeći istu formulu, imali su toplotnu moć 17,43 MJ/kg.

Na osnovu sadržaja pepela najviša toplotna moć HHV_p je izračunata za brikete od mešavine duvanske stabljike i piljevine drveta bukve (19,37 MJ/kg), a najnižu su imali briketi napravljeni mešanjem duvanske stabljike i ostataka glava suncokreta (18,12 MJ/kg). Ovakav rezultat je u skladu sa rezultatima dobijenim za čiste brikete, gde je najviša HHV, preračunata preko formule za pepeo, dobijena kod briketa od piljevine drveta bukve (19,79 MJ/kg), a najniža HHV kod briketa napravljenih od ostataka glava suncokreta i iznosi 17,08 MJ/kg (Kulić, 2021).

Proračun toplotne moći, na osnovu sadržaja lignina, pokazao je da najvišu vrednost ima biomasa mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika (20,33 MJ/kg). Najniža vrednost toplotne moći, ponovo je dobijena je kod mešavine duvanske stabljike i ostataka glava suncokreta (18,34 MJ/kg). Kod briketa od čistih oblika biomase, rezultati su nesto drugačiji. Najniža HHV preko formule za sadržaj lignina proračunata je kod briketa od sojine stabljike i iznosi 18,10 MJ/kg, dok je najviši HHV dobijen kod briketa od oklaska kukuruza, 19,19 MJ/kg (Kulić, 2021).

Poredeći rezultate obe formule preračunate HHV preko hemijskog sastava za iste uzorke briketa, uočljivo je da se rezultati neznatno razlikuju. Veće odsupanje uočava se, jedino, kod briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika, gde HHV preračunata preko sadržaja pepela iznosi 18,95 MJ/kg, odnosno 20,33 MJ/kg, kada se koristi formula na osnovu sadržaja lignina.

Rezultati dobijeni korišćenjem formula HHV koji uključuju hemijski sastav uzoraka biomase, nešto su viši od onih, koji su dobijeni korišćenjem formula za predviđanje toplotne moći u odnosu na elementarni sastav (izuzetak je mešavina stabljika duvana – pšenična slama).

Proračunata vrednost HHV briketa duvanske stabljike, na osnovu obe formule, u saglasnosti je sa literaturnim podacima. Radojičić et al. (2014a) su ispitivali duvan tipa Berlej, i izračunali HHV od 18,47MJ/kg, na osnovu sadržaja lignina, odnosno 18,94 MJ/kg, na osnovu sadržaja pepela. U svojim istraživanjima, Mijailović i sar. (2014) preračunali su, na osnovu sadržaja lignina, da duvanske stabljike imaju HHV od 18,308 MJ/kg.

Dobijeni proračun HHV, svih ispitivanih uzoraka, u saglasnosti je sa literaturnim podacima, gde je kod biljne biomase, očekivana HHV 18,0-24,8 MJ/kg (Demirbas, 1997; Sheng and Azevedo, 2005; Chun–Yang, 2011). Prema tome, na osnovu energetskih karakteristika, svi ispitivani uzorci biomase mogu se koristiti kao biogorivo.

Sadržaj pepela u biomasi, koja je iskorišćena za proračun toplotne moći, značajno utiče na vrednost toplotne moći. Monti et al. (2008) ukazali su da se sa povećanjem pepela od 1% smanjuje toplotna moć za 200 kJ/kg. Međutim, korelisanje promene količine pepela sa toplotnom moći ispitivanih biomasa nije strogo proporcionalno jer se moraju uzeti u obzir i količine ostalih elemenata, koji, svi zajedno, imaju uticaja na vrednost toplotne moći.

Međutim, kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, sagorevanje u realnim uslovima zavisi od mnogih faktora, pa se očekuje da će realna vrednost toplotne moći briketa od biomase, dobijena eksperimentalnim određivanjem, biti manja od predviđene, kao i od toplotne moći ekvivalentne količine uglja, sa druge strane.

9.2.2. Eksperimentalno određivanje toplotne moći

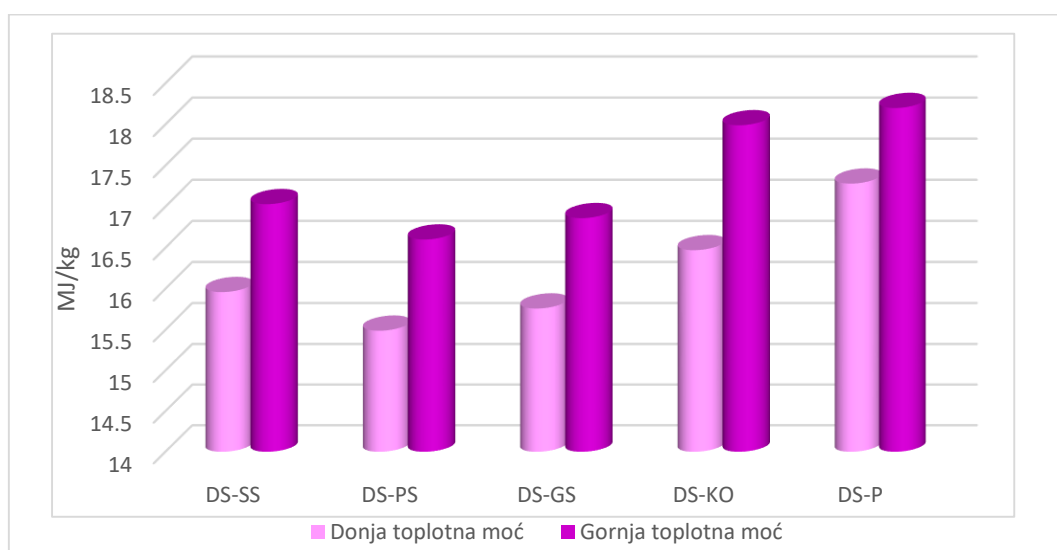
Nakon računskog predviđanja toplotne moći u prethodnom poglavlju (9.2.1.), gde je pokazano da je opravdano da se ispitivani briketi koriste kao biogorivo, urađeno je i eksperimentalno određivanje. Rezultati eksperimentalnog određivanja toplotne moći prikazani su u Tabeli 15 i na Slici 36.

Tabela 15. Gornja i donja toplotna moć – eksperimentalni rezultati

Parametar Briket	Donja toplotna moć	Gornja toplotna moć
	MJ/kg	
DS-SS	15,96	17,03
DS-PS	15,49	16,60
DS-GS	15,76	16,86
DS-KO	16,47	17,99
DS-P	17,28	18,20

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Dobijeni rezultati pokazuju da najvišu toplotnu moć (i donju i gornju) imaju briketi od mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve (17,28 MJ/kg; 18,20 MJ/kg). Najnižu vrednost toplotne moći (i donje i gornje) imali su briketi od biomase mešavine duvanska stabljika-pšenična slama (15,49 MJ/kg, 16,60 MJ/kg). Kod briketa od čistih biomasa (Kulić, 2021) najnižu toplotnu moć (i donju i gornju) imaju briketi od ostataka glava suncokreta (14,90 MJ/kg; 15,95 MJ/kg). Najvišu donju toplotnu moć pokazali su briketi od piljevine drveta bukve (17,27 MJ/kg), dok najvišu gornju toplotnu moć imaju briketi od oklaska kukuruza (18,49 MJ/kg).



Slika 36. Gornja i donja toplotna moć.

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Eksperimentalno određena donja toplotna moć bila je u intervalu 15,49-17,28 MJ/kg. Gornja toplotna moć, određena eksperimentalnim putem, bila je u intervalu 16,60-18,20 MJ/kg. Ako se uporede dobijene vrednosti svih ispitivanih uzoraka, vidi se da su, kod svih uzoraka, mešavine duvanskih stabljika sa ostalim oblicima biomase pokazale veće vrednosti toplotne moći (i gornje i donje) u odnosu na čist uzorak biomase (Kulić, 2021). Povećanje vrednosti donje toplotne moći iznosi od 1,38 % kod briketa napravljenih od mešavine duvanske stabljike-pšenična slama, do 13 % mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve u odnosu na brikete napravljene samo od duvanske stabljike. Kada govorimo o gornjoj toplotnoj moći, utvrđeno je povećanje od 1,65 % kod briketa od mešavine duvanska stabljika-pšenična slama, do 11,45 % kod mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve.

U skladu sa očekivanjima, eksperimentalno dobijeni rezultati toplotne moći, nešto su niži u odnosu na rezultate dobijene proračunom. Tokom proračuna HHV, korišćenjem obe formule, mešavina duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta imale su najnižu HHV vrednost, dok je najviša vrednost dobijena kod mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, kada se HHV računa preko formule za sadržaj pepela, odnosno mešavina duvanska stabljika-sojina stabljika, kada se koristi formula koja uključuje sadržaj lignina. Eksperimentalno dobijeni rezultati pokazali su da najvišu toplotnu moć (i gornju i donju) ima mešavina duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, što je u saglasnosti sa rezultatom dobijenim proračunom korišćenjem formule koja uključuje sadržaj pepela. Međutim, eksperimentalni rezultati pokazali su da najnižu toplotnu moć (i gornju i donju) imaju briketi napravljeni od mešavine duvanska stabljika-pšenična slama.

S obzirom da je još tokom predviđanja toplotne moći pokazano da se ispitivani briketi mogu koristiti kao biogorivo, eksperimentalno dobijeni rezultati potvrdili su navedenu tvrdnju. Dobijeni rezultati u skladu su sa istraživanjem Blazqueza et al. (2014), da toplotna moć biogoriva može biti od 16 MJ/kg do 20 MJ/kg. Takođe, svi rezultati su u saglasnosti i sa istraživanjem Brkića i sar. (2007), gde se navodi da donja toplotna moć poljoprivredne biomase može biti od 13 MJ/kg do 18 MJ/kg.

Prema nemačkom DIN 51 731:1996 (17,5-19,5) MJ/kg i austrijskom ONORM M 1735:1990, (≥ 18 MJ/kg) standardu o kvalitetu briketa, samo mešavina duvanska stabljika-piljevina drveta bukve (gledajući gornju toplotnu moć) ispunjava oba kriterijuma. Nijedan drugi uzorak nije zadovoljio kriterijume ovih standarda. Prema standardu SRPS EN ISO 17225-2:2021 svi ispitivani uzorci biomase ulaze u kategoriju B klase biogoriva (min 16 MJ/kg).

Zbog svega navedenog, nastojanja da se biomasa primeni kao biogorivo su izuzetno opravdana, čak i u slučajevima kada je toplotna vrednost biogoriva niža, jer je isplativa zbog namenske upotrebe otpada iz poljoprivredne proizvodnje i ekološki prihvatljiva, pre svega zbog male količine sumpora.

9.3. Produkti sagorevanja

Produkti sagorevanja biomase uključuju ugljen-dioksid, ugljen-monoksid, čestice, okside azota, sumpor-dioksid i isparljiva organska jedinjenja. Kada se ispuste u životnu sredinu, ova jedinjenja mogu imati negativan uticaj na kvalitet vazduha i vode i doprineti klimatskim promenama i drugim ekološkim problemima.

9.3.1. Predviđanje produkata sagorevanja

Na osnovu elementarnog sastava, korišćenjem steheometrijskih formula (5.17, 5.25, 5.31, 5.34, 5.35, prikazanih u poglavlju 5.3.2.) izračunate su moguće zapremine produkata sagorevanja,

čiji rezultati su prikazani Tabeli 16. U Tabeli 16 su prikazane i vrednosti za minimalno potrebne količine vazduha, odnosno kiseonika, koje su neophodne za potpuno sagorevanje uzoraka biomase.

Tabela 16. Predviđanje minimalno potrebne količine kiseonika i vazduha i zapremine produkata sagorevanja

Parametar	O_{\min}	L_{\min}	V_{CO_2}	V_N	V_{SO_2}
Briket	m^3/kg		m^3/kg		
DS-SS	0,79	3,76	0,83	2,99	U tragovima
DS-PS	0,88	4,19	0,89	3,32	U tragovima
DS-GS	0,82	3,90	0,86	3,09	0,005
DS-KO	0,83	3,95	0,83	3,14	U tragovima
DS-P	0,76	3,62	0,83	2,88	U tragovima

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 16, minimalno potrebna količina kiseonika (O_{\min}) za potpuno sagorevanje biomase kreće se u opsegu (0,76-0,88) m^3/kg . Najmanja količina kiseonika potrebna je za sagorevanje mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve (O_{\min} 0,76 m^3/kg) Vrlo bliska vrednost (0,77 m^3/kg) dobijena je sagorevanjem briketa napravljenog od čiste duvanske stabljike (Kulić, 2021). Najveća vrednost za minimalnu količinu kiseonika potrebnog za sagorevanje je dobijena kod briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-pšenična slama, kod kojih je O_{\min} 0,88 m^3/kg . Kod čistih briketa (Kulić, 2021), najnižu vrednost O_{\min} imaju briketi od pšenične slame (0,8510 m^3/kg), a najviša vrednost O_{\min} utvrđena je kod briketa od piljevine drveta bukve (0,9392 m^3/kg).

Rezultati izračunate zapremine produkata sagorevanja ugljenika (V_{CO_2}) prikazani su u Tabeli 16 i bili su u vrlo uskom opsegu 0,83-0,89 m^3/kg . Kod čistih briketa (Kulić, 2021), preračunata zapremina V_{CO_2} kretala se u sličnim granicama i to od 0,8045 m^3/kg kod briketa od duvanske stabljike, do 0,9143 m^3/kg kod briketa od piljevine drveta bukve.

Za razliku od proračuna zapremine sagorevanja ugljenika, gde kompletan proračun direktno zavisi od sadržaja ugljenika u uzorku briketa, proračun zapremine sagorevanja azota uzima u obzir sadržaj azota koji se nalazi u samoj biljci i sadržaj azota koji sagoreva iz vazduha.

Prema elementarnom sastavu, najniža predviđena zapremina **azota** izračunata je za mešavinu duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, 2,88 m^3/kg , dok je najviša zapremina azota izračunata za brikete od mešavine duvanska stabljika-pšenična slama i iznosi 3,32 m^3/kg . Najniža zapremina azota, kod čistih briketa (Kulić, 2021) izračunata je za brikete od pšenične slame sa 3,2072 m^3/kg , dok je najviša vrednost izračunata za brikete od piljevine 3,5332 m^3/kg .

Određivanje elementarnog sastava je pokazalo da se sumpor nalazi u tragovima kod svih uzoraka briketa, osim kod briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta. Iz tog razloga zapremina SO_2 je izračunata samo kod mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta i iznosi 0,005 m^3/kg . Takođe, i kod čistih briketa (Kulić, 2021), zapremina SO_2 je mogla da se predvidi jedino kod briketa od glava suncokreta i iznosi 0,0139 m^3/kg .

9.3.2. Eksperimentalno određivanje produkata sagorevanja

Nakon što je predviđanje produkata sagorevanja računskim putem pokazalo da su ispitivani uzorci biomase potencijalno pogodni za korišćenje sa aspekta zaštite životne sredine, urađeno je i eksperimentalno određivanje produkata sagorevanja.

Svi ispitivani uzorci briketa spaljivani su pod istim, i unapred definisanim uslovima. Proces sagorevanja briketa i kvalitet produkata njihovog sagorevanja zavisi od niza faktora od kojih su najznačajniji način sagorevanja goriva, efikasnosti peći u kojoj se sagorevanje odvija, količina dostupnog kiseonika i temperatura sagorevanja.

U Tabeli 17. prikazani su rezultati sadržaja dimnih gasova (O_2 , CO_2 , CO , NO , NO_x) izmereni u realnim uslovima, tokom sagorevanja briketa. Važno je naglasiti, da ni u jednom uzorku nisu detektovani SO_2 i NO_2 .

Tabela 17. Sadržaj dimnih gasova tokom sagorevanja briketa

Parametar	O_2	CO_2	CO	NO	NO_x
Briket	%		mg/m^3		
DS-SS	10,98	9,74	2035	267,67	410
DS-PS	11,05	9,97	3115	202	309,34
DS-GS	14,31	6,40	2261,34	233,34	351,67
DS-KO	11,02	10,10	2592,67	244,67	374,67
DS-P	12,95	7,44	1562	203	311,67

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Na osnovu rezultata iz Tabele 17, vidi se da je najniža koncentracija O_2 izmerena pri sagorevanju briketa na bazi mešavine duvanske i sojine stabljike (10,98 %) a najviša pri sagorevanju briketa napravljenih mešanjem duvanske stabljike i ostataka glava suncokreta (14,31 %).

Produkcija CO_2 bila je najniža u produktima sagorevanja briketa napravljenih mešanjem duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta i iznosila je 6,40 %. Najviša produkcija CO_2 izmerena je kod mešavine duvanska stabljika-oklasak kukuruza (10,10 %).

Koncentracija CO kretala se od $1562 mg/m^3$, koliko je izmereno u produktima sagorevanja briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, do $3115 mg/m^3$, što je izmereno kod produkata sagorevanja briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-pšenična slama.

Najniži sadržaj NO izmeren je kod produkata sagorevanja briketa napravljenih u mešavinama duvanska stabljika-pšenična slama ($202 mg/m^3$) i duvanska stabljika-piljevina drveta bukve ($203 mg/m^3$). Najviši sadržaj NO izmeren je u produktima sagorevanja briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika ($267,67 mg/m^3$).

Slično sadržaju NO , u produktima sagorevanja najniža koncentracija NO_x izmerena je kod mešavina duvanska stabljika-pšenična slama ($309,34 mg/m^3$) i duvanska stabljika-piljevina drveta

bukve ($311,67 \text{ mg/m}^3$). Takođe, kao i kod produkcije NO, najviši sadržaj NO_x izmeren je kod briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika (410 mg/m^3).

U poređenju sa fosilnim gorivima, biomasa ima povoljniji elementarni sastav, što se odražava i na produkte sagorevanja. Prema rezultatima Savića (2013) produkti sagorevanja uzoraka uglja poreklom iz rudnika Kolubara imaju sadržaj CO₂ u opsegu 1,16-6,64 %, sadržaj SO₂ u opsegu 14-623 mg/m³, NO u opsegu 7-129 mg/m³, NO_x u opsegu 144-562 mg/m³, dok je NO₂ detektovan samo u jednom uzorku i iznosi 19,6 mg/m³. Ipak, ovako dobijene rezultate nije moguće direktno porediti sa uzorcima biomase, zbog velike razlike u elementarnom sastavu goriva.

U zavisnosti od toplotne snage postrojenja u kome se vrši sagorevanje, kao i vrste goriva, Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija (Sl. gl. RS, 6/16) predlaže svođenje mernih vrednosti produkata sagorevanja na odgovarajuće koncentracije kiseonika u dimnim gasovima, što za biomasu iznosi 11%. Zbog toga, radi lakšeg poređenja, svi produkti sagorevanja ispitivanih uzoraka su preračunati, i dalja diskusija odnosi se na sadržaj kiseonika od 11%.

Rezultati merenja količine CO₂, CO, NO_x i NO nastale sagorevanjem ispitivanih briketa, preračunati na 11% kiseonika, dati su u Tabeli 18.

Tabela 18. Emisije CO₂, CO, NO_x i NO preračunate na 11% O₂

Briket	DS-SS	DS-PS	DS-GS	DS-KO	DS-P
O ₂ (%)			11		
CO ₂ (%)	9,76	9,92	4,92	10,08	6,32
CO (mg/m ³)	2038	3100	1738,28	2587,67	1326,80
NO _x (mg/m ³)	410,75	307,94	270,32	373,32	264,48
NO (mg/m ³)	268,16	201,01	179,37	244,23	172,43

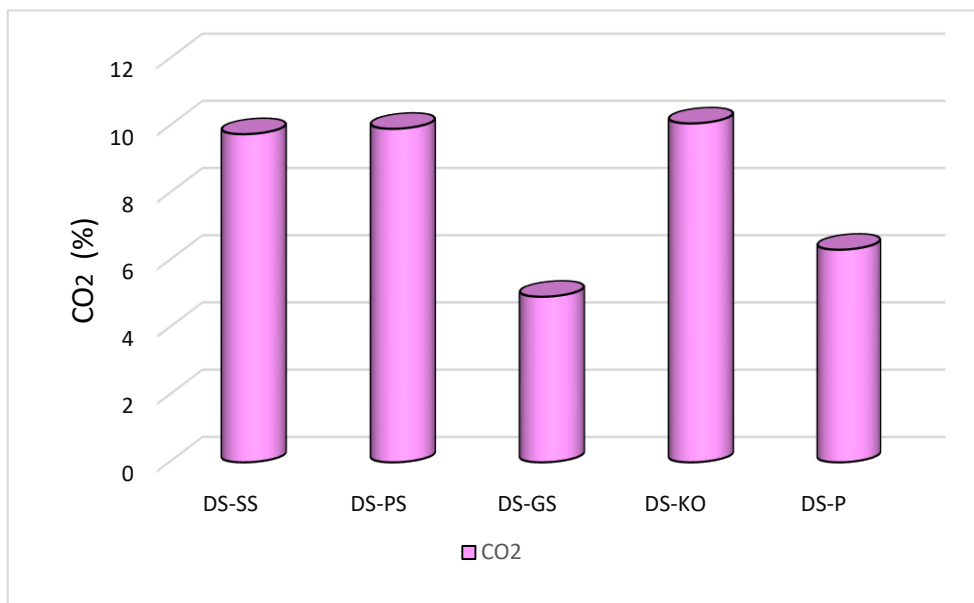
DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Da bi dobijeni rezultati produkata sagorevanja preračunatih na 11 % O₂ bili pregledniji i jednostavniji za upoređivanje, podaci iz Tabele 18. prikazani su na Slikama 37, 38 i 39.

Ugljen-dioksid je jedan od glavnih gasova staklene bašte, koji uzrokuju globalno zagrevanje planete i time direktno ugrožavaju sve ekosisteme, uključujući i čoveka. Veliki deo CO₂ u atmosferi formira se kao posledica čovekovih aktivnosti, pre svega sagorevanjem čvrstih i tečnih fosilnih goriva (industrija, saobraćaj, grejanje...). Sagorevanje biomase emituje značajno manju količinu CO₂, u odnosu na tečna i čvrsta fosilna goriva, što njeno korišćenje čini posebno značajnim za zaštitu životne sredine i borbu protiv globalnog zagrevanja (Demirbas, 2005).

Emisija CO₂ u produktima sagorevanja izmerena je u opsegu 4,92-10,08 % (Tabela 18, Slika 37). Najniža detektovana emisija CO₂ izmerena je kod briketa napravljenih od mešavine stabljika duvana-ostaci glava suncokreta, 4,92 %. Najviša emisija CO₂ dobijena je za brikete od mešavine duvanska stabljika-oklasak kukuruza, 10,08 %. Kod čistih briketa (Kulić, 2021) najniža detektovana

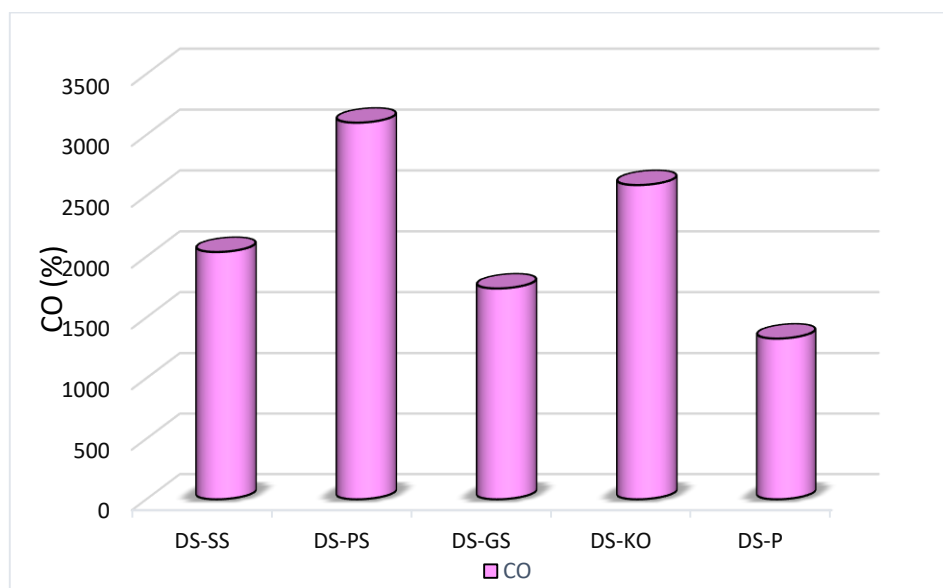
vrednost CO₂ dobijena je kod briketa od čiste duvanske stabljike, 6,91 %, dok je najviša vrednost dobijena kod briketa od ostataka glava suncokreta i iznosi 9 %.



Slika 37. Sadržaj CO₂ u produktima sagorevanja briketa od biomase, preračunat na 11% O₂.

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Ugljen monoksid (CO) je otrovni, zapaljivi gas, bez boje i mirisa, koji nastaje nepotpunim sagorevanjem goriva. Kao što se vidi u Tabeli 18, emisija CO kod svih ispitivanih uzoraka iznosila je do 3100 mg/m³, što je u skladu sa Uredbom o graničnim vrednostima zagađujućih materija (Sl. glasnik RS, br. 6/16), prema kojoj je za mala postrojenja granična vrednost 4000 mg/m³.



Slika 38. Sadržaj CO u produktima sagorevanja briketa od biomase, preračunata na 11% O₂.

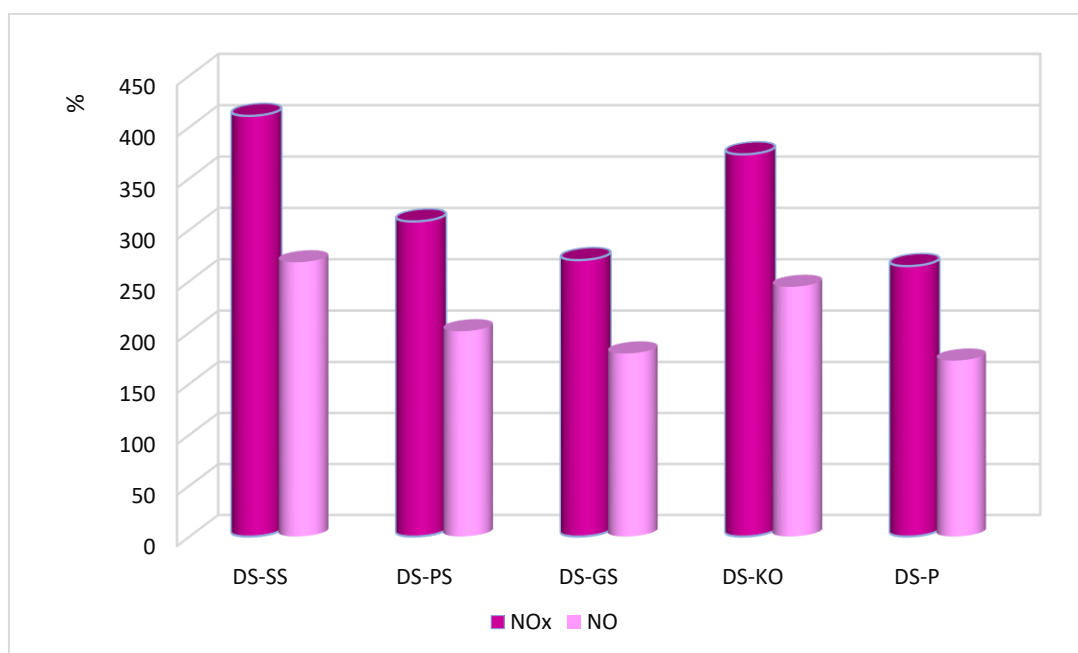
DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Iz Tabele 18 i sa Slike 38, uočljivo je da je sa aspekta emisije CO, najpovoljniji rezultat po životnu sredinu dalo sagorevanje briketa dobijenih mešanjem duvanske stabljike i piljevine drveta bukve ($1326,80 \text{ mg/m}^3$). S druge strane, najviša vrednost CO dobijena je sagorevanjem briketa od mešavine duvanske stabljike i pšenične slame (3110 mg/m^3), odnosno moglo bi se reći da je sagorevanje ove mešavine bilo najnepotpunije. Kod čistih briketa (Kulić, 2021) najniža detektovana vrednost CO dobijena je kod briketa od čiste duvanske stabljike, $1358,21 \text{ mg/m}^3$, dok je najviša vrednost dobijena kod briketa od pšenične slame i iznosi $2606,48 \text{ mg/m}^3$.

Najreaktivniji oksidi azota (NO_x) uključuju azot-monoksid (NO) i azot-dioksid (NO₂), koji su istovremeno gasovi staklene bašte i izazivači kiselih kiša, ali ne uključuju i azot-suboksid (N₂O). Za potrebe istraživanja, posebno je merena koncentracija NO, a posebno ukupna koncentracija NO_x.

Kao što je već pomenuto, sadržaj azota kod briketa napravljenih od duvanskih stabljika, delom potiče od uslova gajenja, tj dodatka azotnih đubriva u periodu rasta biljke. Međutim, na emisiju azotnih oksida, osim sadržaja elementarnog azota u biomasi, utiču i mnogi prekursori, kao i reakcije koje se odigravaju tokom sagorevanja (Demirbas, 2005).

Najveću emisiju NO (Tabela 18, Slika 39) pokazali su briketi dobijeni mešanjem stabljike duvana i sojine stabljike ($268,16 \text{ mg/m}^3$). Najniža emisija NO izmerena je u produktima sagorevanja briketa od duvanske stabljike i piljevine drveta bukve ($172,43 \text{ mg/m}^3$), dok je zanemarljivo viša emisija izmerena kod briketa od duvanske stabljike i ostataka glava suncokreta ($179,37 \text{ mg/m}^3$). Kod čistih briketa (Kulić, 2021) najniža detektovana vrednost NO dobijena je kod briketa od piljevine drveta bukve i iznosi $125,06 \text{ mg/m}^3$, dok je najviša vrednost dobijena kod briketa od ostataka glava suncokreta i iznosi $257,30 \text{ mg/m}^3$.



Slika 39. Sadržaj azotnih oksida (NO i NO_x), preračunatih na 11% O₂.

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Najviša emisija NO_x (Tabela 18, Slika 39) izmerena je kod briketa na bazi duvanske stabljike i sojine slame ($410,75 \text{ mg/m}^3$). Minimalno izmerenu emisiju NO_x pokazali su briketi od duvanske stabljike i piljevine drveta bukve ($264,48 \text{ mg/m}^3$), dok je vrlo bliska i vrednost za brikete od duvanske stabljike i ostataka glava suncokreta ($270,32 \text{ mg/m}^3$). Kod čistih briketa (Kulić, 2021) najniža detektovana emisija NO_x dobijena je kod briketa od piljevine drveta bukve, $187,44 \text{ mg/m}^3$, dok je najviša emisija dobijena kod briketa od ostataka glava suncokreta i iznosi $394,25 \text{ mg/m}^3$. Prema

količini oksida azota, u skladu sa zahtevom Uredbe o graničnim vrednostima zagađujućih materija u vazduhu (Sl. glasnik RS", br. 6/16) produkti sagorevanja svih ovde ispitivanih briketa su prihvatljivi sa aspekta zaštite životne sredine, po kojoj je granična vrednost za količinu azotovih oksida 500 mg/m³. Emisije azotnih oksida ispitivanih briketa su takođe i u saglasnosti sa litereturnim podacima za biomasu (Lazaroiu et al, 2012).

Uzimajući u obzir brojne faktore koji uslovljavaju sastav produkata sagorevanja briketa, činjenica je da svi briketi ispunjavaju zahteve Uredbe o graničnim vrednostima zagađujućih materija u vazduhu (Sl. glasnik RS", br. 6/16), jer je količina CO manja od 4000 mg/m³ a količina NO_x manja od 500 mg/m³.

Na osnovu prikazanih merenja emisija CO, NO i NO_x nastalih sagorevanjem ispitivanih uzoraka briketa, najpogodnija je briketirana mešavina duvanskih stabljika i piljevine drveta bukve (NO:172,43 mg/m³, NO_x:264,48 mg/m³, CO:1326.80 mg/m³).

Sa aspekta emisije ugljen-dioksida ispitivanih briketa, najpogodnija je mešavina sa ostacima glava suncokreta (4,92 mg/m³), a odmah zatim mešavina duvanska stabljika – piljevina drveta bukve (6,32 mg/m³).

Kada se uzmu u obzir rezultati merenja i toplotne moći i produkata sagorevanja, kao briketi sa najoptimalnijim svojstvima se ističu briketi na bazi mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve.

9.3.3. Sadržaj nikotina u briketima i dimu

Briketi od stabljika duvana su specifična vrsta goriva od biomase koje može imati dodatni uticaj na životnu sredinu, jer tokom sagorevanja mogu da oslobode i izvesnu količinu nikotina u vazduh.

U Tabeli 19. prikazani su rezultati sadržaja nikotina za ispitivane uzorke, dok su na Slici 40. prikazani izgledi filtera nakon sagorevanja.

Tabela 19. Sadržaj nikotina u ispitivanim uzorcima

Parametar Briket	Nikotin u briketu (mg/kg)	Nikotin u dimu
DS-SS	535,5	<0,10
DS-PS	532,7	<0,10
DS-GS	486,2	<0,10
DS-KO	496,2	<0,10
DS-P	484,6	<0,10

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Sadržaj nikotina u briketima iznosio je 484,6–535,5 mg/kg. Kulić (2021) je u svom istraživanju detektovala 715,6 mg/kg nikotina u briketima od čiste duvanske stabljike. Mešanjem

duvanske stabljike sa žetvenim ostacima drugih vrsta biomasa, sadržaj nikotina se smanjio od 25,17 % (kod briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-pšenična slama, gde iznosi 535,5 mg/kg) do 32,29% (u mešavini duvanska stabljika-piljevina, gde iznosi 484,6 mg/kg).



Slika 40. Izgled filtera nakon sagorevanja briketa.

Kao što je već napomenuto, svi briketi mešavina žetvenih ostataka sadržali su 50% duvanskih stabljika. Ipak, uočljive su razlike u sadržaju nikotina u ispitivanim briketima. Mogući razlozi za ovakve rezultate bi mogli biti:

-proces izrade briketa nije bio automatizovan, već se ubacivanje sirovina u mešalicu radilo ručno, što je uticalo na homogenost uzoraka;

-na sadržaj nikotina u dimu utiče ne samo njegov sadržaj, već i sadržaj ostalih elemenata, kao i njihov odnos u uzorcima koji sagorevaju, način na koji je vezan u materijalu (slobodan ili vezan u solima), kao i visine temperature tokom sagorevanja.

Rezultati određivanja sadržaja nikotina u dimu pokazuju da je njegova emisija iz svih uzoraka briketa ispod 10 mg/kg, tj dobijena vrednost bila je niža od praga osetljivosti mernog instrumenta. Ovaj podatak zadovoljava kako domaće, tako i svetske zakone. Istovremeno, ovaj rezultat je važan sa ekološkog aspekta jer omogućava primenu duvanskih stabljika kao biogoriva.

Kao što je već napomenuto, duvanski otpad zbog sadržaja nikotina može biti potencijalno opasan. Međutim, urađene analize pokazale su da su duvanske stabljike pogodne za upotrebu kao obnovljivi izvor energije. Kada se pomešaju sa drugim oblicima biomase, sa aspekta sadržaja nikotina postaju ekološki bezbedan proizvod.

9.3.4. Određivanje PAH jedinjenja

GC-MS analizom prečišćenog ekstrakta uzoraka dima nastalih sagorevanjem briketa od različitih materijala: duvanske stabljike, 5 različitih vrsta biomase (oklaska kukuruza, piljevine bukve, sojinih stabljika, pšenične slame i ostataka glave suncokreta), kao i briketa dobijenih kombinacijom duvanske stabljike sa navedenim pojedinačnim biomasama, identifikovan je veći broj policikličnih aromatičnih ugljovodnika (PAH). Posebna pažnja u smislu kvalitativnog i kvantitativnog određivanja posvećena je grupi od 16 PAH jedinjenja koje je Evropska agencija za zaštitu životne sredine definisala kao posebno značajne u pogledu praćenja stepena zagađenosti i zaštite životne sredine.

U skoro svim ispitivanim ekstraktima iz grupe 16 PAH jedinjenja identifikovani su sledeći aromatični ugljovodonici: fluoren (FLU), fenantren (PHE), antracen (ANT), fluoranten (FLT), piren (PYR), benzo(a)antracen (BaA), hrizen (CHR), benzo(b)fluoranten (BbF), benzo(k)fluoren (BkF), benzo(a)piren (BaP), indeno(1,2,3-cd)piren (I123cdP), dibenzo(ah)antracen (DBahA), benzo(ghi)perilen (BghiP). Takođe su u svim uzorcima bili prisutni i metil fenantreni. Kvantitativna analiza ovih PAH-ova izvršena je na osnovu kalibracionih pravih dobijenih iz serije standardnih rastvora za svako jedinjenje iz grupe 16 PAH jedinjenja.

Koncentracioni nivoi policikličnih aromatičnih ugljovodnika izmereni u dimu nastalom sagorevanjem briketa od duvanske stabljike, briketa od 5 različitih vrsta biomase (oklaska kukuruza, piljevine bukve, sojine stabljike, pšenične slame i ostataka suncokretovih glava) i briketa dobijenih kombinacijom duvanske stabljike sa navedenim pojedinačnim biomasama su prikazani u Tabeli 20. Međutim, kako uzorkovanje dima nije bilo kvantitativno, ovi rezultati se ne mogu smatrati tipičnim za ispitivane vrste biomasa i briketa od mešavina biomasa, ali su međusobno uporedivi s obzirom da je sagorevanje svih briketa, odnosno uzorkovanje dima vršeno pod istim uslovima.

Tabela 20. Koncentracioni nivoi emisije PAH u dimu ispitivanih briketa

Briket	Emisija 16 PAH jedinjenja (mg kg ⁻¹ uzorka)
DS	33,32
KO	36,02
DS-KO	26,05
P	11,45
DS-P	9,92
GS	34,42
DS-GS	20,78
SS	9,99
DS-SS	12,59
PS	21,20
DS-PS	20,26

DS - duvanska stabljika, KO - kukuruzni oklasak, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, SS- -sojina stabljika, DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, GS – ostaci glava suncokreta, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, PS –pšenična slama, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, P – piljevina drveta bukve, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve.

Najviše vrednosti emisije PAH jedinjenja među ispitivanim uzorcima dima su dobijene sagorevanjem briketa od oklasaka kukuruza, prate ga briketi od glava suncokreta i duvanske stabljike, dok su među briketima od kombinacija biomase sa duvanskom stabljikom najviše emisije PAH jedinjenja dali briketi načinjeni od duvanske stabljike i oklasaka kukuruza. Ovaj rezultat je mogao biti i očekivan s obzirom da su i pojedinačne emisije PAH-ova za duvansku stabljiku i oklasak kukuruza imali najviše vrednosti emisije PAH-ova među svim analiziranim briketima. Među pojedinačnim biomasama najniže vrednosti emisije PAH jedinjenja su dobijene sagorevanjem piljevine drveta bukve, a takođe se i kombinacija ove piljevine sa duvanskom stabljikom pokazala kao ekološki najprihvatljivija među briketima smesa, u smislu količine proizvedenih PAH jedinjenja. Zanimljivo je da su gotovo sve kombinacije ispitivanih biomasa sa duvanskom stabljikom sagorevanjem emitovale manju količinu PAH jedinjenja u odnosu na pojedinačnu biomasu, što ukazuje na to da je kombinovanje ispitivanih biomasa ekološki prihvatljivo i poželjno. Jedini izuzetak u smislu smanjenja emisije PAH-ova pri mešanju sa duvanskom stabljikom je pokazala soja stabljika, koja daje manju emisiju PAH jedinjenja od smese sojine stabljike sa duvanskom stabljikom, ali je svakako značajno manja emisija PAH jedinjenja smese u odnosu na brikete od same duvanske stabljike.

Dakle, poredeći sve vrednosti emisija ispitivanih briketa, uočeno je da su emisije PAH jedinjenja dobijene sagorevanjem briketa dobijenih kombinacijom pojedinačnih biomasa sa duvanskom stabljikom uglavnom bile niže od emisije PAH jedinjenja pojedinačnih biomasa. Ovakvi rezultati mogu biti posledica nekoliko ključnih faktora, od kojih se sinergijski efekti smatraju najizraženijim. Naime, u mešavini različitih vrsta biomase, kombinacija materijala može rezultirati povoljnijim uslovima za gorenje, što dovodi do smanjenja formiranja PAH jedinjenja. Takođe, neke komponente prisutne u jednoj vrsti biomase mogu pomoći u razlaganju kompleksnih organskih molekula koji se nalaze u dugoj vrsti biomase, ali i mešanje različitih vrsta biomase može promeniti tok pirolize i dovesti do smanjenja proizvodnje PAH jedinjenja (Zhou et al., 2014, Zhang et al, 2022). U ovom radu ispitivane kombinacije pojedinačnih biomasa sa duvanskom stabljikom pokazale su se kao zadovoljavajuće u smislu smanjenja količine PAH jedinjenja u briketima od smese dve biomase u odnosu na pojedinačne biomase. Smanjenje emisije PAH jedinjenja kod mešanih briketa nije zapaženo samo kod kombinacije duvanska stabljika – soja stabljika (Tabela 20). Tako da se u cilju smanjenja emisije PAH jedinjenja favorizuje korišćenje kombinacija ispitivanih biomasa sa duvanskom stabljikom u odnosu na sve pojedinačne biomase.

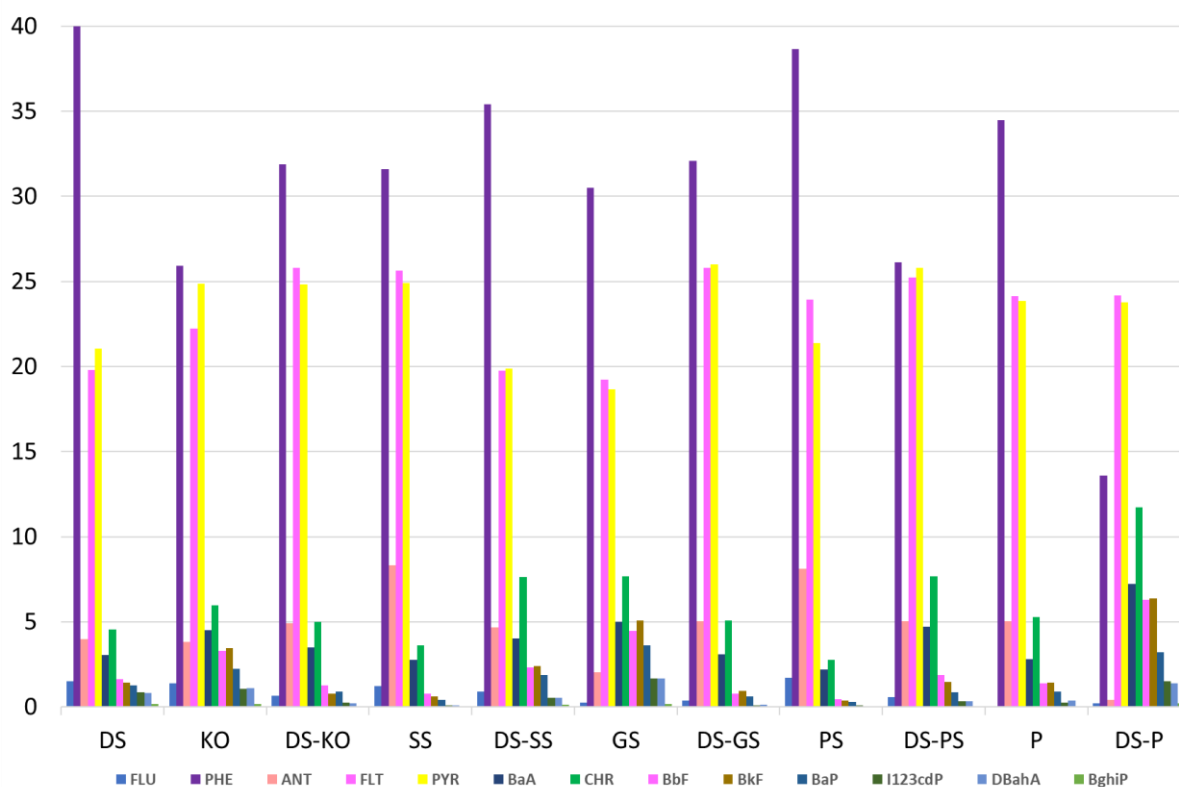
Procentualna zastupljenost pojedinačnih PAH-ova iz grupe 16 PAH jedinjenja u ispitivanim briketima pojedinačnih biomasa i kombinacija pojedinačnih biomasa sa duvanskom stabljikom je data u Tabeli 21, a radi lakše preglednosti zastupljenosti svakog od jedinjenja i jednostavnijeg poređenja među briketima rezultati su prikazani i grafički na Slici 41. Uočljivo je da je raspodela jedinjenja vrlo slična u dimu većine uzoraka. Fenantren je najzastupljenije jedinjenje u dimu nastalom sagorevanjem skoro svakog od briketa i doprinosi u ukupnoj frakciji 16 PAH jedinjenja sa 25,91 – 40,00 %, sem kod smese duvanske stabljike i piljevine drveta bukve gde iznosi 13,58 %, a zastupljeniji od njega su fluoranten i piren.

Kod uzorka briketa duvanske stabljike dominacija fenantrena je izrazita. Nešto drugačiju raspodelu u odnosu na ostale uzorke ima i uzorak briketa od smese duvanske stabljike i piljevine drveta bukve, kod koga su fluoranten i piren najzastupljeniji, a prate ih fenantren i hrizen. Procentualna zastupljenost fluorantena i pirena u ispitivanim uzorcima briketa je 19,24 - 25,80 %, odnosno 18,67 - 25,80 %. Sve ove vrednosti su u skladu sa literaturnim podacima za različite vrste biomasa (Du et al, 2020; Hao et al., 2022).

Tabela 21. Procentualna zastupljenost pojedinačnih PAH jedinjenja u ukupnoj emisiji 16 PAH jedinjenja

Briket PAH	DS	KO	DS-KO	SS	DS-SS	S	DS-GS	PS	DS-PS	P	D-P
FLU	1,50	1,39	0,66	1,22	0,90	0,26	0,36	1,72	0,58	0,00	0,19
PHE	40,00	25,91	31,87	31,61	35,43	30,50	32,10	38,66	26,11	34,46	13,58
ANT	3,98	3,83	4,90	8,30	4,68	2,02	5,01	8,12	5,03	5,05	0,40
FLT	19,78	22,22	25,79	25,65	19,74	19,24	25,80	23,92	25,25	24,13	24,17
PYR	21,04	24,86	24,84	24,89	19,87	18,67	25,99	21,37	25,80	23,86	23,76
BaA	3,03	4,49	3,48	2,78	4,01	5,00	3,10	2,20	4,69	2,82	7,21
CHR	4,55	5,98	4,98	3,61	7,62	7,68	5,08	2,75	7,67	5,29	11,71
BbF	1,65	3,30	1,26	0,78	2,30	4,48	0,77	0,45	1,86	1,40	6,29
BkF	1,41	3,45	0,79	0,62	2,39	5,06	0,92	0,37	1,48	1,43	6,39
BaP	1,24	2,23	0,90	0,41	1,86	3,62	0,62	0,30	0,87	0,90	3,21
Icd123P	0,85	1,07	0,25	0,08	0,52	1,65	0,10	0,08	0,32	0,25	1,51
DBahA	0,83	1,09	0,22	0,07	0,54	1,66	0,11	0,06	0,33	0,36	1,39
BghiP	0,15	0,18	0,06	0,00	0,13	0,17	0,02	0,00	0,00	0,04	0,21

DS - duvanska stabljika, KO - kukuruzni oklasak, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, SS- -sojina stabljika, DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, GS – ostaci glava suncokreta, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, PS –pšenična slama, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, P – piljevina drveta bukve, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, FLU - fluoren, PHE - fenantren, ANT - antracen, FLT - fluoranten, PYR - piren, BaA - benzo(a)antracen, CHR - hrizen, BbF - benzo(b)fluoranten, BkF - benzo(k)fluoren, BaP - benzo(a)piren, I123cdP - indeno(1,2,3-cd)piren, DBahA - dibenzo(ah)antracen, BghiP -benzo(ghi)perilen.

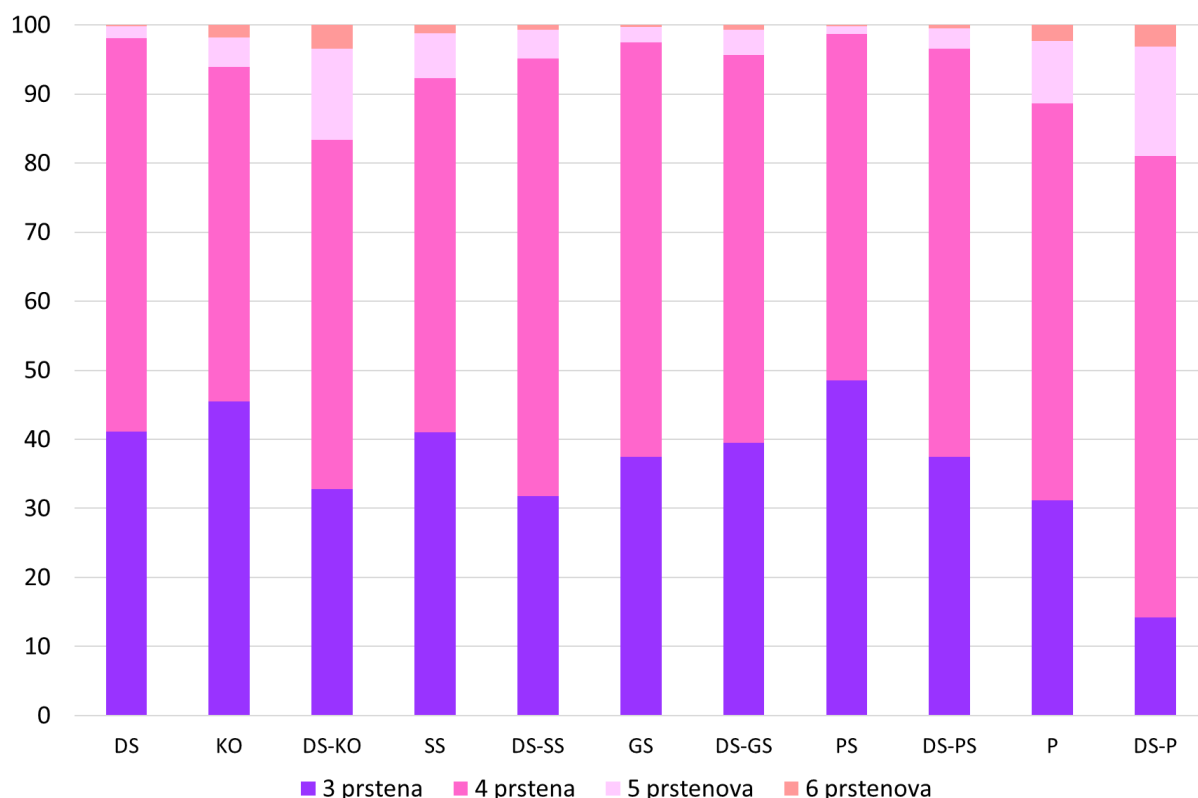


Slika 41. Raspodela pojedinačnih PAH-ova u ispitivanim biomasama.

DS - duvanska stabljika, KO - kukuruzni oklasak, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, SS- -sojina stabljika, DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, GS – ostaci glava suncokreta, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, PS –pšenična slama, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, P – piljevina drveta bukve, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, FLU - fluoren, PHE - fenantren, ANT - antracen, FLT - fluoranten, PYR - piren, BaA - benzo(a)antracen, CHR - hrizen, BbF - benzo(b)fluoranten, BkF - benzo(k)fluoren, BaP - benzo(a)piren, I123cdP - indeno(1,2,3-cd)piren, DBahA - dibenzo(ah)antracen, BghiP -benzo(ghi)perilen.

PAH-ovi mogu biti analizirani i grupisanjem po broju aromatičnih prstenova, te su ovde detektovani PAH-ovi u grupama sa 3, 4, 5 i 6 aromatičnih prstenova. Slika 42 predstavlja relativni procenat PAH-ova sa tri (fluoren, fenantren, antracen), četiri (fluoranten, piren, benz(a)antracen, hrizen) pet (benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)piren) i 6 prstenova (indeno(123cd)piren, dibenzo(a,h)antracen, benzo(g,h,i)perilen) u njihovoj ukupnoj sumi. Tokom sagorevanja pretežno su formirani PAH-ovi sa tri i četiri aromatična prstena, dok su PAH-ovi sa 5 i 6 prstenova zastupljeni u znatno manjoj meri, najčešće samo u tragovima. Može se zapaziti da se kombinovanjem pojedinačnih biomasa sa duvanom u dimu nastalom njihovim sagorevanjem smanjuje udeo aromatičnih jedinjenja sa tri prstena u svim kombinacijama, sem u kombinaciji duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, gde je raspodela prilično slična i za pojedinačne biomase i za kombinacije.

Pri sagorevanju briketa dobijenih kombinacijom duvana i piljevine, odnosno duvana i oklasaka kukuruza udeo petočlanih i šestočlanih prstenova se povećava u odnosu na pojedinačne biomase. Ovo može biti posledica moguće više temperature sagorevanja mešovityh briketa. Može se pretpostaviti da je ovo posledica više sinergijskih efekata između komponenti, koji promovišu formiranje kompleksnijih struktura, uključujući i višečlane prstenove (Zhou et al., 2014, Engamba Easo et al, 2022).



Slika 42. Raspodela PAH jedinjenja na osnovu broju prstenova.

DS - duvanska stabljika, KO - kukuruzni oklasak, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, SS- -sojina stabljika, DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, GS – ostaci glava suncokreta, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, PS –pšenična slama, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, P – piljevina drveta bukve, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve.

PAH emisija iz različitih izvora može značajno da varira u zavisnosti od uslova pod kojim nastaju ova jedinjenja i to je omogućilo primenu tzv. “PAH dijagnostičkih odnosa” – odnosa dva ili više parova PAH jedinjenja. PAH dijagnostički odnosi se često koriste u identifikaciji PAH izvora (Yunker et al., 2002). Iako su u ovom slučaju PAH izvori apsolutno poznati, ipak su izračunati najčešće korišćeni (Tabela 22). Izračunate vrednosti parametara su potvrdile vrednosti karakteristične za sagorevanje biomase. Ovde je izračunat i noviji PAH odnos, poznat kao TI. Ovaj PAH indeks ima vrednosti veće od 4 kod visoko-temperaturnih procesa, dok je manji od 4 kod nisko-temperaturnih procesa (Barreca et al., 2014), pa je i on izdvojio brikete od oklasaka kukuruza i mešavine oklasaka kukuruza sa duvanskom stabljikom s obzirom da su vrednosti ovog indeksa za ove dve vrste briketa manje od 4. Na osnovu ovoga bi se moglo pretpostaviti da se sagorevanje briketa koji sadrže kukuruzni oklasak odvijalo na nižim temperaturama, pa je to najverovatnije objašnjenje za povišenu emisiju PAH jedinjenja nastalih sagorevanjem ovih briketa u odnosu na emisiju PAH jedinjenja nastalu sagorevanjem ostalih briketa.

Tabela 22. PAH dijagnostički odnosi izračunati za analizirane brikete

Briket Odnos	DS	KO	DS-KO	PS	DS-PS	GS	DS-GS	P	DS-P	SS	DS-SS
LMW/HMW	0,71	0,18	0,52	0,95	0,61	0,61	0,67	0,47	0,86	0,72	0,48
ANT/(ANT+PHE)	0,21	0,03	0,06	0,17	0,13	0,14	0,13	0,13	0,09	0,12	0,16
FLU/(FLU+PYR)	0,51	0,50	0,51	0,53	0,51	0,50	0,50	0,47	0,48	0,50	0,49
BaA/(BaA+CHR)	0,44	0,38	0,39	0,44	0,41	0,38	0,35	0,43	0,40	0,34	0,38
TI	5,53	3,45	3,86	5,28	4,66	4,49	4,27	4,61	4,11	4,14	4,75
BbF/(BbF+BkF)	0,56	0,50	0,47	0,55	0,61	0,46	0,49	0,49	0,54	0,49	0,56

DS - duvanska stabljika, KO - kukuruzni oklasak, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, SS- -sojina stabljika, DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika,GS – ostaci glava suncokreta, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta,PS –pšenična slama, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama,P – piljevina drveta bukve, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve, LMW – PAH-ovi sa 2 i 3 prstena (Low Molecular Weight), HMW – PAH-ovi sa 4, 5 i 6 prstenova (High Molecular Weight), FLU - fluoren, PHE - fenantren, ANT - antracen, FLT - fluoranten, PYR - piren, BaA - benzo(a)antracen, CHR - hrizen, BbF - benzo(b)fluoranten, BkF - benzo(k)fluoren, BaP - benzo(a)piren, I123cdP - indeno(1,2,3-cd)piren, DBahA - dibenzo(ah)antracen, BghiP -benzo(ghi)perilen, TI (Total Index) = FLU/(FLU+PYR)/0,4+ANT/(PHE+ANT)/0,1+BaA/(BaA+CHR)/0,2

9.4. Sastav pepela nakon sagorevanja briketa

Iako je poželjno da sadržaj pepela bude što manji, zbog prirode materijala, njegovo prisustvo se ne može izbjeći a njegova dalja upotreba, u skladu sa obrascima cirkularne ekonomije, je potencijalno moguća, u zavisnosti od njegovog sastava.

Detaljnija analiza pepela, obuhvatala je određivanje količine mikro- i makro- elemenata i teških metala u pepelu. Rezultati su prikazani u Tabeli 23.

Tabela 23. Količina mikro-, makro- elemenata i teških metala u pepelu briketa

Briket Parametar	DS-SS	DS-PS	DS-GS	DS-KO	DS-P
K, %	3,62	12,67	7,02	8,14	5,70
Ca, %	6,82	9,46	6,06	5,94	9,70
Mg, %	3,18	7,20	3,06	2,91	3,76
P, %	0,72	0,89	0,64	0,53	1,58
Fe, mg/kg	10,14	5,97	4,18	7,08	3,06
Mn, mg/kg	413,10	447,16	280,10	201,92	213,68
Zn, mg/kg	171,82	123,90	102,18	118,94	209,16
Cu, mg/kg	97,70	93,18	80,27	101,22	138,16
Pb, mg/kg	21,12	39,28	8,48	7,87	14,92
Cd, mg/kg	3,17	0,61	0,60	0,92	0,73
Hg, mg/kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
As, mg/kg	0,27	0,64	0,39	0,51	0,66
Ni, mg/kg	36,67	21,13	17,82	43,31	24,38
Cr, mg/kg	27,54	23,18	19,00	35,15	15,06
Co, mg/kg	8,89	4,18	3,67	6,92	2,40

DS-SS-duvanska stabljika-sojina stabljika, DS-PS –duvanska stabljika-pšenična slama, DS-GS – duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, DS-KO –duvanska stabljika-kukuruzni oklasak, DS-P – duvanska stabljika-piljevina drveta bukve

Merenje procenta makroelemenata u pepelu, nakon sagorevanja biomase, daje vredne informacije o potencijalu pepela kao đubriva za zemljište. Pepeo proizveden tokom sagorevanja sadrži značajnu količinu makroelemenata, koji mogu da obezbede vredne promene u sastavu zemljišta, a koje mogu pomoći u poboljšanju plodnosti zemljišta i prinosa useva. Analiza sadržaja makroelemenata u pepelu je značajna, jer veći sadržaj daje pepelu ulogu u đubrenju. Ovaj podatak je važan za ratare i farmere, jer ako znaju potencijal određene vrste biomase, mogu i da je upotrebe u skladu sa potrebama (Obernberger and Thek, 2010).

S druge strane, sadržaj pomenutih elemenata ima uticaja na tačke topljenja pepela i stvaranja naslaga u kotlovima tokom sagorevanja. Tako npr. veći sadržaj kalcijuma i magnezijuma uticaće na povećanje tačke topljenja pepela. Sadržaj kalijuma ima suprotan efekat, tj. veći sadržaj kalijuma dovede do niže tačke topljenja pepela. Niska tačka topljenja i veći sadržaj fosfora, dovode do stvaranja naslaga u kotlu.

Utvrđeni sadržaj **K** u pepelu ispitivanih briketa je između 3,62 % (u mešavini duvanska stabljika-sojina stabljika) i 12,67 % (mešavina duvanska stabljika-pšenična slama).

Bošnjak i sar. (2022) navode da sadržaj **K** u pepelu poljoprivredne biomase može iznositi od 1,9 % do čak 53 %, dok je kod pepela pšenične slame sadržaj **K** 6,9 %. Rezultati detektovani za potrebe ove disertacije u skladu su, kako sa istraživanjem Bošnjaka i sar. (2022), tako i sa istraživanjem Obernberger and Thek (2010), koji su u svom istraživanju naveli da je sadržaj **K** kod pepela pšenične slame u opsegu 10-16 %.

Prema literaturnim podacima (Obernberger and Supančić, 2009; Bošnjak i sar., 2022), sadržaj **Ca** u pepelu koji zaostaje sagorevanjem poljoprivredne biomase, kretao se u opsegu 0,7-31,7 %. Najviši sadržaj **Ca** pronađen je u briketima napravljenih od mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve (9,70 %), a vrlo bliska vrednost detektovana je i kod mešavine duvanska stabljika-pšenična slama (9,46 %). Najniži sadržaj **Ca** utvrđen je kod briketa nastalih mešanjem duvanska stabljika-oklasak kukuruza (5,94 %), kao i kod briketa od duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (6,06 %).

Dobijeni rezultati u saglasnosti su sa podacima drugih istraživača, pa su tako Bošnjak i sar. (2022) detektovali sadržaj **Ca** od 4,2 % u pepelu koji se stvara nakon sagorevanja pšenične slame, dok je kod sena (osušene trave) taj sadržaj iznosio 6,6 %. Prema istraživanju Obernbergera and Theka (2010), sadržaj **Ca** u pepelu pšenične slame iznosi 4,5-8 %.

Sadržaj **Mg** u pepelu uzoraka briketa bio je u opsegu 2,91-7,20 %. Slično sadržaju **Ca**, najniži sadržaj **Mg** bio je kod pepela briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-oklasak kukuruza (2,91%), dok su i vrednosti kod mešavina duvanska stabljika-ostaci glave suncokreta (3,06 %) i duvanska stabljika-sojina stabljika (3,18 %) istog reda veličine. Za razliku od njih, pepeo briketa napravljenih kombinacijom duvanska stabljika-pšenična slama imao je dosta viši sadržaj **Mg** (7,20 %) u odnosu na pepeo ostalih briketa, što je slično kao i kod sadržaja **K**.

Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa istraživanjem Bošnjaka i sar. (2022), gde je sadržaj **Mg** kod pepela poljoprivredne biomase u opsegu 0,11-9,8 %, dok Obernberger and Thek (2010) navode nešto niže podatke za sadržaj **Mg** u pepelu pšenične slame, u opsegu 1,1-2,7 %.

Sadržaj **P** iznosio je od 0,53 % kod pepela briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-oklasak kukuruza, do 1,58 % kod pepela briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve.

Pepeo zaostao nakon sagorevanja poljoprivredne biomase, prema Bošnjak i sar. (2022), ima sadržaj **P** od 0,24 % do 13,6 %. Za pšeničnu slamu, ta vrednost je 1,01 %. Drugi autori (Obernberger and Thek, 2010) navode sadržaj **P** u pepelu pšenične slame u opsegu 0,2-6,7 %. Rezultati analize pepela ispitivanih uzoraka briketa pokazali su da je sadržaj **P** u pepelu briketa u opsegu 0,53-1,58%, što je u saglasnosti sa navedenim literaturnim podacima.

Mikroelementi su hranljive materije koje su neophodne za život u malim količinama. Oni uključuju vitamine, minerale i elemente u tragovima koji igraju vitalnu ulogu u različitim telesnim funkcijama kao što su metabolizam, rast i funkcija imunog sistema.

Sadržaj **Fe** u pepelu nakon sagorevanja briketa bio je u opsegu 3,06-10,14 mg/kg. Najniži sadržaj **Fe** (3,06 mg/kg) imao je pepeo briketa od mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve. Najviši sadržaj **Fe** (10,14 mg/kg) pronađen je u pepelu briketa nastalih mešavinom duvanska stabljika-sojina stabljika.

Sadržaj **Mn** bio je najviši u pepelu briketa nastalih mešavinom duvanska stabljika-pšenična slama i iznosio je 447,16 mg/kg. Najniži sadržaj Mn nađen je kod pepela briketa nastalih od mešavine duvanska stabljika-oklasak kukuruza, 201,92 mg/kg.

Najviši sadržaj **Zn** detektovan je kod pepela briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-piljevina drveta bukve (209,16 mg/kg), dok je najniži u pepelu mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (102,18 mg/kg).

Sadržaj Zn u pepelu prema standardu EN14961-2, definisan je na ≤ 100 mg/kg, što na prvi pogled ne ispunjava nijedan uzorak briketa. Međutim, ako se u obzir uzme merna nesigurnost, možemo smatrati da su briketi napravljeni mešavinom duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (102,18 mg/kg) u saglasnosti sa zahtevima ovog standarda.

Sadržaj **Cu** bio je u opsegu 80,27-138,16 mg/kg. Najviši sadržaj Cu utvrđen je kod pepela briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-piljevina drveta bukve (138,16 mg/kg), čiji pepeo je imao i najviši sadržaj Zn, a istovremeno i najniži sadržaj Fe. Slično sadržaju Zn, najniži sadržaj Cu je u pepelu mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta i iznosio je 80,27 mg/kg.

Merenje procenta teških metala u pepelu nakon sagorevanja čvrste biomase je važan podatak jer ukazuje na nivo toksičnih zagađivača prisutnih u biomasi. Teški metali, kao što su olovo, arsen i kadmijum, su štetni po zdravlje ljudi i životnu sredinu, pa su zbog toga granične vrednosti njihovog sadržaja u pepelu propisane Standardom EN14961-2 (Obernberger and Thek, 2010).

Najviši sadržaj **Pb** uočen je kod pepela briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-pšenična slama (39,28 mg/kg). Najniži sadržaj Pb detektovan je kod pepela briketa nastalih mešavinom duvanska stabljika-oklasak kukuruza (7,87 mg/kg). Briketi napravljeni mešavinom duvanska stabljika-oklasak kukuruza i duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta ispunili su zahteve Standarda EN14961-2 (Obernberger and Thek, 2010) u pogledu sadržaja Pb u pepelu (≤ 10 mg/kg).

Sadržaj **Cd** u pepelu ispitivanih briketa bio je u opsegu 0,60-3,17 mg/kg. Detektovani sadržaj Cd u pepelu briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika iznosio je 3,17 mg/kg. Pepeo svih ostalih uzoraka briketa imao je sadržaj Cd ispod 1 mg/kg, i to kod mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta 0,60 mg/kg, mešavine duvanska stabljika-pšenična slama 0,61 mg/kg, kod mešavine duvanska stabljika-piljevina 0,73 mg/kg i kod mešavine duvanska stabljika-oklasak kukuruza 0,92 mg/kg.

Sadržaj Cd u pepelu prema standardu EN14961-2, definisan je na $\leq 0,5$ mg/kg, što ne ispunjava nijedan uzorak briketa. Međutim, slično sadržaju Zn u uzorcima pepela, ako se u obzir uzme merna nesigurnost, briketi napravljeni mešavinom duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (0,60 mg/kg) i duvanska stabljika-pšenična slama (0,61 mg/kg) u saglasnosti su sa zahtevima ovog standarda.

Sadržaj **Hg** kod pepela svih uzoraka bio je manji od 0,02 mg/kg. Ovaj rezultat je u saglasnosti sa standardom EN14961-2, gde je dozvoljena količina žive u pepelu $< 0,1$ mg/kg.

Ispitivanje sadržaja **As** pokazalo je da je najviša koncentracija u uzorku pepela briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-piljevina drveta bukve i iznosi 0,66 mg/kg. Blisku vrednost ima i pepeo briketa nastalih mešavinom duvanska stabljika-pšenična slama, 0,64 mg/kg. Najniža vrednost As uočena je kod pepela mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika (0,27 mg/kg). Svi ispitivani uzorci pepela zadovoljavaju zahteve standarda EN14961-2, po kome je dozvoljeni sadržaj As u pepelu ≤ 1 mg/kg.

Sadržaj **Ni** u pepelu briketa iznosio je od 17,82 mg/kg kod pepela briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta, do 43,31 mg/kg, kod pepela mešavine

duvanska stabljika-oklasak kukuruza. Nijedan od ispitivanih uzoraka pepela ne ispunjava zahteve standarda EN14961-2 (sadržaj Ni u pepelu ≤ 10 mg/kg).

Kod ispitivanih uzoraka pepela detektovani sadržaj Cr bio je u opsegu 15,06-35,15 mg/kg. Najviša vrednost Cr uočena je kod briketa napravljenih od mešavine duvanska stabljika-oklasak kukuruza (35,15 mg/kg), dok je najniža vrednost (15,06 mg/kg) kod briketa nastalih mešavinom duvanska stabljika-piljevina drveta bukve. Ovakvi rezultati uzoraka pepela ne ispunjavaju zahteve standarda EN14961-2 (sadržaj Cr u pepelu ≤ 10 mg/kg).

Najniži sadržaj Co, bio je kod pepela briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-piljevina drveta bukve (2,40 mg/kg), dok je najviši sadržaj (8,89 mg/kg) uočen kod pepela briketa napravljenih mešavinom duvanska stabljika-sojina stabljika.

Na Slici 43. prikazan je izgled pepela nakon sagorevanja ispitivanih briketa.



Slika 43. Izgled pepela nakon sagorevanja ispitivanih briketa.

Sagorevanje briketa i analiza nastalog pepela pokazala je da je dobijeni pepeo kvalitetan u pogledu mikro- i makroelemenata. Sa aspekta poljoprivredne proizvodnje postignut je prihvatljiv sadržaj osnovnih makronutrijenata (kalijum, kalcijum, fosfor, magnezijum) u pepelu. Ipak, pepeo gotovo svih ispitivanih briketa ne ispunjava kriterijume standarda EN14961-2 u pogledu sadržaja teških metala. S obzirom da se ovaj standard odnosi na pelet proizveden od drveta, a da su ispitivani uzorci briketi od poljoprivredne biomase, ne ispunjavanje kriterijuma standardna kao ograničavajući faktor za dalje korišćenje pepela trebalo bi uzeti sa rezervom.

U prilog tome i činjenica da je, u maju 2014., Evropski konzorcijum industrije organskih đubriva (ECOFI 2014) predložio je kriterijume za definisanje bezbednosti organskih đubriva. Maksimalne dozvoljene količine nekih teških metala u kompostu su: Cd - 3 mg/kg; Pb - 120 mg/kg; Cu - 200 mg/kg; Zn - 600 mg/kg; Hg - 2 mg/kg. Ako uzmemo u obzir dozvoljeni sadržaj teških metala u zemljištu, u našoj zemlji on je definisan Pravilnikom o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu (Sl. Glasnik RS 23/94): za As do 25 mg/kg, za Cd do 3 mg/kg, za Pb do 100 mg/kg, za Hg do 2 mg/kg, za Zn do 300 mg/kg i za Cr do 100 mg/kg. Rezultati dobijeni za potrebe ove disertacije pokazuju da bi sastav pepela nakon sagorevanja ispunio zahteve ovog

kriterijuma kod svih uzoraka, čak i u pogledu sadržaja Cd kod mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika, ako se uzme u obzir merna nesigurnost. Međutim, ukoliko bi se pepeo koristio kao dopuna osnovnom đubrivu, sadržaj Cd bi se mešanjem dodatno smanjio.

Dakle, iako sadržaj pepela svih ispitivanih briketa ne ispunjava sve standardne kriterijuma EN14961-2, ovo ne predstavlja prepreku korišćenju pepela, koji bi se koristio kao dopuna osnovnom đubrivu, jer u tom slučaju ispunjava kriterijume o bezbednosti organskih đubriva (ECOFI, 2014). Osim toga, ne bi doprineo ni povećanju sadržaja teških metala u zemljištu preko vrednosti koje su propisane Pravilnikom o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu (Sl. Glasnik RS 23/94). Na osnovu ovih kriterijuma, svi dobijeni uzorci pepela mogli bi se koristiti.

9.5. Statistička obrada podataka

Rezultati statističke značajnosti u sadržaju pepela, toplotne moći i elementarnog sastava prikazani su u Tabeli 24.

Tabela 24. Srednji sadržaj pepela, toplotna moć i elementarni sastav različitih tipova briketiranih biomasa sa standardnom devijacijom (\pm SD)

Briket	Parametar	Pepeo (%)***	Donja toplotna moć (MJ/kg)**	Elementarni sastav				
				C***	H**	N**	S*	O**
				%				
DS-KO		3,66 \pm 0,04	16,47 \pm 0,04	44,69 \pm 0,05	5,81 \pm 0,07	2,66 \pm 0,03	Trag	46,84 \pm 0,09
DS-P		2,31 \pm 0,04	17,28 \pm 0,04	44,90 \pm 0,05	4,57 \pm 0,05	2,52 \pm 0,02	Trag	48,01 \pm 0,08
DS-GS		7,73 \pm 0,08	15,75 \pm 0,08	46,06 \pm 0,06	5,77 \pm 0,06	0,93 \pm 0,02	0,7 \pm 0,02	46,54 \pm 0,07
DS-SS		4,13 \pm 0,05	15,96 \pm 0,04	44,23 \pm 0,03	5,42 \pm 0,06	2,41 \pm 0,04	Trag	47,94 \pm 0,05
DS-PS		6,20 \pm 0,07	15,49 \pm 0,07	47,63 \pm 0,05	5,74 \pm 0,02	1,55 \pm 0,03	Trag	45,08 \pm 0,04

Srednja razlika je značajna na nivou od 0,05: *** između svih uzoraka; ** između više od 5 uzoraka; * između 5 ili manje uzoraka.

DS- Duvanska stabljika, DS-PS- duvanska stabljika-pšenična slama, DS-SS-Duvanska stabljika-sojina slama, DS-KO-Duvanska stabljika-oklasak kukuruza, DS-P- duvanska stabljika-piljevina

Uočljivo je da rezultati koji se odnose na određivanje količine pepela, donje toplotne moći i elementarnog sastava, prikazani u Tabeli 24, imaju jaku centralnu tendenciju (datu u obliku srednje vrednosti) i malo rasipanje, varijabilnost (dato u obliku standardne devijacije).

Zavisnost ispitivanih parametara iz Tabele 24 određena je Pirsonovim koeficijentom korelacije sa nivoom značajnosti od 1% i 5%. Dobijeni rezultati prikazani su u Tabeli 25. U Tabeli su prikazane samo one vrednosti kod kojih je utvrđena korelacija.

Tabela 25. Pirsonov koeficijent korelacije za donju toplotnu moć u odnosu na sadržaj pepela i elemenata u briketima

Donja toplotna moć	DS-KO	DS-P	DS-GS	DS-SS	DS-PS
Komponente					
Pepeo (DS-KO)	-0,997*	-	-	-	-
Ugljenik (DS-KO)	-	-	-	-	-
Vodonik (DS-KO)	1,000**	-	-	-	-
Kiseonik (DS-KO)	-1,000*	-	-	-	-
Ugljenik (DS-P)	-	-	-	-	-
Vodonik (DS-P)	-	0,999*	-	-	-
Kiseonik (DS-P)	-	-	-	-	-
Ugljenik (DS-GS)	-	-	0,999*	-	-
Vodonik (DS-GS)	-	-	0,999*	-	-
Kiseonik (DS-GS)	-	-	-1,000**	-	-
Pepeo (DS-SS)	-	-	-	-1,000*	-
Vodonik (DS-PS)	-	-	-	-	0,999*
Azot (DS-PS)	-	-	-	-	-0,999*

*p<0.05; **p <0.01

DS- Duvanska stabljika, DS- PS- duvanska stabljika-pšenična slama, DS- SS-Duvanska stabljika-sojina slama, DS- KO-Duvanska stabljika-oklasak kukuruza, DS -P- duvanska stabljika-piljevina

Na osnovu vrednosti korelacija, prikazanih u Tabeli 25 uočljivo je da postoji jaka negativna korelacija toplotne moći sa sadržajem kiseonika, azota i pepela. Istovremeno, uočljiva je i jaka pozitivna korelacija između toplotne moći i sadržaja ugljenika i vodonika.

Vrednosti Pirsonovog koeficijenta ukazuju na to da toplotna moć može biti računata kao upravo srazmerna količini ugljenika i vodonika i obrnuto srazmerna količini pepela, kiseonika i azota, što je u skladu sa odgovarajućim formulama iz Tabele 9. To naravno ne garantuje i stvarnu linearnu zavisnost između pomenutih veličina, već potvrđuje korelaciju (Popović i Vukadinović, 2008).

Rezultati koji se odnose na sadržaj dimnih gasova, prikazani u Tabeli 26, imaju jaku centralnu tendenciju (datu u obliku srednje vrednosti) i malo rasipanje, varijabilnost (datu u obliku standardne devijacije).

Tabela 26. Srednja vrednost sadržaja dimnih gasova tokom sagorevanja briketa sa standardnom devijacijom (\pm SD)

Parametar Briket	O ₂ (%) **	CO ₂ (%) ***	CO (mg/m ³) ***	NO (mg/m ³) **	NO _x (mg/m ³) ***
DS	12,88 \pm 0,04	8,10 \pm 0,04	1590,34 \pm 0,06	273,67 \pm 0,03	419,67 \pm 0,04
DS-KO	11,02 \pm 0,06	10,10 \pm 0,05	2592,67 \pm 0,05	244,67 \pm 0,06	374,67 \pm 0,04
DS-P	12,95 \pm 0,07	7,44 \pm 0,03	1562,00 \pm 0,06	203,00 \pm 0,06	311,67 \pm 0,05
DS-GS	14,31 \pm 0,06	6,40 \pm 0,06	2261,34 \pm 0,04	233,34 \pm 0,04	351,67 \pm 0,04
DS-SS	10,98 \pm 0,06	9,74 \pm 0,04	2035,00 \pm 0,50	267,67 \pm 0,05	410,00 \pm 0,06
DS-PS	11,05 \pm 0,06	9,97 \pm 0,05	3115,00 \pm 0,04	202,00 \pm 0,04	309,34 \pm 0,06

Srednja razlika je značajna na nivou od 0,05: *** između svih uzoraka; ** između više od 5 uzoraka; * između 5 ili manje uzoraka. DS- Duvanska stabljika, DS-PS- duvanska stabljika-pšenična slama, DS-SS-Duvanska stabljika-sojina slama, DS-KO-Duvanska stabljika-oklasak kukuruza, DS-P- duvanska stabljika-piljevina

10. ZAKLJUČAK

Eksperiment je pitanje koje nauka postavlja prirodi,

a merenje je snimanje odgovora prirode.

Max Planck

Na osnovu sprovedenih istraživanja i na osnovu izvršene analize izmerenih vrednosti donose se sledeći zaključci:

- Moguća je upotreba žetvenih ostataka pet ratarskih vrsta i jedne drvenaste vrste i njihovih mešavina za proizvodnju briketa, a bez dodavanja vezivnog sredstva.
- Izmereni sadržaj vlage u briketima ima vrednosti od 9,44 % (mešavina stabljika duvana-piljevina drveta bukve) do vrednosti 10,85 % (mešavina stabljika duvana-ostaci glava suncokreta). Sa aspekta vlage svi uzorci briketa zadovoljavaju uslove nemačkog standarda DIN 51 731:1996 (<12%) i austrijskog standarda ONORM M 1735:1990 (<18%).
- Sadržaj pepela izmeren kod svih uzoraka briketa manji je od 10%, što žetvene ostatke čini pogodnim energentima na bazi biomase, prema zahtevima standarda ISO 17225-1:2014.
- Sadržaj celuloze u briketima ima vrednosti od 32,09 % (mešavina stabljika duvana-ostaci glava suncokreta) do vrednosti 40,97 % (mešavina stabljika duvana-piljevine drveta bukve).
- Sadržaj lignina u briketima ima vrednosti od 17,09 % (mešavina stabljika duvana -ostaci glava suncokreta) do vrednosti 39,51 % (mešavina stabljika duvana-sojina stabljika).
- Hemijska analiza ispitivanih briketa (nizak sadržaj vlage i pepela, visok sadržaj ligno-celuloznog materijala) daje mogućnost korišćenja žetvenih ostataka kao biogoriva.
- Elementarna analiza ispitivanih uzoraka briketa pokazala je da je sadržaj ugljenika u briketima od 42,23 % (mešavina duvanska stabljika-sojina stabljika) do 47,63 % (mešavina duvanska stabljika-pšenična slama). Sadržaj vodonika u uzorcima biomase se neznatno razlikuje (4,57-5,77%). Sadržaj azota u briketima ima vrednost od 2,93% (mešavina duvanska stabljika-ostaci glave suncokreta) do 2,66% (mešavina stabljike duvana-kukuruzni oklasak). Sadržaj sumpora detektovan je jedino u briketima napravljenih od mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta (0,70%).
- Analiza elementarnog sastava pokazala je da sagorevanje ispitivanih briketa od biomase ekološki prihvatljivije od sagorevanja fosilnih goriva. Sadržaj ugljenika u ispitivanim briketima niži je u poređenju sa fosilnim gorivima, dok je sadržaj vodonika i azota istog reda veličine, kao kod fosilnih goriva. Ipak, glavna prednost u korišćenju briketa od biomase u odnosu na fosilna goriva je vrlo nizak sadržaj sumpora.
- Proračun toplotne moći preko formula za elementarni sastav, sadržaj pepela i lignina pokazuje da ispitivani briketi imaju dobre energetske karakteristike i moguće ih je koristiti kao biogorivo. Eksperimentalno određivanje toplotne moći potvrdilo je navedenu tvrdnju. Izmerena vrednost donje toplotne moći je od 15,49 MJ/kg (mešavina duvanska stabljika-pšenična slama) do 17,28 MJ/kg (mešavina duvanska stabljika-piljevina drveta bukve). Vrednost gornje toplotne moći je od 15,07 MJ/kg (mešavina duvanska stabljika-kukuruzni oklasak) do 18,20 MJ/kg (mešavina duvanska stabljika-kukuruzni oklasak).

- U kontekstu zadovoljenja zahteva standarda (ISO 17225-2:2021) da minimalna toplotna moć goriva klase B za komercijalnu upotrebu bude 16,0 MJ/kg, dokazano je da se svi ispitivani briketi mogu koristiti za lične potrebe stanovnika, ali da za komercijalnu primenu nije tako. Ovaj kriterijum ispunjavaju samo briketi na bazi biomase od mešavine stabljika duvana i oklasa kukuruza (16,47 MJ/kg), kao i briketi na bazi biomase od mešavine duvanske stabljike i piljevine drveta bukve (17,28 MJ/kg).
- U odnosu na ugalj, ispitivani briketi imaju bolji elementarni sastav i bolji sastav produkata sagorevanja. Za razliku od emisije NO₂ i SO₂, koji nastaju sagorevanjem uglja, ovi gasovi nisu pronađeni sagorevanjem briketa od biomase.
- Prema izmerenom sadržaju gasova sagorevanja CO, NO, NO_x najbolja je mešavina duvanska stabljika-piljevina drveta bukve. Ali prema produkciji CO₂ najbolja je mešavina duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta.
- Sadržaj nikotina u briketima iznosio je od 484,6 mg/kg (za brikete na bazi biomase od mešavine stabljika duvana i pšenične slame) do 535,5 mg/kg za brikete od mešavine duvanska stabljika-sojina stabljika.
- Sadržaj nikotina u dimu je kod svih ispitivanih uzoraka je niži od 10 mg/kg, što zadovoljava kriterijume Evropske unije.
- Kombinovanje biomase duvanske stabljike sa ostalim vrstama biomase dovodi do smanjenja emisije štetnih PAH jedinjenja pri njihovom sagorevanju u odnosu na emisiju pri sagorevanju pojedinačnih biomasa.
- Na osnovu sadržaja makro- i mikro- elemenata u pepelu moguće je koristiti ga kao dopunu osnovnom đubrivu.
- Pepeo gotovo svih ispitivanih briketa ne ispunjava kriterijume standarda EN14961-2 u pogledu sadržaja teških metala. Prema sadržaju Cd, briketi mešavine duvanska stabljika-ostaci glava suncokreta i duvanska stabljika-pšenična slama ispunjavaju kriterijum standarda EN14961-2. U pogledu Zn, isti standard zadovoljava jedino mešavina duvanska stabljika-oklasak kukuruza. Ipak, ovo ne predstavlja prepreku korišćenju pepela, ako bi se koristio kao dopuna osnovnom đubrivu, jer u tom slučaju ispunjava kriterijume o bezbednosti organskih đubriva, a ne bi doprineo ni povećanju sadržaja teških metala u zemljištu preko vrednosti koje su propisane Pravilnikom o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu
- Količina pepela, elementarni sastav, donja toplotna moć i produkti sagorevanja imaju jaku centralnu tendenciju i malu varijabilnost. Između toplotne moći i ostalih merenih veličina, preko vrednosti Pirsonovog koeficijenta, vidljivo je da je toplotna moć srazmerna količini ugljenika i vodonika i obrnuto srazmerna količini pepela, kiseonika i azota.
- Mešanje stabljika duvana (u odnosu 50:50) sa drugim vrstama biomase poboljšava njihove energetske i ekološke karakteristike.

Ekperimentalni rezultati sprovedeni u okviru istraživanja tokom izrade ove doktorske disertacije potvrđuju da biomasa od žetvenih ostataka pri proizvodnji duvana, trenutno klasifikovana u kategoriju opasnog otpada, prelazi u klasu bezbednog otpada, odnosno, kada se pomeša sa drugim žetvenim ostacima, može se koristiti kao komercijalni proizvod – biogorivo.

U tom kontekstu briketi na bazi biomase od žetvenih ostataka mogu biti jedno od potencijalnih alternativnih rešenja, što su rezultati ovih istraživanja i pokazali.

Ipak, glavni zaključak je, da nijedna od predloženih mešavina briketa ne zadovoljava po svim kriterijumima sve standarde. Ali, ovo istraživanje otvorilo je put za neka nova, gde bi se, možda, dobila mešavina koja bi zadovoljila sve predložene kriterijume



“Upotreba biljnog ulja kao goriva danas može izgledati beznačajno.

Ali takvi proizvodi mogu vremenom postati jednako važni

kao kerozin i ovi današnji proizvodi na bazi uglja.”

Rudolf Diesel

Literatura

Anwar, Z., Gulfraz, M., Irshad, M. (2014): Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 7: 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>

Badger, P.C. (1999): Solid Fuels. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, (V), Energy & Biomass Engineering, ASAE, eds. Kitani, O., pp. 248-288. <https://doi.org/10.13031/2013.36421>

Banković, S., Medarević, M., Pantić, D., Petrović, N., Šljukić, B., Obradović, S. (2009): Šumski fond Republike Srbije - stanje i problemi. *Glasnik Šumarskog fakulteta* 100, 7-29. <https://doi.org/10.2298/GSF0900007B>

Bao, K., Zaccone, C., Tao, Y., Wang, J., Shen, J., and Zhang, Y. (2020): Source Apportionment of Priority PAHs in 11 lake Sediment Cores from Songnen Plain, Northeast China. *Water Res.* 168, 115158. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115158>

Bareschino, P., Marrasso, E., Roselli, C. (2021): Tobacco stalks as a sustainable energy source in civil sector: Assessment of techno-economic and environmental potential. *Renewable Energy* 175, 373–390. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.04.101>

Barjaktarević, D.A. (2018): Usklađivanje propisa Republike Srbije sa propisima Evropske Unije u oblasti energetike i zaštite životne sredine. Doktorska disertacija. Pravni fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Barreca, S., Bastone, S., Caponetti, E., Chillura Martino, D.F., Orecchio, S. (2014): Determination of selected polyaromatic hydrocarbons by gas chromatography-mass spectrometry for the analysis of wood to establish the cause of sinking of an old vessel (Scauri wreck) by fire. *Microchem. J.* 117, 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2014.06.020>

Berbeć, A.K., Matyka, M. (2020): Biomass Characteristics and Energy Yields of Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) Cultivated in Eastern Poland. *Agriculture* 10 (11), 551. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10110551>

Berndes, G., Hoogwijk, M., Van Den Broek, R. (2003): The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy* 25 (1), 1–28. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00185-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00185-X)

Blazquez, G., Calero, M., Ronda, A., Tenorio, G., Martin-Lara, M.A. (2014): Study of kinetics in the biosorption of lead onto native and chemically treated olive stone. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 20 (5), 2754-2760. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.11.003>

Bošnjak, K., Vranić, M., Mašek, T. i Brčić, M. (2022). Application of Biomass Ash on Grasslands. *Poljoprivreda* 28 (1), 85-94. <https://doi.org/10.18047/poljo.28.1.12>

Brkić, M., Alimpić, M., Đukić, Đ.S. (1979): Neke mogućnosti korišćenja nekonvencionalnih izvora energije u poljoprivredi i prehrambenoj industriji. Zbornik radova sa VI savetovanja stručnjaka poljoprivredne tehnike Vojvodine, Dubrovnik: Vojvođansko društvo za poljoprivrednu tehniku, 573-584.

Brkić, M., Babić, M., Somer, D. (1995): Alternativni izvori energije u poljoprivredi i zaštita životne sredine, Zbornik radova sa savetovanja EKO-Ek 95: „Bioenergetska reprodukcija u poljoprivredi” (Biomasa), IP „Mladost”, Ekološki pokret, Beograd, 151-161.

Brkić, M., Janić, T. (2000): Biomasa kao izvor sirovina, đubriva, stočne hrane i energije, Traktori i pogonske mašine, 5(2), 23-28, Novi Sad.

Brkić, M., Tešić, M., Furman, T., Martinov, M., Janić, T. (2007): Potencijali i mogućnosti briketiranja i peletiranja otpadne biomase na teritoriji pokrajine Vojvodine. Studija, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.

Brkić, M., Janić, T. (2008): Briketiranje i peletiranje biomase. Savremena poljoprivredna tehnika, Savremena poljoprivredna tehnika 34 (1-2), 78-86. UDK: 662.8:620.95

Brkić, M. (2012): Određivanje potrebne količine sojine slame za zagrevanje blok plastenika. Savremeni povrtar 42, 10-11

Cai, J., Li, B., Chen, C., Wang, J., Zhao, M., Zhang, K. (2016): Hydrothermal carbonization of tobacco stalk for fuel application. Bioresource Technology 220, 305–311. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.08.098>

Casler, M.D., Boe, A.R. (2003): Cultivar environment interactions in switchgrass. Crop Science 43, 2226–33. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.2226>

Castro-Guijarro, P.A., Álvarez-Vázquez, E.R., Fernández-Espinosa, A.J. (2021): A rapid Soxhlet and mini-SPE method for analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particles. Anal. Bioanal. Chem. 413, 2195-2206. <https://doi.org/10.1007/s00216-021-03188-9>

CEI - Central European Initiative (2013): A country-based consultation for the growth of local economies by producing advanced bio-fuels and by rural innovation, Meeting - The Republic of Serbia, Belgrade.

Chen, H., Lin, G., Chen, Y., Chen, W., Yang, H. (2016): Biomass Pyrolytic Polygeneration of Tobacco Waste: Product Characteristics and Nitrogen Transformation. Energy and Fuels 30(3), 1579–1588. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.5B02255>

Chen Y., Zhi G., Feng Y., Tian C., Bi X., Li J., Zhang G. (2015): Increase in polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions due to briquetting: A challenge to the coal briquetting policy. Environmental Pollution 204, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.012>

Chumsawat, L., Tippayawong, N. (2020): Utilizing Tobacco Residues to Generate Bio-oil and Biochar via Ablative Pyrolysis. Chemical Engineering Transactions 78, 49–54. <https://doi.org/10.3303/CET2078009>

Chun-Yang, Y. (2011): Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. Fuel 90 (3), 1128-1132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031>

Cvetković, O., Pivić, R., Dinić, Z., Maksimović, J., Trifunović, S., Dželetović, Ž. (2016): Hemijska ispitivanja mskantusa gajenog u Srbiji-Potencijalni obnovljiv izvor energije. Zastita Materijala 57(3), 412–417. <https://doi.org/10.5937/ZasMat1603412C>

Ćojbašić, Lj., Stefanović, G., Stojiljković, M. (2011): Zbirka zadataka iz tehničkih materijala, Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu.

Demirbas A. (1997): Calculation of higher heating values of biomass fuels 76(5), 431–434. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)85520-2)

Demirbas, A. (2001): Relationships between lignin contents and heating values of biomass. Energy Conversion & Management 42, 183-188. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00050-9)

Demirbas, A. (2005): Fuel and combustion properties of bio-wastes. Energy Sources 27, 451-462. <https://doi:10.1080/00908310490441863>

Demirbas, M.F., Balat, M., Balat, H. (2009): Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. Energy Conversion and Management 50, 1746-1760. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.013>.

Demirel, Y. (2012): Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation and Coupling. London, Heidelberg, New York, Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2372-9>

Directive 2018/2066. Pristupljeno: 10. Oktobar, 2021. preko: <https://lexpacency.org/eu/32018R2066/>.

Dolijanović, Ž., Roljević Nikolić, S., Dragičević, V., Mutić, J., Šeremešić, S., Jovović, Z., Popović-Đorđević J. (2022): Mineral composition of soil and the wheat grain in intensive and conservation cropping systems. *Agronomy* 12(6), 1321. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061321>

Dragović, S. (2008): Effect of irrigation on field crops yield under the variable agro-climatic conditions of Serbia. *Agriculture & Forestry* 54 (1-4), 25-40 UDC (UDK) 631.67(497.11)

Du, W., Yun, X., Chen, Y., Zhong, Q., Wang, W., Wang, L., Qi, M., Shen, G., Tao, S. (2020): PAHs Emissions from Residential Biomass Burning in Real-World Cooking Stoves in Rural China. *Environ. Pollut.* 267, 115592. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115592>

Dević, M., Dimitrijević, A., Blažin, D., Blažin, S. (2008): Possibilities of using fruit processing residues as burning material. *Časopis Za Procesnu Tehniku i Energetiku u Poljoprivredi/PTEP* 12(3), 111–114. UDK: 662.637. <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1450-5029/2008/1450-50290803111D.pdf>

Đorđević, M. (1981): Analiza određivanja sadržaja nikotina u duvanu metodom gasne hromatografije. *Duvanski glasnik. Naučno stručno informativni glasnik duvanske privrede*, broj XVII, 22-24, Beograd.

Đorđević, B., Valent, V., Šerbanović, S. (1990): Termodinamika i termotehnika, drugo dopunjeno izdanje. Građevinska knjiga, Beograd.

Đurić, N., Kresović, B., Glamočlija, Đ. (2015): Sistemi konvencionalne i organske proizvodnje ratarskih useva. Monografija. Izdavač PKB Agroekonomik, Beograd.

Đurišić, T., Nakomčić-Smaragdakis, B. (2022): Korišćenje poljoprivredne biomase u energetske svrhe na primeru kogenerativnog postrojenja. *Zbornik Radova Fakulteta Tehničkih Nauka u Novom Sadu* 37(03), 457–460. <https://doi.org/10.24867/16HZ10ĐURISIC>

ECOFI (2014) Responses and proposals for quality and safety criteria for organic fertilizers, organic soil improvers and organo-mineral fertilizers, V8, 27 May 2014.

Engamba Esono, S., B, Xiong, Z., Chaiwat, W., Kamara, M., F., Longfei, X., Xu J., Ebako, J., Jiang, L., Su, S., Hu, S., Wang, Y., Xiang, J. (2022): Review on synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic waste: significance of operating conditions and interaction mechanism. *Biomass and Bioenergy* 159, 106415. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106415>

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2002): European Waste Catalogue and Hazardous Waste List - Valid from 1 January 2002.

European waste catalogue EWC (2010) Pristupljeno: 16. Decembra, 2022, preko: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/351806/Guidance-on-EWCStat-categories-2010.pdf/0e7cd3fc-c05c-47a7-818f-1c2421e55604>

European Commission - Energy. Pristupljeno: 16. Decembra, 2022, preko: https://energy.ec.europa.eu/index_en

Eko pravo - SRDA. Pristupljeno 22. Decembra, 2022, preko: <https://srda.rs/eko-pravo/>

Ećim-Đurić, O., Kreculj, D., Živojinović, D., Vorkapić, M. (2020): Potencijal poljoprivredne biomase u sistemima proizvodnje biogasa u Republici Srbiji. *Zbornik Međunarodne Konferencije o*

Ećim-Đurić, O., Radojičić, V., Mijailović, I., Kulić, G. (2014): Effects of tobacco stalks briquettes combustion on air pollution. Proceedings of the IV International Conference Ecology of Urban Areas, Zrenjanin, Serbia, 9-10 October, pp. 55-62. ISBN: 978-86-7672-237-2, COBISS.SR-ID 290142983. <http://www.tfzr.uns.ac.rs>

Fakinle, B.S., Odekanle, E.L., Ike-Ojukwu, C., Sonibare, O.O., Falowo, O.A., Olubiyo, F.W., Oke, D.O., Aremu, C.O. (2022): Quantification and health impact assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emissions from crop residue combustion *Heliyon* 8 (3), e09113. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09113>

Fetter, P. R., Gassen, M., Hoehne, L., Hoeltz, M., Benitez, L.B., Schneider, R. de C. de S. (2020): Tobacco waste hydrolysate of stem and root of the tobacco plant for biostimulation in rice and corn seed germination. *Ciência Rural* 50(8), 1–9. <https://doi.org/10.1590/0103-8478CR20190932>

Gajić, M., Kojić, M., Karadžić, D., Vasiljević, M., Stanić, M. (1992): Vegetacija Nacionalnog Parka Tara, Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Glamočlija, Đ. (2012): Posebno ratarstvo, žita i zrnene mahunarke. Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Gokcol, C., Dursun, B., Alboyaci, B., Sunan, E. (2009): Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey. *Energy Policy* 37, 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.057>

Gondwe, K.J., Chiotha, S.S., Mkandawire, T., Zhu, X., Painuly, J.L., Tauro, J. (2017): An assessment of crop residues as potential renewable energy source for cement industry in Malawi. *Journal of Energy in Southern Africa* 28(4), 19–31. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2017/V28I4A2921>

Grieco, E., Baldi, G. (2011): Analysis and modelling of wood pyrolysis. *Chemical Engineering Science* 66(4), 650-660, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.018>

Gulić, M., Brkić, Lj., Perunović, P. (1991): Parni kotlovi. Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Gvozdenac, D., Nakomčić – Smaragdakis, B., Gvozdenac – Urošević, B. (2010): Obnovljivi izvori energije, FTN. Univerzitet u Novom Sadu.

Hao, X., Zhao, Q., Shen, X., Cao, X., Feng, S., Li, X., Yao, X., Wang, P., Yao, Z. (2022): Emissions of PAHs from crop residues burning in domestic stoves in rural China. *Frontiers in Environmental Science* 10, 883576, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.883576>

Hunt, J. M. (1996): *Petroleum Geochemistry and Geology*, Second edition. W.H. Freeman, pp 743.

Hussain K., Rahman M., Prakash A., Sarma K.P., Hoque R.R. (2016): Atmospheric bulk deposition of PAHs over Brahmaputra Valley: characteristics and influence of meteorology. *Aerosol and Air Quality Research* 16 (7), 1657-89. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.02.0060>

IBM Corp. Released 2015. IBM SPSS Statistics for Windows. Version 23.0, Armonk, NY, USA: IBM Corp.

Institut za standardizaciju Srbije Pristupljeno 17. Decembar, 2022, preko: https://iss.rs/sr_Cyrl/

IRENA – International Renewable Energy Agency. Pristupljeno: 16. Decembra, 2022, preko: <https://www.irena.org/>

Janić T. (2000): Kinetika sagorevanja balirane pšenične slame. Doktorska disertacija, Poljoprivredni fakultet. Univerzitet u Novom Sadu,

Janić, V., Janić, T., Igić, S., Višacki, V. (2018): Stanje i perspektive potencijala biomase za sagorevanje. *Savremena poljoprivredna tehnika* 44 (2), 45–52.

Jemcević, V., Đukić, D. (2000): *Mikrobiologija* - Vojnoizdavački zavod, Beograd.

Jevtić, M., Ivković, I. (2021): Izveštaj o stanju u poljoprivredi u Republici Srbiji u 2020. godini. Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede, sektor za poljoprivrednu politiku. <http://www.minpolj.gov.rs/download/ZK-2020-I-knjiga.pdf>

Jovanović, B., Parović, M. (2009): Stanje i razvoj biomase u Srbiji. Jefferson Institute, Beograd.

Jull, C. (2007): Recent trends in the law and policy of bioenergy production, promotion and use, Issue 95 of FAO legislative study. Food & Agriculture Org. ISBN 9251058709,9789251058701. https://books.google.com/books/about/Recent_Trends_in_the_Law_and_Policy_of_B.html?id=2cYkkP804qsC

Kanevče, G., Dedinec, A., Dedinec, A. (2016): Optimal usage of biomass for energy purposes toward sustainable development - a case of Macedonia. *Thermal Science* 20(1), 77–91. <https://doi.org/10.2298/TSCI160208057K>

Kastori, R. (1983): *Uloga elemenata u ishrani biljaka*. Matica srpska, Novi Sad.

Katalog otpada (2010): Ministarstvo zaštite životne sredine i prostornog planiranja i Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije.

KeepWarm Europe. Pristupljeno 17. Decembar, 2022, preko: <https://keepwarmeurope.eu/>

Kim O.N.T., Nghiem, L.H., Yin, L.P. (2022): Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons, toxicity and mutagenicity from domestic cooking using sawdust briquettes, wood and kerosene. *Environmental Science and Technology* 36, 833–9. <https://doi.org/10.1021/es011060n>

Kim, G., Hur, J. (2021): Probabilistic modeling of wind energy potential for power grid expansion planning. *Energy* 230, 120831. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120831>

Kis D, Juris T, Sucis B, Sumanovac L, Jakobovis M. (2010): The choice of burners of soybean straw as a biomass source. In Proc. 45th Croatian & 5th International Symposium on Agriculture, Opatija, February 15 – 19, 1254-1258.

Komitov, G., Kehajov, D. (2016): Machines for gathering and utilization of residual biomass from tobacco production. *AgroLife Scientical Journal* 5(1), 110–114. http://www.agrolifejournal.usamv.ro/pdf/vol.V_1/Art15.pdf

Kopčić, N., Vuković Domanovac, M., Kučić, D., Briški, F. (2014): Evaluation of laboratory-scale in-vessel co-composting of tobacco and apple waste. *Waste Management* 34(2), 323–328. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.11.001>

Kulić, G. (2021): Primena stabljika duvana tipa Berlej i procena doprinosa iskorišćenju poljoprivredne biomase u Srbiji. Doktorska disertacija. Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Kulić, G.J., Radojičić, V.B. (2011): Analysis of cellulose content in stalks and leaves of large leaf tobacco. *Journal of Agricultural Sciences* 56(3), 207–215. <https://doi.org/10.2298/JAS1103207K>

Kuthe, N.V, Ingle, P.B., Gore, V.G. (2021): Biomass Briquettes as an Alternative Energy Source Compare to Wood Charcoal In Boilers. *International Journal of Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering* 5 (4), 16–40. ISSN:2457-0435. www.ijssrmmme.com

Lai, Y.-L., Chang, Y.-J., Liao, S.-Y., Lai, Y.-L., Chang, Y.-J., Liao, S.-Y. (2019): An Integrated Assessment of Energy Crops Production in Taiwan. *Modern Economy* 10 (5), 1430–1445. <https://doi.org/10.4236/ME.2019.105096>

Lakovic, N., Khan, A., Petković, B. (2021): Management of higher heating value sensitivity of biomass by hybrid learning technique. *Biomass Conv. Bioref.* 13(3), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01223-w>

Lazaroiu, G., Oprea, I., Mihaescu, E., Prisecaru, T., Pisa, I., Negreanu, G., Mocanu, C.R. (2012): Biomass Briquettes from Pitcoal-Wood: Boiler Test Facility Combustion Case Study. *J Environ Prot Ecol* 13 (2A), 1070-1081.

Lee, Y., Park, J., Ryu, C., Gang, K. S., Yang, W., Park, Y. K., Jung, J., Hyun, S. (2013): Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C. *Bioresource Technology* 148, 196–201. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2013.08.135>

Lindley, R. H., Smith, W. R., Thomas, J. Th. (1998): The relationship between speed of information processing as measured by timed paper-and- pencil tests and psychometric intelligence. *Intelligence* 12, 17-25.

Liu, G., Niu, Z., Van Niekerk, D., Xue, J., Zheng, L. (2008): Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from coal combustion: emissions, analysis, and toxicology. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 192, 1-28. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71724-1_1

Liu, Y., Wang, X., Xiong, Y., Tan, H., Niu, Y. (2014): Study of briquetted biomass co-firing mode in power plants. *Applied Thermal Engineering* 63, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.041>

Lu, H., Zhu, L., Z., Zhu, N., L. (2009): Polycyclic aromatic hydrocarbon emission from straw burning and the influence of combustion parameters. *Atmos. Environ.* 43, 978–983. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.022>

Lucheta, A.R., Lambais, M.R. (2012.): Sulfur in agriculture. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36(5), 1369-1379. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500001>

Malnar, M., Radojičić, V., Ećim-Đurić, O. (2015a): Energy And Environmental Aspects of Tobacco Stalks Combustion Process. *Zbornik Međunarodnog Kongresa o KGH* 45(1), 1–5. <https://izdanja.smeits.rs/index.php/kgkh/article/view/2862>

Malnar, M., Radojičić, V., Ećim-Đurić, O. (2015b): Comparative Analysis of Leaves and Stalks Chemical Composition of Large Leaf Tobacco Produced in Serbia. *Proceedings of the IV International Conference Sustainable Postharvest and Food Technologies INOPTP and XXVII National Conference Processing and Energy in Agriculture PTEP, Divčibare, Serbia, 19-24 April*, pp. 128-133.

Malnar, M., Radojičić, V., Kulić, G., Mandić, N., Skočić, S. (2016): The possibility of using burley tobacco stalks as a biofuel. *Proceedings of the VII International Scientific Agricultural Symposium Agrosym 2016, Jahorina, Bosnia and Hercegovina, 6-9 October*, pp. 2095-2100.

Mandić, N., Lalević, B., Raičević, V., Radojičić, V. (2023): Impact of composting conditions on the nicotine degradation rate using nicotinophilic bacteria from tobacco waste. *International Journal of Environmental Science and Technology* 20 (7), 7787-7798. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04405-3>

Marković, D., Čeperković, B., Vljčić, A., Resl, S. (2020): Bela knjiga Elektroprivrede Srbije. JP "Elektroprivreda Srbije", sektor za odnose sa javnošću.

Martinov, M. (1982): Energetski potencijal sporednih proizvoda ratarstva. u: Internacionalni simpozijum 'Poljoprivredno mašinstvo i nauka' (IV), proc, Požarevac, pp. 497-513.

Martinov, M., Đatkov, Đ, Golub, M., Viskovic, M., Bojic, S., Krstic, J. (2015): Plant for lignocellulosic bioethanol production in Serbia. Case study, Final report, Novi Sad, Serbia.

Mastral, A.M., Callén, M.S. (2000): A review on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from energy generation. *Environ. Sci. Technol.* 34, 3051-3057. <https://doi.org/10.1021/es001028d>

McGrath, T., Chan, W., Hajaligol, M. (2003): Low temperature mechanism for the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from the pyrolysis of cellulose. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 66, 51–70. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(02\)00105-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(02)00105-5)

Mijailović, I., Radojičić, V., Ećim-Đurić, O., Stefanović, G., Kulić, G. (2014): Energy potential of tobacco stalks in briquettes and pellets production, *Journal of Environmental Protection and Ecology* 15 (3), 1034-1041.

Michel, H. (2012): The Nonsense of Biofuels. *Angewandte Chemie International Edition* 51(11), 2516–2518. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201200218>

Monti, A., Di Virgilio, N., Venturi, G. (2008): Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass and Bioenergy* 32(3), 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.09.012>

Nacionalna asocijacija za biomasu "SERBIO.". Pristupljeno: 22. Decembar, 2022, preko: <https://www.serbio.rs/>

Nakomčić-Smaragdakis, B., Čepić, Z., Dragutinović, N. (2015): Energetski potencijal i značaj korišćenja poljoprivredne biomase u AP Vojvodini. 9. International Scientific Conference "Metrology and Quality in Production Engineering and Enviromental Protection"- ETIKUM, Novi Sad, Srbija. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 19-20.jun, pp. 85-88.

Nastić, P. (2014): Vodič za organsku proizvodnju kukuruza, portal Agronomija.

Nikolić, M. (2004): Tehnologija prerade duvana, udžbenik. Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Nitske, R. (1965): Rudolf Diesel: Pioneer of the Age of Power - *ProQuest. Business History Review* 39(2), 280. <https://www.proquest.com/openview/d2a99df4a5224afa33e965c3ad15619f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=40530>

Novotny, E., Zhao, T.F. (1999): Consumption and production waste: another externality of tobacco use. *Tobacco Control* 8(1), 75-80. <https://doi.org/10.1136/tc.8.1.75>

Obernberger, I., Supančić, K., (2009): Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants. *Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition, June/July 2009, Hamburg, ETA-Renewable Energies (Ed.), Italy.*

Obernberger I., Thek, G. (2010): *The Pellet Handbook – The Production and Thermal Utilisation of Pellets.* 1st ed. London: Earthscan.

Oreskes, N., LeGrand, H.E. (2003): *Plate Tectonics: An Insider's History of the Modern Theory of the Earth.* Westview Press.

- Orfao, J.J.M, Antune, F.J.A, Figueiredo, J.L. (1999): Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reaction model. *Fuel* 78(3),3 49-358. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00156-2](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00156-2)
- Pandey, S.K., Kim, K.H., Brown, R.J. (2011): A Review of Techniques for the Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air. *Trends in Analytical Chemistry* 30 (11), 1716–1739. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2011.06.017>
- Popović J., Vukadinović S. (2018): *Matematička statistika*. Saobraćajni fakultet, Univerzitet u Beogradu. ISBN: 978-86-7395-165-2
- Pasquali, M., Zanoletti, A., Benassi, L., Federici, S., Depero, L.E., Bontempi. E. (2018): Stabilized biomass ash as a sustainable substitute for commercial P-fertilizers. *Land Degradation and Development* 29 (7), 2199-2207. <https://doi.org/10.1002/ldr.2915>
- Panwar, N.L., Kothari, P., Tyagi, V.V. (2012): Thermo chemical conversion of biomass - Eco friendly energy routes. *Renewable and Sustainable Energy Review* 16 (4), 1801-1816. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.024>
- Peševski, M., Iliev, B., Živković, D., Jakimovska Popovska, V., Srbinoska, M., Filiposki, B. (2010): Possibilities for utilization of tobacco stems for production of energetic briquettes. *Journal of Agricultural Science* 55 (1), 45–54. <https://doi.org/10.2298/JAS1001045P>
- Petrović, M., Jovanović, M., Štirbanović, Z., Sokolović, J., Gardić, V. (2020): Mogućnost korišćenja koštica višnje kao biogoriva za dobijanje toplotne energije. *Zbornik Međunarodne Konferencije o Obnovljivim Izvorima Električne Energije – MKOIEE* 8(1), 295–299. <https://doi.org/10.24094/MKOIEE.020.8.1.295>
- Radanović, D. Antić - Mladenović, S. Nastovski. T. (2006): Influence of soil characteristics and nutrient supply on medicinal and aromatic plants. *Proceedings from the Third Conference on Medicinal and Aromatic Plants of Southeast European Countries*, Belgrade, Serbia, pp. 20-28.
- Radojičić V. (2011): *Kontrola kvaliteta duvana. Praktikum iz tehnologije obrade duvana*, Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Radojičić, V., Ećim-Đurić, O., Đulančić, N., Srbinoska, M., Kulić, G. (2014a): The Possibility of Using Burley Tobacco Stalks as Biomass. *Proceedings of the XXII International Scientific and Professional Meeting Ecological Truth*, Bor, Serbia, 10-13 June, pp. 284-290.
- Radojičić, V., Ećim-Đurić, O., Srbinoska, M., Đulančić, N., Kulić, G. (2014b): Possibilities of virginia tobacco stalks utilization, *Tutun/Tobacco* 64 (7-12), 71-76.
- Radojičić, V. (2016): *Tehnologija duvana. Udžbenik*, Poljoprivredni fakultet Univerzitet u Beogradu.
- Radovanović, M., Stanojević, G., Stojiljković, D., Jeremić, N. (1995): Laki biobriketi - nova tehnologija, *Zbornik radova: „Biomasa”, IRR „Mladost”, Ekološki pokret Jugoslavije*, Beograd, pp. 177-189.
- Rathore, N.S., Panwar, N.L. (2021): *Biomass Production and Efficient Utilization for Energy Generation*. Taylor and Francis, London. <https://doi.org/10.1201/9781003245766>
- Ravindra, K., Sokhi, R., Van Grieken, R. (2008): Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric environment* 42 (13), 2895–2921. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.010>
- International Renewable Energy Agency - IRENA (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway - Executive Summary*.

Republički zavod za statistiku Srbije. Pristupljeno: 15. Decembar, 2022, preko: <https://www.stat.gov.rs/>

Renewable energy statistics - Statistics Explained. Pristupljeno: 20. Octobra, 2022, from https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Renewable_energy_statistics

Rosentrater, K.A, Todey, D., Persyin, R. (2009): Quantifying Total and Sustainable Agricultural Biomass Resources in South Dakota-A Preliminary Assessment. *Agricultural Engineering International* 11, Manuscript 1059-1058-1. <https://doi.org/10.13031/2013.23075>

Savić, R., Adžić, M. (2013): Mogućnost primene peleta i briketa od biomase za proizvodnju toplotne energije u sistemima daljinskog grejanja Beograda. *KGH - Klimatizacija, Grejanje, Hlađenje* 42 (4), 45–50. <https://izdanja.smeits.rs/index.php/kggh/article/view/1471/1481>

Savić, R. (2013): Mogućnost primene peleta i briketa od biomase za proizvodnju toplotne energije u sistemima daljinskog grejanja Beograda. Doktorska disertacija Mašinski fakultet. Univerzitet u Beogradu.

Shen, G., Wang, W., Yang, Y., Zhu, C., Min, Y., Xue, M., Ding, J., Li, W., Wang, B., Shen, H., Wang, R., Wang, X., Tao, S. (2010): Emission factors and particulate matter size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustions in rural northern China. *Atmos. Environ.* 44 (39), 5237–5243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.08.042>

Shen, G., Wang, W., Yang, Y., Ding, J., Xue, M., Min, Y., Zhu, C., Shen, H., Li, W., Wang, B., Wang, R., Wang, X., Tao, S., Russell, A.G. (2011): Emissions of PAHs from indoor crop residue burning in a typical rural stove: emission factors, size distributions, and gas-particle partitioning. *Environ. Sci. Technol.* 45 (4), 1206–1212. <https://doi.org/10.1021/es102151w>

Shen, G., Tao, S., Chen, Y., Zhang, Y., Wei, S., Xue, M., Wang, B., Wang, R., Lu, Y., Li, W., Shen, H., Huang, Y., Chen, H. (2013): Emission characteristics for polycyclic aromatic hydrocarbons from solid fuels burned in domestic stoves in rural China. *Environ. Sci. Technol.* 47 (24), 14485–14494. <https://doi.org/10.1021/es403110b>

Shen, G.F., Chen, Y.C., Xue, C.Y., Lin, N., Huang, Y., Shen, H., Z., Wang, Y., L., Li, T., C., Zhang, Y., Y., Su, S., Huangfu, Y., Zhang, W., Chen, X., Liu, G., Liu, W., Wang, X., Wong, M.H., Tao, S. (2015): Pollutant Emissions from Improved Coal- and Wood-Fuelled Cookstoves in Rural Households. *Environ. Sci. Technol.* 49 (11), 6590–6598. <https://doi.org/10.1021/es506343z>

Sifola, M.I., Carrino, L., Cozzolino, E., Del Piano, L., Graziani, G., Ritieni, A. (2021): Potential of Pre-Harvest Wastes of Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) Crops, Grown for Smoke Products, as Source of Bioactive Compounds (Phenols and Flavonoids). *Sustainability* 13(4), 2087. <https://doi.org/10.3390/SU13042087>

Silva, D.A., Eloy, E., Caron, B.O., Trugilho, P.F. (2019): Elemental Chemical Composition of Forest Biomass at Different Ages for Energy Purposes. *Floresta e Ambiente* 26 (4), 20160201. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.020116>

Singh, D., Gadi, R., Mandal, T., Saud, T., Saxena, M., Sharma, S. (2013): Emissions estimates of PAH from biomass fuels used in rural sector of Indo-Gangetic Plains of India. *Atmos. Environ* 68, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.042>

Službeni glasnik RS”, broj 53/13

Službeni glasnik RS, br. 101/15

Službeni glasnik RS”, broj 30/18

Službeni glasnik RS 62/06, 65/08, 41/09, 101/ 15, 112/15, 80/17 i 95/18

Službeni glasnik RS, br. 30/97, 35/97

Službeni glasnik RS“, br. 40/21 i 35/23

Službeni glasnik RS”, broj 23/94

Službeni glasnik RS”, broj 6/16

Schiemenz, K., Kern, J., Paulsen, H.M., Bachmann, S., Eichler-Löbermann, B. (2011): Phosphorus Fertilizing Effects of Biomass Ashes. In: Insam, H., Knapp, B. (eds) Recycling of Biomass Ashes. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19354-5_2

Speight, J. G. (2015): Handbook of Coal Analysis; Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications (2nd edition). Wiley, ISBN: 1119038324, 9781119038320.

Sterman, J. D., Siegel, L., Rooney-Varga, J. N. (2018): Does replacing coal with wood lower CO₂ emissions? Dynamic lifecycle analysis of wood bioenergy. Environmental Research Letters 13(1), 015007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AAA512>

Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D. (2012): Crop yield response to water, FAO irrigation and drainage paper no. 66, FAO, Rome, Italy, pp. 505.

Styks, J., Wróbel, M., Fraczek, J., Knapczyk, A. (2020): Effect of Compaction Pressure and Moisture Content on Quality Parameters of Perennial Biomass Pellets. Energies 13(8), 1859. <https://doi.org/10.3390/EN13081859>

Sun, J., Shen, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., Wang, F., Wang, T., Chang, X., Lei, Y., Xu, H., Cao, J., Zhang, N., Liu, S., Li, X. (2019): Effects of biomass briquetting and carbonization on PM_{2.5} emission from residential burning in Guanzhong Plain, China. Fuel 244, 379–387. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.02.031>

Sun, J., Shen, Z., Zeng, Y., Niu, X., Wang, J., Cao, J., et al. (2018): Characterization and Cytotoxicity of PAHs in PM_{2.5} Emitted from Residential Solid Fuel Burning in the Guanzhong Plain, China. Environ. Pollut. 241, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.076>

Sheng, C., Azevedo, J.L.T. (2005): Estimating higher heating values of biomass fuels from basic analysis data. Biomass and Bioenergy 28 (5), 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>

Štrbac, D.D, Gvozdenc, B.D., Miroslavljević, Z.D. (2011): Energija i okruženje, skripta. Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu. Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu.

TAIEX (2018): Workshop on the First Processing of Raw Tobacco, 12 – 13. September, Belgrade, Serbia. Reference code: AGR 66987.

Telli-Okur, M., Eken-Saraçoğlu, N. (2008): Fermentation of sunflower seed hull hydrolysate to ethanol by *Pichia stipitis*. Bioresource Technology 99 (7), 2162–2169. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.05.036>

Tobiszewski, M., Namieśnik, J. (2012): PAH Diagnostic Ratios for the Identification of Pollution Emission Sources. Environ. Pollut. 162, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025>

Uredba o graničnim vrednostima emisija zagađujućih materija u vazduhu iz postrojenja za sagorevanje, "Sl. glasnik RS" br. 6/16 dostupno na: <http://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/reg/viewAct/9988f295-aa0e-42bb-9448-f6010859053d>

Uzunoski, M. (1987): Proizvodnja duvana, GRO „Prosveta“, Niš, str. 49-58.

UNDP United Nations Development Program. Pristupljeno: 16. Decembar, 2022, preko: http://biomasa.undp.org.rs/?page_id=839

Vilček, J. (2013): Bioenergetic potential of agricultural soils in Slovakia, *Biomass and Bioenergy* 56, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.030>

Višković, M., Golub, M., Đatkov, Đ., Bojić, S., Martinov, M. (2012): Ukupan i raspoloživ prinos biljnih ostataka pšenice sezona 2012. *Savremena poljoprivredna tehnika* 38 (3), 267-276.

Veselinov, B., Golub, M., Višković, M., Bojić, M., Đatkov, Đ., Martinov, M. (2012): Istraživanje ukupnog i raspoloživog prinosa žetvenih ostataka soje, 2011. i 2012. *Savremena poljoprivredna tehnika* 38 (3), 189-286. UDK: 621.979:633.31

Yunker, M.B., MacDonald, R.W., Vingarzan, R., Mitchell, R.H., Goyette, D., Sylvestre, S. (2002): PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry* 33(4), 489–515. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5)

Wright, L. L., Boundy, R. G., Perlack, R. D., Davis, S. C., Saulsbury, B. (2006): *Biomass Energy Data Book: Edition 1*. United States. <https://doi.org/10.2172/930823>

Zelena Energija. Pristupljeno 22. Decembar, 2022, preko <http://zelenaenergija.pks.rs/>

Zubac, M. (2012): Valorizacija žetvenih ostataka sa značajnim pozitivnim efektima na životnu sredinu. *Danubius- časopis za regionalnu saradnju*. ISSN: 2217-4826

Zhang, Q., Watanabe, M., Lin, T. (2010): *Rural Biomass Energy 2020*. Asian Development Bank. ISBN 978-971-561-879-3 <https://www.perlego.com/book/533159/rural-biomass-energy-book-2020-pdf>

Zhang, H., Zhang, X., Wang, Y., Bai, P., Hayakawa, K., Zhang, L., Tang, N. (2022): Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Open Burning and Stove Burning of Biomass: A Brief Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (7), 3944. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073944>

Zhang, H., Hu, D., Chen, J., Ye, X., Wang, S.X., Hao, J.M., Wang, L., Zhang, R., An, Z., (2011): Particle size distribution and polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from agricultural crop residue burning. *Environ. Sci. Technol.* 45 (13), 5477–5482. <https://doi.org/10.1021/es1037904>

Zhou H., Wu C., Meng A., Zhang Y., Williams P.T. (2014): Effect of interactions of biomass constituents on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) formation during fast pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 110 (1), 264-269, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.09.007>.

Životić, D., Stojanović, K., Gržetić, I., Jovančićević, B., Cvetković, O., Šajnović, A., Simić, V., Stojaković, R., Scheeder, G. (2013): Petrological and geochemical composition of lignite from the D field, Kolubara basin (Serbia). *International Journal of Coal Geology* 111, 5–22. <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2012.10.014>

Živković N., Đorđević A. (2001): *Zaštita vazduha-teorijske osnove predviđanja zagađenosti vazduha sa primerima rešenih zadataka*, Fakultet zaštite na radu, Univerzitet u Nišu, CIP 504. 3. 054; ISBN-86-80261-31-9, pp. 188.

SRPS ISO 6541:1997 Poljoprivredno-prehrambeni proizvodi, određivanje sadržaja sirove celuloze, modifikovana metoda po Šareru

SRPS ISO E.P1.010:1986 Sirovi i fermentisani duvan u listu - Opšte odredbe

SRPS ISO 6490-1:2001. Hrana za životinje, određivanje sadržaja kalcijuma, volumerijska metoda

SRPS ISO 6491:2002 Hrana za životinje, određivanje sadržaja fosfora, spektrometrijska metoda

SRPS EN ISO 17225-2:2021 Čvrsta biogoriva, specifikacije i klase goriva, deo2: klasiranje drvnog peleta

SRPS EN ISO 5983-2:2010 Hrana za životinje, određivanje sadržaja azota i izračunavanje sadržaja sirovih proteina, deo 2: blok razaranje i metoda destilacije parom

SRPS EN 15550:2009 Hrana za životinje, Određivanje kadmijuma i olova pomoću grafitne kivete atomskoapsorpcione spektrometrije (GF-AAS) posle razaranja pod pritiskom

SRPS EN 6869:2008 Hrana za životinje, Određivanje sadržaja kalcijuma, bakra, gvožđa, magnezijuma, mangana, kalijuma, natrijuma i cinka - Metoda atomske apsorpcione spektrometrije

SRPS EN 16277:2013 Hrana za životinje, Određivanje žive atomskom apsorpcionom spektrometrijom – tehnikom hladne pare (CVAAS) posle mikrotalasne digestije (ekstrakcija sa 65 % azotnom kiselinom i 30 % vodonik-peroksidom)

SRPS EN 16206:2012 Hrana za životinje, Određivanje arsena atomskom apsorpcionom spektrometrijom sa hidridnom tehnikom (HGAAS) posle mikrotalasne digestije (digestija sa 65 % azotnom kiselinom i 30 % vodonik-peroksidom)

SRPS EN 14775:2011. Čvrsta biogoriva — Određivanje sadržaja pepela

SRPS EN 14918:2011. Čvrsta biogoriva — Određivanje kalorijske vrednosti

EN 15104:2011. Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen - Instrumental methods

EN 15289:2011. Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine

ISO 17225-1:2014. Solid biofuels, Fuel specifications and classes, Part 1: General requirements

SRPS M.E2.203:1980. Steam boilers – Testing

ISO 21436:2020. Pulps, Determination of lignin content, Acid hydrolysis method

EN 14961-2:2011. Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Wood pellets for non-industrial use

EU/2009/28/EC –Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council

ONORM M 1735:1990

DIN 51731:1996

<https://www.zeleniminuti.rs/zelena-ekonomija/obnovljivi-izvori-energije/item/1020-iz-novog-vetroparka-alibunar-energija-za-38-000-domacinstava> (Pristupljeno 14. Decembar, 2022)

www.stat.gov.rs (Pristupljeno 14. Decembar, 2022)

www.cen.eu (Pristupljeno 14. Decembar, 2022)

ec.europa.eu (Pristupljeno 22. Decembar, 2022)

energetski-portal.rs (Pristupljeno 20. Januar, 2023)

energy.ec.europa.eu (Pristupljeno 14. Decembar, 2022)

www.srda.rs (Pristupljeno 17. Decembar, 2022)

www.serbio.rs (Pristupljeno 20. Januar, 2023)

www.irena.org (Pristupljeno 10. Novembar, 2022)
www.biomasa.undp.org.rs (Pristupljeno 10. Novembar, 2022)
www.solarni-paneli.co.rs/ (Pristupljeno 20. Januar, 2023)
www.psegs.vojvodina.gov.rs (Pristupljeno 1. Decembar, 2022)
www.ogreviverak.com (Pristupljeno 15. Decembar, 2022)
www.fda.gov (Pristupljeno 17. Decembar, 2022)
www.researchgate.net/figure/Raw-soybean-straw-and-its-dried-powder_fig1_358007927
(Pristupljeno 12. Januar, 2023)

PRILOG 1

ZAKONI I PODZAKONSKI AKTI

Zakoni:

Zakon o energetici (Službeni glasnik RS, br. 145/14)

Zakon o efikasnom korišćenju energije (Službeni glasnik RS, br. 25/13)

Zakon o ratifikaciji Ugovora o osnivanju Energetske zajednice između Evropske Zajednice i Republike Albanije, Republike Bugarske, Bosne i Hercegovine, Republike Hrvatske, Bivše Jugoslovenske Republike Makedonije, Republike Crne Gore, Rumunije, Republike Srbije i Privremene Misije Ujedinjenih nacija na Kosovu u skladu sa Rezolucijom 1244 Saveta Bezbednosti Ujedinjenih Nacija (Službeni glasnik RS, br. 62/06)

Zakon o planiranju i izgradnji (Službeni glasnik RS, br. 72/09, 81/09, 64/10 – odluka US, 24/11, 121/12, 42/13 – odluka US, 50/13 – odluka US, 98/13 – odluka US, 132/14 i 145/14)

Zakon o šumama (Službeni glasnik RS, br. 30/10 i 93/12)

Zakon o poljoprivredi i ruralnom razvoju (Službeni glasnik RS, br. 41/09)

Zakon o poljoprivrednom zemljištu (Službeni glasnik RS, br. 62/06 i 41/09)

Zakon o izmenama zakona o poljoprivrednom zemljištu (Službeni glasnik RS, br. 62/06)

Zakon o vodama (Službeni glasnik RS, br. 30/10)

Zakon o izmenama zakona o vodama (Službeni glasnik RS, br. 93/12)

Zakon o zaštiti prirode (Službeni glasnik RS, br. 36/09, 88/10, 91/10 i 14/16)

Zakon o zaštiti vazduha (Službeni glasnik RS, br. 36/09 i 10/13)

Zakon o izmenama i dopunama zakona o zaštiti vazduha (Službeni glasnik RS, br. 36/09)

Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu (Službeni glasnik RS, br. 135/04 i 36/09)

Zakon o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu (Službeni glasnik RS, br. 135/04 i 88/10)

Zakon o nacionalnim parkovima (Službeni glasnik RS, br. 39/93 i 44/93)

Zakon o upravljanju otpadom (Službeni glasnik RS, br. 36/09, 88/10 i 14/16)

Zakon o potvrđivanju protokola o zaštiti i korišćenju biološke i predeone raznolikosti (Službeni glasnik RS – Međunarodni ugovori br. 1/13)

Uredbe:

Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije, privremenog povlašćenog proizvođača i proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora energije (Službeni glasnik RS, br. 56/16)

Uredba o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i iz visokoefikasne kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije, Sl. glasnik RS br. 56/16

Uredba o otkupu električne energije, Sl. glasnik RS br. 56/16

Uredba o naknadi za podsticaj povlašćenih proizvođača električne energije, Sl. glasnik RS br. 56/16

Uredba o visini posebne naknade za podsticaj u 2016. godini (Službeni glasnik RS, br. 12/16)

Uredba o utvrđivanju metodologije za određivanje cene snabdevanja krajnjeg kupca toplotnom energijom (Službeni glasnik RS, br. 63/15)

Pravilnici:

Pravilnik o energetske dozvoli (Službeni glasnik RS, br. 15/15)

Pravilnik o garanciji porekla električne energije proizvedene iz OIE (Službeni glasnik RS, br. 24/14)

Pravilnik o utvrđivanju slobodnog kapaciteta uvećanog za vrednost instalisane snage elektrana za koje je prestao privremeni status povlašćenog proizvođača (Službeni glasnik RS, br. 24/15)

Strateški dokumenti:

Strategija razvoja energetike Republike Srbije (Službeni glasnik RS, br. 101/15)

Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije (NAPOIE) (Službeni glasnik RS, br. 53/13)

Međunarodna dokumenta:

Direktiva 2009/28/EC o promovisanju upotrebe energije iz obnovljivih izvora

Odluka Ministarskog saveta o implementaciji Direktive 2009/28/EC o promovisanju upotrebe energije iz obnovljivih izvora

Regionalna energetska strategija, 10thMC/18/10/2012 – Annex 19/16.07.2012.

Biografija autora

Maja Malnar je rođena 30.06.1990. godine u Beogradu, Republika Srbija. Osnovnu i srednju školu (Gimnazija, prirodno-matematički smer) završila je u Pančevu 2009. godine sa odličnim uspehom (5,00).

Školske 2009/10 godine upisala je Osnovne akademske studije na Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu, studijski program Prehrambena tehnologija, modul Tehnologija ratarskih proizvoda. Diplomirala je u roku, 2013. godine sa prosečnom ocenom 8,56 (osam pedeset šest). Završni rad, sa temom „Energetski potencijal stabljika duvana tipa Berlej“, odbranila je 11.09.2013. sa ocenom 10 (deset), čime je stekla zvanje „Diplomirani inženjer tehnologije“.

Master akademske studije na Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na Odseku za Prehrambenu tehnologiju, upisala je školske 2013/14 godine. Prosečna ocena tokom master studija iznosila je 10,00 (deset). Master rad sa temom „Energetske i ekološke karakteristike duvanskih stabljika kao biomase“ odbranila je 13.10.2014. godine sa ocenom 10 (deset) i stekla zvanje “Master inženjer tehnologije“.

Doktorske akademske studije na Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisala je školske 2014/2015. godine, na Odseku za Prehrambenu tehnologiju. Uža oblast istraživanja na doktorskim studijama bila je Tehnologija obrade i prerade duvana. Položila je sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija, sa prosečnom ocenom 9,57 (devet pedeset sedam).

Od 1. aprila 2015 godine, do 31. decembra 2018. godine bila je angažovana kao stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na projektu „Unapređenje i razvoj higijenskih i tehnoloških postupaka u proizvodnji namirnica animalnog (životinjskog) porekla u cilju dobijanja kvalitetnih i bezbednih proizvoda konkurentnih na svetskom tržištu“, br. TR 46009.

28.04.2016. godine stekla je zvanje Istraživač saradnik na Poljoprivrednom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Osim naučno-istraživačkog rada učestvovala je u praktičnom izvođenju nekoliko diplomskih i master radova.

Samostalno i u saradnji sa drugim autorima do sada ima 12 saopštenja na međunarodnim skupovima i jedno predavanje po pozivu na skupu nacionalnog značaja (štampani u celini).

U martu 2018. godine bila je učesnik „Belux 3 Training school – Chemistry of Atomic Layer Deposition“, na Luksemburškom Institutu nauke i tehnologije, u Luksemburgu.

Tokom 2018. godine obavila je stručnu praksu u AD „Pekarskoj industriji“ Pančevo, kao i u „Presija DOO“ Starčevo. Radni odnos zasnovala je 25. marta 2019. godine u kompaniji „Div Lek DOO“ Beograd. Od 13. aprila 2021. zaposlena je u kompaniji „Ziba DOO“ Beograd.

Govori engleski, nemački i turski jezik i poseduje znanje rada na računaru.

Izjava 1.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora: **Maja Malnar**

Broj indeksa: **TH 14/14**

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**UTICAJ DODATKA RAZLIČITIH VRSTA BIOMASE NA PROMENE
ENERGETSKIH I EKOLOŠKIH KARAKTERISTIKA BRIKETA OD STABLJIK
DUVANA TIPA BERLEJ**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: **Maja Malnar**

Broj indeksa: **TH 14/14**

Studijski program: **Prehrambena Tehnologija**

Naslov rada: **UTICAJ DODATKA RAZLIČITIH VRSTA BIOMASE NA PROMENE ENERGETSKIH I EKOLOŠKIH KARAKTERISTIKA BRIKETA OD STABLJICA DUVANA TIPA BERLEJ**

Mentor: **Mentor 1: prof. dr Vesna Radojičić, redovni profesor**

Mentor 2: Dr Sanja Stojadinović, naučni saradnik

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala radi pohranjivanja u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja, kao i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

Izjava 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**UTICAJ DODATKA RAZLIČITIH VRSTA BIOMASE NA PROMENE
ENERGETSKIH I EKOLOŠKIH KARAKTERISTIKA BRIKETA OD STABLJICA
DUVANA TIP A BERLEJ**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)

2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)

5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci. Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. Autorstvo. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.**
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo - bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

