



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet šumarstva i drvne tehnologije

Božidar Matin

**UTJECAJ OMJERA ŠUMSKE I
POLJOPRIVREDNE BIOMASE NA
SVOJSTVA PELETA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2026.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet šumarstva i drvne tehnologije

Božidar Matin

**UTJECAJ OMJERA ŠUMSKE I
POLJOPRIVREDNE BIOMASE NA
SVOJSTVA PELETA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Alan Antonović
Izv. prof. dr. sc. Nikola Bilandžija

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

Faculty of Forestry and Wood Technology

Božidar Matin

Influence of the ratio of forest and agricultural biomass on the properties of pellets

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:

Prof. Alan Antonović, PhD

Assoc. Prof. Nikola Bilandžija, PhD

Zagreb, 2026.

Bibliografski podaci:

- Znanstveno područje: Biotehničko područje
- Znanstveno polje: Šumarstvo i drvena tehnologija
- Znanstvena grana: Drvena tehnologija
- Institucija: Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
- Voditelj doktorskog rada: Prof. dr. sc. Alan Antonović, Izv. prof. dr. sc. Nikola Bilandžija
- Broj stranica: 203
- Broj slika: 53
- Broj grafikona: 0
- Broj tablica: 84
- Broj priloga: 1
- Broj literaturnih referenci: 508
- Datum obrane doktorskog rada:
- Sastav povjerenstva za obranu doktorskog rada:
 1. Izv. prof. dr. sc. Josip Ištvančić
 2. Izv. prof. dr. sc. Branimir Šafran
 3. Profesorica emerita dr. sc. Tajana Krička

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE

IZJAVA O IZVORNOSTI

Ja, Božidar Matin, izjavljujem da sam samostalno izradio doktorski rad pod naslovom:

**UTJECAJ OMJERA ŠUMSKE I POLJOPRIVREDNE BIOMASE NA
SVOJSTVA PELETA**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedini autor ovoga dokorskog rada;
- da je doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istog nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni;
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____

Potpis doktoranda

Ocjena doktorskog rada

Disertacija je obranjena na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije,
dana _____ pred povjerenstvom u sastavu:

1. Član 1, Josip Ištvančić _____

Izv. prof. dr. sc., Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvne tehnologije

2. Član 2, Branimir Šafran _____

Izv. prof. dr. sc., Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvne tehnologije

3. Član 3, Tajana Krička _____

Profesorica emerita dr. sc., Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet

Zahvala

Posebnu zahvalnost izražavam svom mentoru, prof. dr. sc. Alanu Antonoviću, na ukazanom povjerenju, stručnom vodstvu i brojnim korisnim savjetima tijekom izrade doktorskoga rada. Njegovo iskustvo, otvorenost za raspravu i konstruktivni prijedlozi bili su od velike važnosti u svim fazama ovoga istraživanja.

Iskreno zahvaljujem i svom komentoru, izv. prof. dr. sc. Nikoli Bilandžiji na pomoći, stručnim savjetima, dostupnosti i podršci tijekom istraživanja i izrade doktorskoga rada. Njegove sugestije i kritička promišljanja znatno su pridonijeli kvaliteti ovoga rada.

Zahvaljujem članovima povjerenstva, izv. prof. dr. sc. Josipu Ištvaniću, izv. prof. dr. sc. Branimiru Šafranu i profesorici emeriti dr. sc. Tajani Krički, na vremenu koje su posvetili pregledu rada te na korisnim primjedbama i prijedlozima.

Profesorici emeriti dr. sc. Tajani Krički, dodatno zahvaljujem i na podršci, korisnim savjetima te ukazanom povjerenju tijekom mog profesionalnog razvoja.

Hvala svim kolegama i djelatnicima Sveučilišta u Zagrebu Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije na suradnji, pomoći i ugodnom radnom okruženju tijekom doktorskoga studija. Zahvaljujem i djelatnicima Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta Zavoda za održive tehnologije i obnovljive izvore energije, Vanji, Ivani, Ivanu, Karlu i Nevenu, na susretljivosti, kolegijalnosti, stručnoj pomoći i ugodnoj suradnji tijekom provedbe istraživanja. Njihova spremnost na pomoć i razmjenu znanja znatno je pridonijela izradi ovoga doktorskoga rada.

Najveću zahvalnost upućujem svojoj supruzi Ani na razumijevanju, strpljenju i podršci tijekom svih godina rada na doktoratu. Bila je uz mene u svakom izazovu i svojim me ohrabrenjem poticala da ustrajem do samoga kraja.

Hvala mojoj djeci, Ivanu i Magdalen, koji su mi svojom ljubavlju svakodnevno davali dodatnu snagu i podsjećali me na ono što je u životu doista važno.

Veliku zahvalnost dugujem i svojim roditeljima, koji su me svojim odgojem, primjerom i podrškom naučili vrijednostima rada, odgovornosti i ustrajnosti. Bez njihove pomoći i vjere u mene ovaj put bio bi mnogo teži.

Ovaj rad posvećujem svojoj obitelji.

SADRŽAJ

INFORMACIJE O MENTORIMA	IX
SAŽETAK	XI
ABSTRACT	XII
POPIS SLIKA.....	XIII
POPIS TABLICA	XV
1. UVOD	1
1.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja	4
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	5
2.1. Globalna bioenergija.....	5
2.2. Europska energetska politika i zelena tranzicija.....	5
2.3. Biomasa kao obnovljivi izvor energije	6
2.4. Vrste i izvori biomase	7
2.4.1. Šumska (drvena) biomasa.....	8
2.4.2. Poljoprivredna biomasa.....	8
2.4.3. Žetveni indeks i potencijal poljoprivredne biomase	9
2.4.4. Izračun prinosa žetvenih ostataka pomoću žetvenog indeksa.....	9
2.4.5. Dostupnost i održivo iskorištavanje žetvenih ostataka u energetske svrhe	10
2.4.6. Procjena prinosa žetvenih ostataka	10
2.5. Istraživana biomasa	11
2.5.1. Hrast lužnjak (<i>Quercus robur</i> L.).....	11
2.5.2. Soja (<i>Glycine max</i> L.)	12
2.5.3. Kukuruz (<i>Zea mays</i> L.)	13
2.5.4. Pšenica (<i>Triticum aestivum</i> L.)	14
2.5.5. Suncokret (<i>Helianthus annuus</i> L.)	15
2.6. Kemijska i energetska karakterizacija lignocelulozne biomase	15
2.6.1. Kemijski sastav biomase.....	16
2.6.2. Energetska svojstva biomase	18
2.6.3. Ogrjevna vrijednost biomase	22
2.7. Načini pretvorbe biomase u biogorivo	22
2.7.1. Termokemijska pretvorba biomase	23
2.7.2. Fizikalna pretvorba biomase	24
2.8. Peleti kao biogorivo.....	24
2.9. Normizacija čvrstih biogoriva	24
2.10. Normizacija peleta	25

2.10.1. Sirovine za proizvodnju krutih biogoriva prema HRN EN ISO 17225-1	25
2.10.2. Klasifikacija razreda drvnih peleta prema HRN EN ISO 17225-2	26
2.10.3. Klasifikacija nedrvnih peleta prema HRN EN ISO 17225-6	27
2.11. Proizvodnja i potrošnja drvnih peleta	28
2.12. Proizvodnja peleta i ostalih krutih biogoriva u RH	29
2.13. Proces prešanja peleta	30
2.13.1. Prikupljanje i priprema sirovine	30
2.13.2. Drobljenje sirovine	30
2.13.3. Sušenje sirovine	30
2.13.4. Usitnjavanje sirovine	31
2.13.5. Miješanje i kondicioniranje sirovine	32
2.13.6. Prešanje sirovine	32
2.13.7. Mehanizam vezivanja čestica biomase u peletima	34
2.13.8. Hlađenje i prosijavanje peleta	35
2.13.9. Pakiranje i transport peleta	35
2.13.10. Skladištenje peleta	35
2.14. Karakterizacija kvalitete peleta	36
2.14.1. Dimenzije i oblik peleta	36
2.14.2. Pojedinačna gustoća peleta	36
2.14.3. Nasipna gustoća peleta	36
2.14.4. Mehanička izdržljivost peleta	37
2.14.5. Tlačna čvrstoća peleta	37
2.15. Sustavi za izgaranje peleta	38
2.16. Emisije dimnih plinova pri izgaranju goriva	39
2.16.1. Sastav i utjecaj onečišćujućih tvari u dimnim plinovima	39
2.16.2. Izvori i sastav emisija pri izgaranju goriva	39
2.16.3. Praćenje emisija dimnih plinova	39
2.17. Zakonska regulativa emisija iz uređaja na kruta goriva i biomasu	40
2.17.1. Hrvatski zakonodavni okvir	40
2.17.2. Uredba Komisije (EU) 2015/1189 o ekološkom dizajnu kotlova na kruto gorivo	41
2.17.3. Granične vrijednosti emisija	41
2.18. Mjerenje i uzorkovanje dimnih plinova iz nepokretnih izvora	41
2.18.1. Sustav za analizu emisija dimnih plinova	42
2.19. Metode analize sastava dimnih plinova	42
2.19.1. Određivanje koncentracije ugljikova monoksida	42

2.19.2. Određivanje koncentracije dušikovih oksida	42
2.19.3. Određivanje koncentracije sumpornih dioksida.....	42
2.19.4. Određivanje koncentracije sumporovodika	42
2.19.5. Određivanje koncentracije kisika.....	43
2.19.6. Određivanje koncentracije ugljikova dioksida.....	43
2.20. Iskazivanje i standardizacija rezultata emisija dimnih plinova	43
3. MATERIJALI I METODE	44
3.1. Prikupljanje biomase i priprema uzoraka za analize	44
3.1.1. Prikupljanje biomase.....	44
3.1.2. Sušenje biomase.....	45
3.1.3. Usitnjavanje uzoraka biomase	46
3.1.4. Prosijavanje i određivanje granulometrijskog sastava usitnjene biomase	47
3.2. Određivanje fizikalno-kemijskih svojstava biomase	48
3.2.1. Određivanje nasipne gustoće u biomasi.....	48
3.2.2. Određivanje udjela vlage u biomasi.....	49
3.2.3. Određivanje udjela pepela u biomasi.....	50
3.2.4. Određivanje udjela koksa u biomasi	50
3.2.5. Određivanje udjela fiksiranog ugljika u biomasi	51
3.2.6. Određivanje udjela hlapljivih tvari u biomasi.....	51
3.3. Određivanje elementarnog sastava biomase.....	51
3.3.1. Određivanje udjela ugljika, dušika, vodika i sumpora u biomasi	51
3.3.2. Određivanje udjela kisika u biomasi.....	52
3.3.3. Određivanje H/C i O/C omjera pojedinačne vrste biomase.....	52
3.4. Određivanje ogrjevnih vrijednosti biomase	52
3.4.1. Određivanje gornje ogrjevnih vrijednosti biomase	53
3.4.2. Određivanje donje ogrjevnih vrijednosti biomase.....	53
3.5. Određivanje mineralnog sastava biomase	54
3.5.1. Određivanje sadržaja mikroelemenata u biomasi	54
3.5.2. Određivanje sadržaja makroelemenata u biomasi.....	54
3.6. Određivanje kemijskog sastava biomase	55
3.6.1. Određivanje udjela ekstraktivnih tvari u biomasi	55
3.6.2. Određivanje udjela celuloze u biomasi	55
3.6.3. Određivanje udjela lignina u biomasi	56
3.6.4. Određivanje udjela hemiceluloze u biomasi	57
3.7. Analiza svojstva mješavina biomasa	57

3.7.1. Izračun teorijskih vrijednosti i apsolutnog odstupanja	57
3.7.2. Relativna postotna pogreška i interpretacija odstupanja.....	59
3.8. Usitnjavanje biomase na granulaciju pogodnu za prešanje	60
3.9. Priprema i kondicioniranje za prešanje	61
3.10. Postupak prešanja peleta iz pojedinačnih i mješavina biomasa	61
3.11. Analiza svojstava peleta proizvedenih iz pojedinačnih biomasa i njihovih mješavina	63
3.11.1. Određivanje pojedinačne gustoće peleta	63
3.11.2. Određivanje mehaničke izdržljivosti peleta	65
3.11.3. Određivanje tlačne čvrstoće peleta u radijalnom smjeru	66
3.11.4. Analiza koncentracija dimnih plinova nastalih izgaranjem peleta	67
3.11.5. Preračunavanje i korekcija rezultata analize dimnih plinova.....	68
3.11.6. Korekcija na referentni volumni udio kisika.....	69
3.12. Statistička obrada podataka istraživanja.....	69
4. REZULTATI	70
4.1. Analiza svojstava biomase.....	70
4.1.1. Granulometrijski sastav biomase	70
4.1.2. Fizikalno-kemijska i mehanička svojstva biomase.....	71
4.1.3. Elementarni sastav biomase	71
4.1.4. Kemijski sastav biomase.....	73
4.1.5. Mineralni sastav biomase.....	74
4.1.5.1. Sadržaj makroelemenata u biomasi.....	74
4.1.5.2. Sadržaj mikroelemenata u biomasi.....	74
4.1.6. Ogrjevna vrijednost biomase	75
4.2. Analiza svojstava mješavina biomase.....	76
4.2.1. Fizikalno-kemijska i mehanička svojstva mješavina biomase.....	76
4.2.2. Elementarni sastav mješavina biomase.....	78
4.2.3. Kemijski sastav mješavina biomase.....	80
4.2.4. Mineralni sastav mješavina biomase	81
4.2.4.1. Sadržaj makroelemenata u mješavinama biomase	82
4.2.4.2. Sadržaj mikroelemenata u mješavinama biomase.....	83
4.2.5. Ogrjevna vrijednost mješavina biomase	84
4.3. Ponderirani proračun analiziranih svojstava mješavina biomase	85
4.3.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava mješavina biomase	85
4.3.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava mješavina biomase.....	86
4.3.3. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera mješavina biomase.....	87

4.3.4. Ponderirani proračun kemijskog sastava mješavina biomase	87
4.3.5. Ponderirani proračun mineralnog sastava mješavina biomase	88
4.3.6. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti mješavina biomase.....	89
4.4. Analiza svojstava peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa.....	89
4.4.1. Fizikalno-kemijska svojstva peleta od pojedinačnih biomasa	90
4.4.2. Elementarni sastav peleta od pojedinačnih biomasa.....	92
4.4.3. H/C i O/C omjer peleta od pojedinačnih biomasa	92
4.4.4. Kemijski sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase.....	93
4.4.5. Mineralni sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase.....	94
4.4.6. Ogrjevna vrijednost peleta od pojedinačnih vrsta biomase	95
4.4.7. Mehanička svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase	96
4.5. Analiza svojstava peleta od mješavina biomase	97
4.5.1. Fizikalno-kemijska svojstva peleta od mješavina biomase.....	97
4.5.2. Elementarni sastav peleta od mješavina biomase	100
4.5.3. H/C i O/C omjeri peleta od mješavina biomase.....	101
4.5.4. Kemijski sastav peleta od mješavina biomase	101
4.5.5. Mineralni sastav peleta od mješavina biomase	102
4.5.6. Ogrjevna vrijednost peleta od mješavina biomase.....	105
4.5.7. Mehanička svojstva peleta od mješavina biomase.....	105
4.6. Ponderirani proračun analiziranih svojstava peleta od mješavina biomase	106
4.6.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava peleta od mješavina biomase	106
4.6.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava peleta od mješavina biomase	107
4.6.3. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera peleta od mješavina biomase	108
4.6.4. Ponderirani proračun kemijskog sastava peleta od mješavina biomase	109
4.6.5. Ponderirani proračun mineralnog sastava peleta od mješavina biomase.....	109
4.6.6. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti peleta od mješavina biomase	110
4.6.7. Ponderirani proračun mehaničkih svojstava peleta od mješavina biomase	111
4.7. Emisije dimnih plinova pri izgaranju skupina peleta	111
4.7.1. Koncentracija dimnih plinova pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa.....	112
4.7.2. Koncentracija dimnih plinova pri izgaranju peleta od mješavina biomase	114
4.7.3. Ponderirani proračun emisija dimnih plinova pri izgaranju peleta od mješavina biomase	117
4.7.3.1. Ponderirani proračun koncentracije CO, NO _x , NO, NO ₂ i SO ₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase korigiranih na referentni udio O ₂ od 10%	118

4.7.3.2. Ponderirani proračun koncentracije CO, NO _x , NO, NO ₂ i SO ₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase korigiranih na referentni udio O ₂ od 11%	119
4.7.3.3. Ponderirani proračun volumnih udjela O ₂ i CO ₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase	120
5. RASPRAVA	121
5.1. Analiza svojstava biomase	121
5.1.1. Granulometrijski sastav biomase	121
5.1.2. Fizikalno-kemijska i mehanička svojstva biomase	121
5.1.2.1. Udio vlage u biomasi	121
5.1.2.2. Udio pepela u biomasi	122
5.1.2.3. Udio fiksiranog ugljika u biomasi	122
5.1.2.4. Udio koksa u biomasi	123
5.1.2.5. Udio hlapljivih tvari u biomasi	123
5.1.2.6. Nasipna gustoća biomase	124
5.1.3. Elementarni sastav biomase	124
5.1.3.1. Udio ugljika u biomasi	124
5.1.3.2. Udio vodika u biomasi	125
5.1.3.3. Udio dušika u biomasi	125
5.1.3.4. Udio kisika u biomasi	126
5.1.3.5. Udio sumpora biomase	126
5.1.3.6. H/C i O/C omjer biomase	127
5.1.4. Kemijski sastav biomase	127
5.1.4.1. Udio celuloze u biomasi	128
5.1.4.2. Udio lignina u biomasi	128
5.1.4.3. Udio hemiceluloze u biomasi	129
5.1.4.4. Udio ekstraktivnih tvari u biomasi	129
5.1.5. Mineralni sastav biomase	130
5.1.5.1. Sadržaj makroelemenata u biomasi	130
5.1.5.2. Sadržaj mikroelemenata u biomasi	132
5.1.6. Ogrjevna vrijednost biomase	133
5.2. Ponderirani proračun analiziranih svojstava mješavina biomase	134
5.2.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava mješavina biomase	134
5.2.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava mješavina biomase	135
5.2.2.1. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera mješavina biomase	135

5.2.3. Ponderirani proračun kemijskog sastava mješavina biomase	135
5.2.4. Ponderirani proračun mineralnog sastava mješavina biomase	135
5.2.5. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti mješavine biomase.....	136
5.3. Analizirana svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase	136
5.3.1. Fizikalno-kemijska svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase	136
5.3.1.1. Pojedinačna i nasipna gustoća peleta od pojedinačnih vrsta biomase.....	137
5.3.1.2. Udio vlage peleta od pojedinačnih vrsta biomase	138
5.3.1.3. Udio pepela peleta od pojedinačnih vrsta biomase	138
5.3.1.4. Udio fiksiranog ugljika peleta od pojedinačnih vrsta biomase	139
5.3.1.5. Udio koksa peleta od pojedinačnih vrsta biomase	139
5.3.1.6. Udio hlapljivih tvari peleta od pojedinačnih vrsta biomase	140
5.3.2. Elementarni sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase	140
5.3.2.1. Udio ugljika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	140
5.3.2.2. Udio vodika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	141
5.3.2.3. Udio dušika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	141
5.3.2.4. Udio kisika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	142
5.3.2.5. Udio sumpora u peletima od pojedinačnih vrsta biomase.....	142
5.3.2.6. H/C i O/C omjer peleta od pojedinačnih vrsta biomase.....	143
5.3.3. Kemijski sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase	143
5.3.3.1. Udio celuloze u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	143
5.3.3.2. Udio lignina u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	144
5.3.3.3. Udio hemiceluloze u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	144
5.3.3.4. Udio ekstraktivnih tvari u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	145
5.3.4. Mineralni sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase.....	145
5.3.4.1. Sadržaj makroelemenata u peletima od pojedinačnih vrsta biomase	146
5.3.4.2. Sadržaj mikroelemenata u peletima od pojedinačnih vrsta biomase.....	148
5.3.5. Ogrjevna vrijednost peleta od pojedinačnih vrsta biomase	149
5.3.5.1. Gornja i donja ogrjevna vrijednost peleta od pojedinačnih vrsta biomase ...	149
5.3.6. Mehanička svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase	150
5.3.6.1. Mehanička izdržljivost peleta od pojedinačnih vrsta biomase	150
5.3.6.2. Tlačna čvrstoća peleta od pojedinačnih vrsta biomase	151
5.4. Ponderirani proračun analiziranih svojstava peleta od mješavina biomase	151
5.4.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava peleta od mješavina biomase	152

5.4.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava peleta od mješavina biomase	152
5.4.2.1. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera peleta od mješavina biomase	152
5.4.3. Ponderirani proračun kemijskog sastava peleta od mješavina biomase	152
5.4.4. Ponderirani proračun mineralnog sastava peleta od mješavina biomase.....	153
5.4.4.1. Ponderirani proračun sadržaja makroelemenata u peletima od mješavina biomase.....	153
5.4.4.2. Ponderirani proračun sadržaja mikroelemenata u peletima od mješavina biomase.....	153
5.4.5. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti peleta od mješavina biomase	153
5.4.6. Ponderirani proračun mehaničkih svojstava peleta od mješavina biomase	153
5.5. Emisije dimnih plinova pri izgaranju peleta.....	154
5.5.1. Emisije dimnih plinova pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase	154
5.5.1.1. Koncentracija CO pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase	155
5.5.1.2. Koncentracija NO _x pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase	155
5.5.1.3. Koncentracija NO pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase	156
5.5.1.4. Koncentracija NO ₂ pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase	157
5.5.1.5. Koncentracija SO ₂ pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase.....	157
5.5.1.6. Koncentracija O ₂ pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase	158
5.5.1.7. Koncentracija CO ₂ pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase	158
5.5.2. Ponderirani proračun emisije dimnih plinova pri izgaranju peleta od mješavina biomase	159
5.5.2.1. Ponderirani proračun koncentracija CO, NO _x , NO, NO ₂ i SO ₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase.....	159
5.5.2.2. Ponderirani proračun udjela plinova O ₂ i CO ₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase	160
6. ZAKLJUČAK.....	161
7. LITERATURA.....	163
8. PRILOZI.....	203

INFORMACIJE O MENTORIMA

Prof. dr. sc. Alan Antonović

Alan Antonović, redoviti profesor, rođen je 26. ožujka 1975. godine u Varaždinu. Diplomirao je drvenu tehnologiju na Sveučilištu u Zagrebu Šumarskom fakultetu 1998. godine. Na istom je fakultetu zaposlen od 1999. godine. Magisterij znanosti stekao je 2004. godine, a doktorat znanosti 2008. godine. U znanstveno zvanje znanstvenog savjetnika izabran je 2012. godine, a od 2024. godine u zvanju je redovitog profesora u trajnom izboru.

Na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije sudjeluje u izvođenju nastave na prijediplomskim, diplomskim i poslijediplomskim studijima. Tijekom akademske karijere obnašao je niz odgovornih dužnosti, uključujući funkcije prodekana za znanstveno-istraživački rad, voditelja prijediplomskog studija Drvna tehnologija te prodekana Drvnotehnološkog odsjeka. Voditelj je Laboratorija za kemiju lignocelulozne biomase, član Vijeća biotehničkog područja Sveučilišta u Zagrebu te dopisni član Akademije šumarskih znanosti.

Njegov znanstveno-istraživački rad usmjeren je na kemiju drva i lignocelulozne biomase, kemijsku modifikaciju drva, razvoj biokompozita i drvno-plastičnih kompozita, sintezu bioadheziva i biopolimera, tehnologiju ploča na bazi drva te proizvodnju biogoriva iz drvne i poljoprivredne biomase. Tijekom znanstveno-istraživačke karijere sudjelovao je kao voditelj ili suradnik u provedbi brojnih nacionalnih i međunarodnih znanstveno-istraživačkih projekata financiranih od Hrvatske zaklade za znanost, Ministarstva znanosti i obrazovanja, Ministarstva poljoprivrede te fondova Europske unije. Vodio je projekte usmjerene na razvoj bioadheziva, inovativnih peleta, biokompozita i bioplastičnih proizvoda iz drvne biomase te uspješno surađivao s gospodarstvom na istraživačko-razvojnim projektima iz područja drvne tehnologije i bioenergije.

Autor je ili koautor 142 znanstvena i stručna rada. Rezultate svojih istraživanja predstavio je na brojnim domaćim i međunarodnim znanstvenim skupovima te aktivno sudjeluje u razvoju novih tehnologija i materijala temeljenih na obnovljivim izvorima biomase.

Aktivan je recenzent domaćih i međunarodnih znanstvenih časopisa, član programskih odbora međunarodnih znanstvenih skupova te se stručno usavršavao na Biotehničkom fakultetu Sveučilišta u Ljubljani i Nacionalnom kemijskom institutu u Ljubljani. Za inovaciju *Utekućeno drvo - inovativna primjena u drvnoj industriji* nagrađen je brončanom medaljom na Međunarodnoj izložbi inovacija ARCA 2016.

Izv. prof. dr. sc. Nikola Bilandžija

Nikola Bilandžija, izvanredni profesor, rođen je 9. travnja 1982. godine u Zagrebu. Diplomirao je 2008. godine na Sveučilištu u Zagrebu Agronomskom fakultetu, gdje se 2009. godine zaposlio kao asistent na Zavodu za mehanizaciju poljoprivrede. Doktorski rad obranio je 2015. godine. U znanstveno zvanje znanstvenog suradnika izabran je 2015. godine, u zvanje višeg znanstvenog suradnika 2021. godine, u znanstveno-nastavno zvanje docenta 2016. godine, a u zvanje izvanrednog profesora 2022. godine.

Na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu sudjeluje u izvođenju nastave na prijediplomskim, diplomskim i poslijediplomskim studijima. Od 2020. godine koordinator je više kolegija iz područja poljoprivredne mehanizacije, energetske kulture i održivih agroekosustava. Od 2021. godine obnaša dužnost predstojnika Zavoda za mehanizaciju i autonomne sustave u poljoprivredi te koordinatora Odsjeka za poljoprivredno inženjerstvo.

Njegova su istraživanja usmjerena na poljoprivrednu mehanizaciju, energetske kulture, obnovljive izvore energije, fitoremedijaciju, sekvestraciju ugljika, primjenu bespilotnih letjelica u poljoprivredi te ublažavanje klimatskih promjena.

Tijekom znanstveno-istraživačke karijere sudjelovao je kao voditelj ili suradnik u provedbi brojnih nacionalnih i međunarodnih znanstvenih, stručnih i razvojnih projekata financiranih kroz programe Obzor 2020, Hrvatske zaklade za znanost, NATO-a, Nacionalnog plana oporavka i otpornosti te fondova Europske unije.

Autor je ili koautor 131 znanstvenog rada. Koautor je fakultetskih priručnika, poglavlja u sveučilišnim udžbenicima i znanstvenim knjigama, a rezultate svojih istraživanja predstavio je na brojnim međunarodnim znanstvenim skupovima.

Aktivno sudjeluje u radu uredništava međunarodnih znanstvenih časopisa, član je organizacijskih i programskih odbora međunarodnih konferencija te recenzent velikog broja znanstvenih radova. Za svoj znanstveni i inovacijski rad primio je više priznanja, među kojima se ističu dvije nagrade Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta za znanstvenu izvrsnost, Državna nagrada za znanost za 2024. godinu te više zlatnih medalja i posebnih priznanja na domaćim i međunarodnim izložbama inovacija. Sudjelovao je i kao suizumitelj na europskom i hrvatskom patentu.

SAŽETAK

Biomasa ima važnu ulogu u kružnom biogospodarstvu i predstavlja značajnu alternativu fosilnim gorivima, pri čemu šumska biomasa zauzima vodeće mjesto među sirovinama za proizvodnju peleta. Međutim, rastuća potražnja za peletima i ograničena dostupnost drvene sirovine upućuju na potrebu pronalaženja dodatnih izvora sirovine za proizvodnju krutih biogoriva. U tom se kontekstu poljoprivredna biomasa nameće kao moguća djelomična zamjena za šumsku biomasu zbog velike raspoloživosti i godišnje dostupnosti.

U radu je istražen utjecaj omjera šumske i poljoprivredne biomase na svojstva peleta, s naglaskom na energetska i mehanička svojstva te emisije dimnih plinova pri izgaranju. Kao šumska biomasa korišten je hrast lužnjak, dok su kao poljoprivredne biomase korištene slama soje i pšenice te stabljike kukuruza i suncokreta. Peleti su proizvedeni iz pojedinačnih vrsta biomase i njihovih mješavina u masenim omjerima 75:25, 50:50 i 25:75.

Rezultati su pokazali da vrsta i udio poljoprivredne biomase značajno utječu na kvalitetu peleta te da nisu sve jednako prikladne za miješanje s drvnom biomasom. Najbolje rezultate pokazale su mješavine sa sojom, pri čemu se posebno istaknula mješavina hrasta i soje u omjeru 75:25, kod koje je najveći broj analiziranih svojstava zadovoljio kriterije najviše klase A1 prema normi EN ISO 17225. Time je potvrđeno da soja ima najmanji negativan utjecaj na kvalitetu peleta te predstavlja najpovoljniju poljoprivrednu biomasu za miješanje s drvnom.

Ispitivanja dimnih plinova pokazala su da su kod peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa najniže koncentracije emisijskih parametara utvrđene kod peleta od hrasta. Kod peleta proizvedenih od mješavina biomasa najniže koncentracije CO, NO₂ i SO₂ zabilježene su kod mješavine hrasta i soje u omjeru 75:25, dok su najniže vrijednosti NO_x i NO utvrđene kod mješavine hrasta i kukuruza u istom omjeru. Uzimajući u obzir kvalitetu peleta i emisijska svojstva tijekom izgaranja, najpovoljnijom se pokazala mješavina hrasta i soje u omjeru 75:25. Na temelju provedenih istraživanja može se zaključiti da odgovarajući odabir vrste poljoprivredne biomase i njezina udjela u mješavini sa šumskom biomasom omogućuje proizvodnju peleta zadovoljavajuće kvalitete uz povoljnija emisijska svojstva tijekom izgaranja.

Ključne riječi: šumska biomasa, poljoprivredna biomasa, hrast lužnjak, kukuruz, pšenica, soja, suncokret, peleti, energetska svojstva, mehanička svojstva, emisije dimnih plinova.

ABSTRACT

Biomass plays an important role in the circular bioeconomy and represents a significant alternative to fossil fuels, with forest biomass being the primary raw material for pellet production. However, increasing demand for pellets and the limited availability of woody biomass highlight the need to identify additional feedstocks for the production of solid biofuels. In this context, agricultural biomass has emerged as a potential partial substitute for forest biomass due to its high availability and annual renewability.

This study investigated the influence of different forest-to-agricultural biomass ratios on pellet properties, with particular emphasis on energy and mechanical properties, as well as flue gas emissions during combustion. Pedunculate oak was used as the forest biomass, while soybean and wheat straw together with corn and sunflower stalks were used as agricultural biomasses. Pellets were produced from individual biomass types and their mixtures at mass ratios of 75:25, 50:50, and 25:75.

The results showed that both the type and proportion of agricultural biomass significantly affected pellet quality and that not all agricultural biomasses were equally suitable for blending with woody biomass. The best results were obtained for soybean containing mixtures, with the oak-soybean mixture at a 75:25 ratio showing the highest number of analysed properties that met the requirements of the highest quality class (A1) according to the EN ISO 17225 standard. These findings confirmed that soybean biomass had the least adverse effect on pellet quality and represents the most suitable agricultural biomass for blending with woody biomass.

Flue gas analysis showed that, among pellets produced from individual biomass types, the lowest concentrations of the analysed emission parameters were recorded for oak pellets. Among pellets produced from biomass mixtures, the lowest concentrations of CO, NO₂ and SO₂ were obtained for the oak-soybean mixture at a 75:25 ratio, whereas the lowest NO_x and NO concentrations were recorded for the oak-corn mixture at the same ratio. Considering both pellet quality and flue gas emissions during combustion, the oak-soybean mixture at a 75:25 ratio proved to be the most favourable.

Based on the obtained results, it can be concluded that appropriate selection of the agricultural biomass type and its proportion in mixtures with forest biomass enables the production of pellets with satisfactory quality and improved emission performance during combustion.

Keywords: forest biomass, agricultural biomass, pedunculate oak, corn, wheat, soybean, sunflower, pellets, energy properties, mechanical properties, flue gas emissions.

POPIS SLIKA

Slika 1. Ukupna svjetska opskrba energijom u 2023. godini	5
Slika 2. Udio energije iz OIE u EU-27	6
Slika 3. Ukupna globalna opskrba biomasom u 2023. godini	7
Slika 4. Rasprostranjenost hrasta lužnjaka u Europi i dijelu Azije	11
Slika 5. Kemijska struktura lignocelulozne biomase	16
Slika 6. Kemijska struktura celuloze	16
Slika 7. Kemijska struktura lignina	17
Slika 8. Kemijska struktura hemiceluloze	17
Slika 9. Tehnologija pretvorbe biomase	23
Slika 10. Shematski prikaz procesa izgaranja biomase	23
Slika 11. Fizikalne tehnike pretvorbe biomase	24
Slika 12. Globalna proizvodnja peleta u 2024. godini	29
Slika 13. Shematski prikaz procesa prešanja peleta	30
Slika 14. Utjecaj udjela vlage u sirovini na formiranje peleta	31
Slika 15. Shematski prikaz rada mlina čekićara	31
Slika 16. Konstrukcija preša za peletiranje	32
Slika 17. Shematski prikaz procesa prešanja	33
Slika 18. Temperature na matrici tijekom prešanja sirovine	33
Slika 19. Omjer kompresije L/d_k pri prešanju sirovine	34
Slika 20. Mehanizam vezivanja čestica sirovine tijekom prešanja	34
Slika 21. Shematski prikaz određivanja tlačne čvrstoće	37
Slika 22. Shematski prikaz glavnih dijelova peći na pelete	38
Slika 23. Shematski prikaz sustava kotla na pelete	39
Slika 24. Odkoreni i usitnjeni ostaci hrasta	44
Slika 25. Poljoprivredna biomasa u obliku bala	45
Slika 26. Sušenje drvne i poljoprivredne biomase u sušioniku	45
Slika 27. Određivanje udjela vlage na analizatoru KERN	46
Slika 28. Usitnjavanje biomase na mlinu sjekaču	46
Slika 29. Usitnjavanje biomase na mlinu čekićaru i kontrola zagrijavanja uzorka	47
Slika 30. Shematski prikaz uzorkovanja	47
Slika 31. Prosijavanje uzoraka na sitotresilici	48
Slika 32. Određivanje nasipne gustoće biomase i peleta	48

Slika 33. Određivanje udjela vlage u laboratorijskom sušioniku	49
Slika 34. Analiza udjela pepela u mufolnoj peći	50
Slika 35. Analiza elementarnog sastava u CHNS analizatoru	52
Slika 36. Analiza gornje ogrjevne vrijednosti pomoću kalorimetra	53
Slika 37. Analiza mikro i makro elemenata	54
Slika 38. Analiza ekstraktivnih tvari pomoću Soxhlet ekstraktora	55
Slika 39. Određivanje udjela celuloze na vodenj kupelji	56
Slika 40. Analiza udjela lignina pomoću magnetne mješalice s grijačem	57
Slika 41. Shematski prikaz odnosa teorijske i analizirane vrijednosti	58
Slika 42. Usitnjavanje biomase za prešanje pomoću mlina čekićara	60
Slika 43. Kondicioniranje biomase za prešanje u klima komori	61
Slika 44. Preša KAHL 14-175	62
Slika 45. Konstrukcijski dijelovi preše i postupak prešanja	62
Slika 46. Analiza pojedinačne gustoće peleta	63
Slika 47. Shematski prikaz mjerenja duljine i promjera peleta	64
Slika 48. Analiza mehaničke izdržljivosti peleta	65
Slika 49. Shematski prikaz komore uređaja za ispitivanje MI peleta	65
Slika 50. Ispitivanje TČ peleta u radijalnom smjeru	66
Slika 51. Analizator dimnih plinova TESTO 350	67
Slika 52. Shematski prikaz mjesta uzorkovanja dimnih plinova	67
Slika 53. Prikaz mjerenja koncentracija plinova	68

POPIS TABLICA

Tablica 1. Omjer žetveni ostaci/zrno pojedinih poljoprivrednih kultura.....	10
Tablica 2. Procjena prinosa žetvenih ostataka istraživanih poljoprivrednih kultura.....	10
Tablica 3. Zasijane površine i prinosi soje u RH od 2022. do 2025. godine.....	12
Tablica 4. Zasijane površine i prinosi kukuruza u RH od 2022. do 2025. godine	13
Tablica 5. Zasijane površine i prinosi pšenice u RH od 2022. do 2025. godine	14
Tablica 6. Zasijane površine i prinosi suncokreta u RH od 2022. do 2025. godine.....	15
Tablica 7. Kemijski sastav pojedinih vrsta biomase (%)......	18
Tablica 8. Udio gorivih tvari u pojedinim vrstama biomase (%)	20
Tablica 9. Udio negorivih tvari u pojedinim vrstama biomase (%)	21
Tablica 10. Gornja i donja ogrjevna vrijednost pojedinih vrsta biomase (MJ kg ⁻¹).....	22
Tablica 11. Norme koje se koriste za čvrsta biogoriva.....	25
Tablica 12. Granične vrijednosti drvnih peleta za neindustrijsku primjenu.....	26
Tablica 13. Granične vrijednosti drvnih peleta za industrijsku primjenu.....	27
Tablica 14. Granične vrijednosti nedrvnih peleta.....	28
Tablica 15. Proizvodnja krutih biogoriva u RH od 2021. do 2024. godine.....	29
Tablica 16. Granične vrijednosti emisija za CO i NO _x prema regulativi RH i EU.....	41
Tablica 17. Klasifikacija %E prema veličini odstupanja.....	59
Tablica 18. Molekularne mase analiziranih plinova (g/mol).....	69
Tablica 19. Granulometrijski sastav analiziranih biomasa nakon usitnjavanja (%).....	70
Tablica 20. Udio vlage, pepela, C _{fix} , HT (%) i NG (kg/m ³) u analiziranim biomasama	71
Tablica 21. Udio C, H, N, O i S u analiziranim biomasama (%)	72
Tablica 22. H/C i O/C omjeri analiziranih biomasa	73
Tablica 23. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u analiziranim biomasama (%)	73
Tablica 24. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u analiziranim biomasama (mg/kg)	74
Tablica 25. Sadržaj Mn, Ni i Cu u analiziranim biomasama (mg/kg).....	75
Tablica 26. Gornja i donja ogrjevna vrijednost analiziranih biomasa (MJ kg ⁻¹).....	75
Tablica 27. Udio vlage, pepela i C _{fix} u analiziranim mješavinama biomase (%).....	77
Tablica 28. Udio koksa i HT (%) te NG (kg/m ³) u analiziranim mješavinama biomase	78
Tablica 29. Udio C, H, N, O i S u analiziranim mješavinama biomase (%)	79
Tablica 30. H/C i O/C omjeri analiziranih mješavina biomase	80
Tablica 31. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u analiziranim mješavinama biomase (%).....	81

Tablica 32. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u analiziranim mješavinama biomase (mg/kg).....	82
Tablica 33. Sadržaj Mn, Ni i Cu u analiziranim mješavinama biomase (mg/kg).....	83
Tablica 34. Gornja i donja ogrjevna vrijednost analiziranih mješavina biomase (MJ kg ⁻¹).....	84
Tablica 35. Ponderirani proračun ΔY i %E za NG, udio vlage i pepela u mješavinama biomase	85
Tablica 36. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio C _{fix} , koksa i HT u mješavinama biomase	86
Tablica 37. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio C, H i N u mješavinama biomase.....	86
Tablica 38. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio O i S u mješavinama biomase	87
Tablica 39. Ponderirani proračun ΔY i %E za H/C i O/C omjer mješavina biomase	87
Tablica 40. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u mješavinama biomase	88
Tablica 41. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Fe, Ca, K i Na u mješavinama biomase	88
Tablica 42. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Mn, Ni i Cu u mješavinama biomase..	89
Tablica 43. Ponderirani proračun ΔY i %E za GOV i DOV mješavina biomase.....	89
Tablica 44. Promjer, duljina, masa i volumen peleta od pojedinačnih biomasa.....	90
Tablica 45. PG i NG peleta od pojedinačnih biomasa (kg/m ³)	91
Tablica 46. Udio vlage, pepela, C _{fix} , koksa i HT u peletima od pojedinačnih biomasa (%)	91
Tablica 47. Udio C, H, N, O i S u peletima od pojedinačnih biomasa (%).....	92
Tablica 48. H/C i O/C omjeri peleta od pojedinačnih biomasa.....	93
Tablica 49. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u peletima od pojedinačnih biomasa (%)	93
Tablica 50. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u peletima od pojedinačnih biomasa (mg/kg)	94
Tablica 51. Sadržaj Mn, Ni i Cu u peletima od pojedinačnih biomasa (mg/kg)	95
Tablica 52. GOV i DOV peleta od pojedinačnih biomasa (MJ kg ⁻¹)	96
Tablica 53. MI (%) i TČ (MPa) peleta od pojedinačnih biomasa	96
Tablica 54. Promjer, duljina, masa i volumen peleta od mješavina biomase	97
Tablica 55. PG i NG peleta od mješavina biomase (kg/m ³).....	98
Tablica 56. Udio vlage, pepela, C _{fix} , koksa i HT (%) u peletima od mješavina biomase	99
Tablica 57. Udio C, H, N, O i S u peletima od mješavina biomase (%)	100
Tablica 58. H/C i O/C omjeri peleta od mješavina biomase	101
Tablica 59. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u peletima od mješavina biomase (%)	102
Tablica 60. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u peletima od mješavina biomase (mg/kg).....	103

Tablica 61. Sadržaj Mn, Ni i Cu u peletima od mješavina biomase (mg/kg).....	104
Tablica 62. GOV i DOV peleta od mješavina biomase (MJ kg^{-1}).....	105
Tablica 63. MI (%) i TČ (MPa) peleta od mješavina biomase	106
Tablica 64. Ponderirani proračun ΔY i %E za PG, NG, udjele vlage i pepela u peletima od mješavina biomase	107
Tablica 65. Ponderirani proračun ΔY i %E za udjele C_{fix} , koksa i HT u peletima od mješavina biomase.....	107
Tablica 66. Ponderirani proračun ΔY i %E za udjele C, H i N u peletima od mješavina biomase.....	108
Tablica 67. Ponderirani proračun ΔY i %E za udjele O i S u peletima od mješavina biomase	108
Tablica 68. Ponderirani proračun ΔY i %E za H/C i O/C omjere peleta od mješavina biomase	109
Tablica 69. Ponderirani proračun ΔY i %E za udjele celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u peletima od mješavina biomase.....	109
Tablica 70. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Fe, Ca, K i Na u peletima od mješavina biomase.....	110
Tablica 71. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Mn, Ni i Cu u peletima od mješavina biomase.....	110
Tablica 72. Ponderirani proračun ΔY i %E za GOV i DOV peleta od mješavina biomase ..	111
Tablica 73. Ponderirani proračun ΔY i %E za MI i TČ peleta od mješavina biomase.....	111
Tablica 74. Masene koncentracije CO , NO_x , NO , NO_2 i SO_2 (mg/m^3 ; referentni udio O_2 10%) pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa	112
Tablica 75. Masene koncentracije CO , NO_x , NO , NO_2 i SO_2 (mg/m^3 ; referentni udio O_2 11%) pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa	113
Tablica 76. Volumni udjeli O_2 i CO_2 pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa (%).....	114
Tablica 77. Masene koncentracije CO , NO_x , NO , NO_2 i SO_2 (mg/m^3 ; referentni udio O_2 10%) pri izgaranju peleta od mješavina biomase	115
Tablica 78. Masene koncentracije CO , NO_x , NO , NO_2 i SO_2 (mg/m^3 ; referentni udio O_2 11%) pri izgaranju peleta od mješavina biomase	116
Tablica 79. Volumni udjeli O_2 i CO_2 pri izgaranju peleta od mješavina biomase (%)	117
Tablica 80. Ponderirani proračun ΔY i %E za CO , NO_x i NO pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O_2 10%)	118

Tablica 81. Ponderirani proračun ΔY i %E za NO_2 i SO_2 pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O_2 10%)	118
Tablica 82. Ponderirani proračun ΔY i %E za CO , NO_x i NO pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O_2 11%).....	119
Tablica 83. Ponderirani proračun ΔY i %E za NO_2 i SO_2 pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O_2 11%).....	119
Tablica 84. Ponderirani proračun ΔY i %E za O_2 i CO_2 pri izgaranju peleta od mješavina biomase.....	120

1. UVOD

Potaknuta izazovima klimatskih promjena, energetske sigurnošću i smanjenjem ovisnosti o fosilnim gorivima, Europska unija (EU) provodi energetske tranzicije temeljene na povećanju udjela obnovljivih izvora energije (OIE) i smanjenju emisija stakleničkih plinova (GHG). U tom kontekstu donesena je Direktiva (EU) 2023/2413 (RED III), kojom su izmijenjene odredbe Direktive (EU) 2018/2001 (RED II), s ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. i povećanja udjela OIE na najmanje 42,5% u ukupnoj potrošnji energije. Donošenje Direktive RED III dodatno je potaknuto planom REPowerEU, usmjerenim na jačanje energetske neovisnosti i ubrzanje primjene obnovljivih izvora energije (EUR-Lex 2023/2413, 2023.). Prema Direktivi RED II, biomasa je definirana kao biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede, šumarstva i srodnih djelatnosti te biorazgradivi dio industrijskog i komunalnog otpada biološkog podrijetla. Biomasa se smatra jednim od značajnijih obnovljivih izvora energije zbog mogućnosti energetske uporabe i potencijalno neutralnog utjecaja na emisije CO₂ tijekom životnog ciklusa, pod uvjetom da se koristi na održiv način (Ahamer, 2024.).

Biomasa se može koristiti za proizvodnju toplinske i električne energije, pri čemu se peleti ističu kao jedan od najzastupljenijih oblika krutih biogoriva. Njihova proizvodnja iz drvene i poljoprivredne biomase sve je raširenija zbog povoljnih energetske, ekonomske i okolišne svojstava (Rodino i sur., 2024.). Tijekom procesa prešanja biomasa se mehanički komprimira, čime se njezina nasipna gustoća može povećati i do deset puta, što značajno olakšava transport, skladištenje i rukovanje gorivom. Jedan od glavnih nedostataka sirove biomase je niska nasipna gustoća, koja ovisi o vrsti materijala te je kod drvene biomase najčešće između 150 i 200 kg/m³, kod trave od 40 do 150 kg/m³, a kod poljoprivrednih ostataka od 80 do 100 kg/m³ (Pradhan i sur., 2018.). Prešanjem se taj nedostatak uvelike uklanja, uz istodobno povećanje energetske gustoće goriva. Peleti proizvedeni iz drvene biomase u pravilu imaju veću ogrjevnu vrijednost i niži udio pepela, dok peleti od poljoprivredne biomase mogu pokazivati veću varijabilnost svojstava, ali i dalje predstavljaju vrijedan obnovljivi izvor energije (Cui i sur., 2021.).

Sokhansanj i sur. (2010.) utvrdili su da su troškovi transporta rasute kukuruzovine na udaljenosti od 50 kilometara čak deset puta veći u odnosu na transport prešane kukuruzovine, što potvrđuje važnost povećanja nasipne gustoće biomase radi učinkovitijeg transporta i skladištenja. Zbog ograničene raspoloživosti drvene biomase, istraživanja su sve više usmjerena na alternativne sirovine koje se mogu koristiti samostalno ili u kombinaciji s drvnom biomasom u proizvodnji peleta. U tom kontekstu poljoprivredna biomasa ističe se kao značajan resurs

zbog svoje dostupnosti i energetskeg potencijala. Husnjak i sur. (2023.) navode da je 2020. u Hrvatskoj bilo 870 626 hektara (ha) neiskorištenog poljoprivrednog zemljišta, što upućuje na značajan potencijal za povećanje proizvodnje biomase za energetske potrebe.

Miješanje drvene i poljoprivredne biomase može pridonijeti učinkovitijem iskorištavanju raspoloživih sirovina te prilagodbi svojstava peleta različitim zahtjevima tržišta (Zlateva i sur., 2024.). Unatoč sve većem broju istraživanja, još uvijek nema dovoljno podataka o kvaliteti peleta proizvedenih od mješavina drvene i poljoprivredne lignocelulozne biomase te o utjecaju sastava sirovine na njihova fizikalno-kemijska, mehanička i energetska svojstva. Budući da svojstva sirovine izravno utječu na kvalitetu peleta, učinkovitost izgaranja i emisije dimnih plinova, potrebno je dodatno istražiti mogućnosti korištenja različitih mješavina biomase za proizvodnju kvalitetnih krutih biogoriva (da Silva i sur., 2020.).

Kemijski sastav biomase, posebno udio ugljika (C), vodika (H), kisika (O) i mineralnih elemenata, značajno utječe na kvalitetu peleta, njihovu ogrjevnju vrijednost i emisije tijekom izgaranja. Veći udio C povezan je s većom ogrjevnju vrijednošću i učinkovitijim izgaranjem, dok povećani udio vlage smanjuje energetske učinkovitost goriva te može uzrokovati nepotpuno izgaranje i povećane emisije onečišćujućih tvari (Oberberger i Thek, 2004.; Ungureanu, 2018.). Udio pepela jedan je od najvažnijih pokazatelja kvalitete biomase. Biomasa bogata mineralnim elementima, poput klora (Cl), silicija (Si), kalcija (Ca), sumpora (S), kalija (K), magnezija (Mg), natrija (Na) i fosfora (P), može uzrokovati stvaranje naslaga i taloženje pepela u sustavima za izgaranje, čime se smanjuje njihova učinkovitost i povećavaju zahtjevi za održavanje (Abioye i sur., 2023.). Povećanje udjela pepela za 1% može smanjiti ogrjevnju vrijednost biomase za približno $0,2 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Sulaiman i Abdullah, 2014.).

Kemijski i mineralni sastav utječe i na sastav dimnih plinova te ponašanje pepela tijekom izgaranja. Povećani udjeli elemenata poput Al, Si, K, Mg i Ca mogu povećati emisije sitnih čestica i pridonijeti stvaranju naslaga u ložištu (González i sur., 2011.). Posebno je značajan silicij, koji je često prisutan u poljoprivrednim ostacima i može uzrokovati stvaranje staklastih naslaga, taloženje pepela i koroziju sustava za izgaranje (Sundberg, 2021.).

Tijekom nepotpunog izgaranja peleta može doći do stvaranja ugljičnog monoksida (CO), osobito pri većem udjelu vlage, nižim temperaturama izgaranja ili nepravilnom dovodu zraka. Peleti s većim udjelom C i H tijekom izgaranja proizvode veće količine ugljičnog dioksida (CO₂) i vode (H₂O), dok veći udio O pogoduje lakšem pokretanju procesa izgaranja, ali istodobno smanjuje energetske vrijednost goriva (Kabir i sur., 2022.). Mineralni elementi također značajno utječu na emisije i ponašanje pepela tijekom izgaranja. Kalij (K) i natrij (Na) mogu reagirati s klorom (Cl) te stvarati fine čestice kalijeva i natrijeva klorida, dok sumpor (S)

može pridonijeti nastanku sumpornog dioksida (SO_2), sumporovodika (H_2S) i sulfatnih spojeva. Dušik (N) sadržan u biomasi može rezultirati emisijama dušikovih oksida (NO_x), koji sudjeluju u nastanku smoga i kiselih kiša (Sippula, 2010.; Larki i sur., 2023.).

Svojstva biomase značajno utječu i na proces prešanja. Veća gustoća sirovine može povećati učinkovitost procesa, dok optimalan udio vlage između 8 i 12% u sirovini omogućuje pravilno oblikovanje peleta i smanjuje trošenje opreme. Važnu ulogu ima lignin, koji pri povišenim temperaturama omekšava i djeluje kao prirodno vezivo tijekom formiranja peleta (Antonović i sur., 2017.). Zbog toga su kontrola procesa sušenja, usitnjavanja i prešanja te poznavanje fizikalno-kemijskih, kemijskih, elementarnih i mehaničkih svojstava biomase ključni za proizvodnju kvalitetnih peleta i učinkovitu energetske uporabu biomase (Anukam i sur., 2021.; Velázquez Martí i sur., 2023.).

U kontekstu kvalitete peleta posebno su važne međunarodne norme koji definiraju zahtjeve za njihova fizikalno-kemijska i mehanička svojstva. Jedna od najvažnijih je norma EN ISO 17225, kojom se peleti klasificiraju prema parametrima poput udjela vlage i pepela, ogrjevnog vrijednosti, mehaničke izdržljivosti i dimenzija. Peleti se razvrstavaju u klase kvalitete A1, A2 i B, pri čemu klasa A1 predstavlja najvišu kvalitetu namijenjenu kućanstvima i manjim sustavima grijanja. Biomasa ima značajan potencijal u energetske tranziciji prema obnovljivim izvorima energije te može pridonijeti smanjenju emisija stakleničkih plinova, povećanju energetske sigurnosti i razvoju kružne bioekonomije. Međutim, zbog rastuće potražnje za sirovinama za proizvodnju peleta i ograničene dostupnosti drvene biomase, sve se veća pozornost usmjerava na mogućnosti korištenja poljoprivredne biomase.

Unatoč rastućem interesu za korištenje poljoprivredne biomase u proizvodnji peleta, još uvijek nema dovoljno podataka o utjecaju različitih omjera biomase na kvalitetu peleta i emisijska svojstva tijekom izgaranja. Stoga je cilj ovog doktorskog rada istražiti mogućnosti korištenja poljoprivredne biomase u kombinaciji sa šumskom za proizvodnju peleta prihvatljive kvalitete i zadovoljavajućih emisijskih svojstava. Znanstveni doprinos rada ogleda se u istraživanju utjecaja različitih vrsta i udjela poljoprivredne biomase na fizikalna, kemijska i mehanička svojstva peleta te sastav dimnih plinova tijekom izgaranja. Dobiveni rezultati trebali bi pridonijeti određivanju optimalnih mješavina šumske i poljoprivredne biomase za proizvodnju peleta zadovoljavajuće kvalitete u skladu s važećim normama i prihvatljivim emisijskim karakteristikama.

1.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Ciljevi istraživanja doktorskog rada su, na temelju analize kvalitete peleta dobivenih od mješavina šumske i različitih vrsta te udjela poljoprivredne biomase, odrediti:

- C1.** vrsta poljoprivredne biomase s najmanjim utjecajem na smanjenje kvalitete peleta,
- C2.** najveći udio umiješane poljoprivredne biomase uz očuvanje kvalitete peleta,
- C3.** sastav dimnih plinova izgaranjem peleta različitih vrsta i mješavina šumske i poljoprivredne biomase.

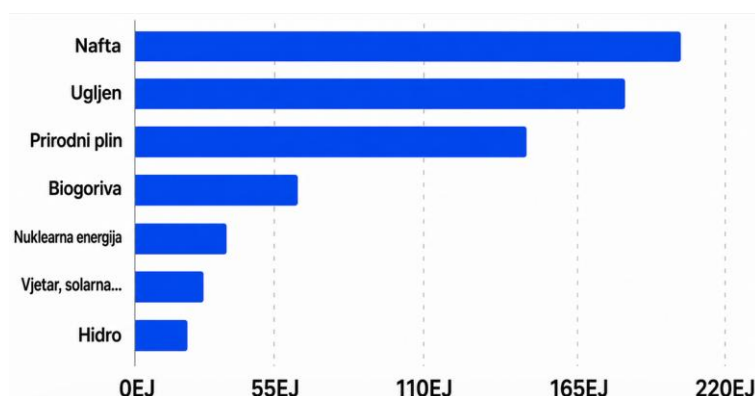
U istraživanju su postavljene hipoteze koje se odnose na utjecaj sastava sirovina na kvalitetu peleta i emisije dimnih plinova te njihovu usklađenost s propisanim standardima. Stoga će se istraživanjem utvrditi sljedeće:

- H1.** umiješavanjem biomase soje u šumsku biomasu dolazi do najmanjeg smanjenja kvalitete peleta,
- H2.** kvaliteta peleta dobivenog miješanjem više od 50% poljoprivredne biomase će biti izvan propisanih standarda,
- H3.** sastav dimnih plinova neće izlaziti izvan propisanih normi bez obzira na vrstu i udio poljoprivredne biomase u peletima.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2.1. Globalna bioenergija

Ukupna globalna opskrba energijom u 2023. godini dosegla je rekordnih 622 eksadžula (EJ) (slika 1). Obnovljivi izvori energije također bilježe povijesno najvišu vrijednost od 92 EJ, što čini približno 15% ukupne opskrbe energijom. Iako njihov rast ostaje relativno umjeren, obnovljivi izvori ostvaruju najveću stopu rasta među svim energetske kategorijama, s povećanjem od 3% na godišnjoj razini. Unutar te skupine posebno se ističe bioenergija, koja s 56 EJ sudjeluje s oko 9% u globalnoj opskrbi energijom, što je dosad najveća zabilježena vrijednost, uz porast od 2% u odnosu na 2022. godinu (IEA, 2025.).



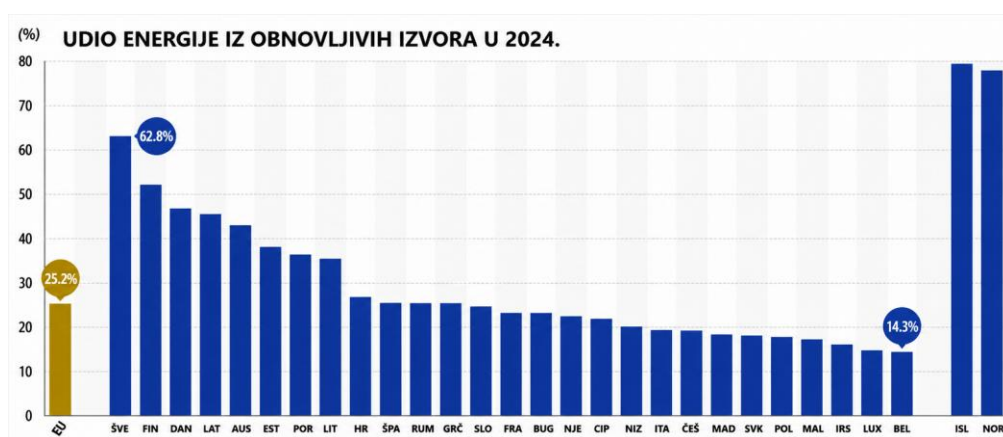
Slika 1. Ukupna svjetska opskrba energijom u 2023. godini (Izvor: WBA, 2025.)

U 2023. godini globalna konačna potrošnja energije dosegla je rekordnih 429 EJ, što predstavlja povećanje od 2% u odnosu na 2022. godinu. Fosilna goriva i dalje dominiraju s udjelom većim od 80% u ukupnoj potrošnji, dok su biogoriva i otpad tijekom proteklog desetljeća zadržali stabilan udio od oko 9%. Ostali obnovljivi izvori energije, uključujući energiju vjetra i sunca, porasli su za 6% u odnosu na prethodnu godinu, iako njihov ukupni udio ostaje relativno skroman. Među obnovljivim izvorima energije posebno se ističu kruta biogoriva, koja čine 85% potražnje za modernom bioenergijom, s doprinosom od 16 EJ, odnosno 3,5% ukupne globalne potrošnje energije. Drvena biomasa, peleti i briketi imaju važnu ulogu u energetske tranziciji zbog mogućnosti korištenja u sustavima grijanja i proizvodnje energije uz smanjenu ovisnost o fosilnim gorivima. (IEA, 2025.).

2.2. Europska energetska politika i zelena tranzicija

Energetska tranzicija dio je šire zelene tranzicije, koju EU definira kao tranziciju gospodarstva i društva radi postizanja klimatskih i ekoloških ciljeva u skladu s europskim „Green Dealom“ (Zelenim planom). Dekarbonizacija energetske sustava zahtijeva strukturnu promjenu u načinu proizvodnje i potrošnje energije, odnosno postupnu zamjenu fosilnih goriva obnovljivim

i niskougljičnim izvorima energije. Potrebno je uvesti poticaje za privatne potrošače i poduzeća kako bi smanjili potrošnju energije, primjerice korištenjem energetski učinkovitih uređaja ili uvođenjem učinkovitijih i čistijih proizvodnih procesa. Iako je energetska tranzicija već bila na dnevnom redu EU-a (Paket čiste energije za sve Europljane - 2019.), europski Zeleni plan dao joj je novi zamah i postao glavni pokretač. Povećanje proizvodnje energije iz OIE donosi društvu brojne prednosti, poput ublažavanja klimatskih promjena, smanjenja emisija onečišćujućih tvari u zraku i poboljšanja energetske sigurnosti. Prema Europskoj komisiji (EK), energetska kriza izazvana ruskom invazijom na Ukrajinu dodatno je ubrzala energetska tranziciju u EU. Od uvođenja Direktive o obnovljivim izvorima energije (2009/28/EZ), udio OIE u potrošnji energije u EU povećao se s 12,5% u 2010. na 25,2% u 2024. godini, kao što je prikazano na slici 2 (EC, 2025a.).



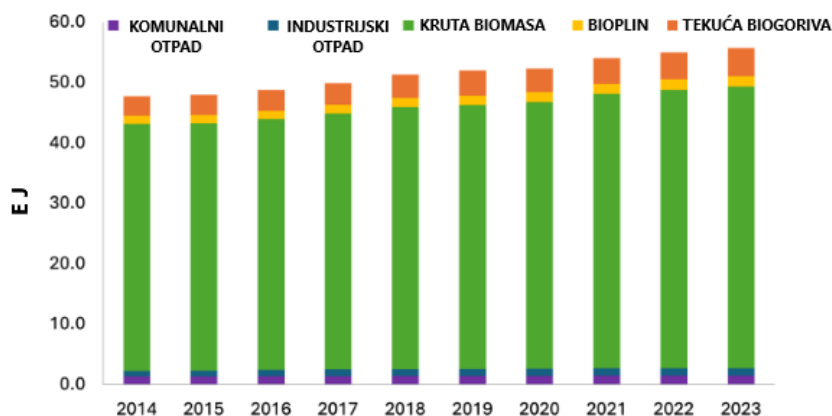
Slika 2. Udio energije iz OIE u EU-27 (Izvor: EC, 2025a.)

Udio OIE u EU više se nego udvostručio od 2005., što je rezultat ciljanih političkih mjera i povećane konkurentnosti OIE. Međutim, ostvarenje ciljeva definiranih Direktivom RED III zahtijeva znatno ubrzanje razvoja obnovljivih izvora energije, a analize pokazuju da je njihovo postizanje malo vjerojatno bez duboke transformacije energetske sustava EU-a koja obuhvaća sve sektore gospodarstva. U tom procesu biomasa i drveni peleti predstavljaju jedan od važnijih obnovljivih izvora energije, posebno u sektoru grijanja i decentralizirane proizvodnje toplinske energije (EEA, 2025.).

2.3. Biomasa kao obnovljivi izvor energije

Drveće i biljke tijekom fotosinteze apsorbiraju CO₂ iz atmosfere te ga pohranjuju u biomasi u obliku organskih spojeva. Tijekom prirodne razgradnje ili izgaranja biomase pohranjeni ugljik ponovno se oslobađa u atmosferu, pri čemu se uz održivo gospodarenje i obnovu biomase ugljikov ciklus može održavati u relativnoj ravnoteži (Matin i sur., 2019.). Biomasa je jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije te se koristi za proizvodnju toplinske i električne

energije te različitih biogoriva. Najznačajniji izvori biomase uključuju šumsku i poljoprivrednu biomasu, organske ostatke i energetske kulture. Posebno važnu ulogu imaju termokemijski procesi pretvorbe, poput izgaranja, koji omogućuju učinkovitu energetske uporabu biomase uz relativno niske emisije SO₂ i NO_x (Španić i sur., 2022.; Jaén i sur., 2025.). Ukupna globalna proizvodnja biomase u 2023. iznosila je 56 EJ, pri čemu je čvrsta biomasa, koja obuhvaća pelete, brikete i tradicionalne oblike korištenja, činila više od 83% ukupne opskrbe bioenergijom (slika 3) (WBA, 2025.).



Slika 3. Ukupna globalna opskrba biomasom u 2023. godini (Izvor: WBA, 2025.)

U Europskoj uniji raspoložive količine biomase najvećim dijelom potječu iz poljoprivrede i šumarstva, koji predstavljaju glavne izvore sirovina za energetske i industrijsku primjenu biomase. Procjenjuje se da je ukupna raspoloživa količina biomase iz primarnih proizvodnih sustava u EU-27 oko 1 milijarda tona (mlrd.t) suhe tvari, pri čemu poljoprivredna proizvodnja sudjeluje s približno 70%, a drvena biomasa s oko 25% ukupne količine (Avitabile i sur., 2023.). Korištenje biomase za proizvodnju energije jedan je od važnijih načina smanjenja ovisnosti o fosilnim gorivima i negativnog utjecaja energetskega sektora na okoliš. Među različitim oblicima krute biomase posebno se izdvajaju drveni peleti zbog homogenog sastava, niskog udjela vlage, visoke energetske gustoće i mogućnosti automatiziranog izgaranja (Kumar i sur., 2015.).

2.4. Vrste i izvori biomase

Biomasa se zbog svoje raznolikosti može klasificirati prema podrijetlu, fizikalnom stanju i kemijskom sastavu (Diaz-Montaño, 2022.). Prema podrijetlu dijeli se na prirodnu, koja nastaje spontano u ekosustavima, i rezidualnu, koja nastaje kao ostatak različitih ljudskih aktivnosti, poput poljoprivrede i drvoprerađivačke industrije. Prema fizikalnom stanju biomasa može biti kruta, tekuća ili plinovita. Kruta biomasa obuhvaća šumske i poljoprivredne ostatke, drvene ostatke i energetske usjeve te predstavlja najvažniju sirovinu za proizvodnju peleta. Tekuća

biomasa uključuje biogoriva, ulja i otpadne vode, dok plinovitu biomasu čini bioplin nastao razgradnjom organskog otpada. U kontekstu ovog istraživanja posebno je važan kemijski sastav biomase, čiji su osnovni strukturni elementi celuloza, hemiceluloza i lignin. Za proizvodnju peleta najčešće se koriste ostaci iz šumarstva i drvoprerađivačke industrije, poput piljevine, drvene sječke i drugih drvnih ostataka (Antonović i sur., 2017.).

2.4.1. Šumska (drvena) biomasa

Zbog svoje dostupnosti i energetskeg potencijala, šumska (drvena) biomasa ima važnu ulogu u globalnoj tranziciji prema obnovljivim izvorima energije. Kao energent posebno je značajna u državama s razvijenom drvoprerađivačkom industrijom i velikim šumskim površinama (Kožuch i sur., 2023.). Tijekom 2023. globalna proizvodnja drvnog goriva premašila je 1,7 milijardi m³ (WBA, 2025.). U Europskoj uniji i Republici Hrvatskoj šume predstavljaju značajan prirodni resurs te zauzimaju približno 39%, odnosno više od 53% ukupne kopnene površine (EC, 2024a.; DZS 97333, 2025.).

Korištenje drva i drvnih ostataka za proizvodnju energije ima brojne prednosti, među kojima se ističu velika dostupnost sirovine, mogućnost obnove kroz održivo gospodarenje šumama te iskorištavanje drvnih ostataka koji bi inače ostali neiskorišteni (Siarudin i sur., 2023.). Nedostaci korištenja drvene biomase uglavnom su povezani s izgaranjem u zastarjelim ili neadekvatnim ložištima, pri čemu može doći do povećanih emisija CO, NO_x, hlapljivih organskih spojeva (VOC) i lebdećih čestica (WHO, 2015.).

Promatrajući kemijski sastav, drvo u prosjeku sadrži oko 43% celuloze, 22% hemiceluloze i 25-30% lignina. Elementarni sastav čini približno 50% C, 44% O, 6% H, 0,5% N i oko 0,05% sumpora (S). Proksimativna analiza pokazuje da čisto drvo sadrži 75-80% hlapljivih tvari (HT), 20-25% fiksiranog ugljika (C_{fix}) i oko 0,6% pepela, dok kora sadrži približno 3% pepela (Nunes i sur., 2017.).

Ogrjevna vrijednost suhog drva kreće se između 17 i 21 MJ kg⁻¹, dok kora može doseći vrijednosti od 19 do 23 MJ kg⁻¹. Četinjače uglavnom imaju nešto veću ogrjevnju vrijednost od listača zbog većeg udjela lignina, voskova i smola, ali pritom mogu uzrokovati izraženije stvaranje naslaga tijekom izgaranja. Zbog povoljnog kemijskog sastava, niskog udjela pepela i dobre ogrjevnje vrijednosti, drvena biomasa predstavlja najvažniju sirovinu za proizvodnju drvnih peleta (Esteves i sur., 2023.).

2.4.2. Poljoprivredna biomasa

Poljoprivredna biomasa obuhvaća različite ostatke i nusproizvode nastale tijekom poljoprivredne proizvodnje i prerade. Najznačajniji izvori uključuju ostatke ratarske

proizvodnje, poput slame, oklaska i kukuruzovine, ostatke voćarsko-vinogradarske proizvodnje te nusproizvode prerade poljoprivrednih sirovina u prehrambenoj industriji, poput komine, koštica i ljuski. U poljoprivrednu biomasu ubrajaju se i energetske kulture, poput miskantusa, sirka i divljeg prosa, koje se uzgajaju radi proizvodnje energije (Krička i sur., 2023.). Procjenjuje se da je ukupni godišnji potencijal poljoprivredne biomase u zemljama EU-27 u razdoblju od 2016. do 2020. godine iznosio oko 924 milijuna tona (Mt) suhe tvari, pri čemu je približno 54% imalo ekonomski iskoristiv potencijal. U proizvodnji biomase dominiraju žitarice i usjevi koji se žanju u zelenom stanju, dok među najznačajnijim poljoprivrednim ostacima prevladavaju ostaci žitarica i uljarica, posebice kukuruzovina te ostaci uljane repice, pšenice i ječma (Avitabile i sur., 2023.). Korištenje poljoprivredne biomase i ostataka u energetske svrhe može pridonijeti smanjenju emisija GHG, boljem iskorištavanju nusproizvoda i ostataka, povećanju energetske samodostatnosti te razvoju kružnog biogospodarstva (Chowdhury i sur., 2025.). Kemijski sastav poljoprivredne biomase ovisi o vrsti i dijelu biljke te uvjetima uzgoja i žetve, a u prosjeku sadrži 40-50% celuloze, 10-25% lignina i 20-30% hemiceluloze. Iako ima značajan energetski potencijal, njezina je primjena u proizvodnji peleta često ograničena zbog većeg udjela pepela, dušika (N) i alkalijskih metala u odnosu na drvenu biomasu, što može negativno utjecati na kvalitetu izgaranja i emisije dimnih plinova (Shahzadi i sur., 2014.).

2.4.3. Žetveni indeks i potencijal poljoprivredne biomase

Žetveni indeks (Harvest Indeks-HI) predstavlja omjer gospodarski korisnog dijela biljke i ukupno proizvedene biomase te se koristi za procjenu učinkovitosti raspodjele biomase. Iako se može izračunati u odnosu na ukupnu nadzemnu i podzemnu biomasu, u praksi se najčešće koristi nadzemna biomasa zbog složenijeg određivanja mase korijena. Prema literaturi, utvrđena je pozitivna korelacija između HI i prinosa zrna te negativna korelacija s biološkim prinomom. Vrijednosti HI razlikuju se među kulturama i ovise o genotipu i uvjetima uzgoja. Za pšenicu se navode vrijednosti od 0,33 do 0,61, za kukuruz od 0,47 do 0,53, za soju od 0,38 do 0,58, a za suncokret od 0,25 do 0,45. Više vrijednosti HI upućuju na veći udio biomase usmjeren prema gospodarski korisnom dijelu biljke (Matin i sur., 2019.).

2.4.4. Izračun prinosa žetvenih ostataka pomoću žetvenog indeksa

Budući da se prinos slame rijetko određuje izravnim mjerenjem, količina žetvenih ostataka najčešće se procjenjuje na temelju prinosa zrna i omjera žetveni ostaci/zrno (tablica 1). Taj omjer omogućuje procjenu količine raspoložive biomase, ali ne daje podatke o njezinoj stvarnoj dostupnosti niti prikladnosti za energetska primjenu (Scarlat i sur., 2019.).

Tablica 1. Omjer žetveni ostaci/zrno pojedinih poljoprivrednih kultura

Kultura	Omjer žetveni ostaci (slama)/zrno
Kukuruz	0,9 / 1,2
Soja	1,2 / 1,5
Pšenica	0,8 / 1,6
Suncokret	2,2 / 3,2

Izvor: Matin i sur. (2019.)

2.4.5. Dostupnost i održivo iskorištavanje žetvenih ostataka u energetske svrhe

Dostupnost žetvenih ostataka za energetske korištenje ograničena je potrebom očuvanja plodnosti tla, sadržaja organske tvari i smanjenja erozije. U literaturi se najčešće navodi da se za energetske svrhe može održivo koristiti oko 40% žetvenih ostataka žitarica te do približno 50% ostataka kukuruza, uljane repice i suncokreta. Stvarna raspoloživost biomase ovisi o vrsti usjeva, klimatskim uvjetima, svojstvima tla, agrotehnici i načinu žetve. Dio žetvenih ostataka ostavlja se na polju ili koristi za stočnu hranu, prostirku i druge poljoprivredne namjene, zbog čega je količina biomase dostupna za proizvodnju energije manja od ukupno proizvedene količine (Panoutsou i sur., 2009.; Scarlat i sur., 2010.).

2.4.6. Procjena prinosa žetvenih ostataka

Prinos žetvenih ostataka najčešće se procjenjuje množenjem prinosa zrna odgovarajućim omjerom ostaci/zrno. Količina raspoložive biomase razlikuje se među kulturama te ovisi o prinosu glavnog proizvoda i omjeru žetvenih ostataka. Procijenjeni prinosi istraživanih kultura prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Procjena prinosa žetvenih ostataka istraživanih poljoprivrednih kultura

Kultura	Srednji omjer (ostaci/zrno)	Prinos zrna (t/ha)				Prinos žetvenih ostataka (t/ha)			
		2022.	2023.	2024.	2025.	2022.	2023.	2024.	2025.
Kukuruz	0,9	6,10	7,40	7,60	6,40	5,49	6,66	6,84	5,76
Soja	1,2	2,10	2,80	2,50	2,30	2,52	3,36	3,00	2,76
Pšenica	0,8	6,00	4,80	5,80	6,70	4,80	3,84	4,64	5,36
Suncokret	2,2	3,00	2,60	3,00	3,00	6,60	5,72	6,60	6,60

Na količinu prikupljenih žetvenih ostataka može utjecati i način žetve, osobito visina košnje. Viša košnja ostavlja veći dio biomase na polju, dok niža omogućuje prikupljanje većih količina slame. Količina ostataka koja se može ukloniti s poljoprivrednih površina prvenstveno ovisi o sadržaju organske tvari i ugljika u tlu. Na tlima siromašnijima organskom tvari potrebno je ostaviti veći dio ostataka radi očuvanja plodnosti i smanjenja erozije, dok je na tlima bogatijima organskom tvari moguće ukloniti veće količine biomase za energetske svrhe. Održiva količina uklonjene biomase može se povećati primjenom alternativnih izvora organske tvari, poput stajskog gnoja, komposta ili ostataka nastalih nakon proizvodnje energije iz biomase (Matin i sur., 2019.).

2.5. Istraživana biomasa

2.5.1. Hrast lužnjak (*Quercus robur* L.)

Hrast lužnjak jedna je od najvažnijih i najvrjednijih vrsta drva u europskom šumarstvu, a značajnu ulogu ima i u hortikulturi. Riječ je o velikom listopadnom drvu iz porodice *Fagaceae*, rasprostranjenom u gotovo cijeloj Europi, Maloj Aziji i na Kavkazu (slika 4). Formira čiste sastojine ili mješovite šume, najčešće u kombinaciji s poljskim jasenom (*Fraxinus angustifolia*), običnim grabom (*Carpinus betulus*) i drugim vrstama. Predstavlja važan izvor drvene biomase zbog velike dostupnosti, visoke gustoće drva i dobre ogrjevne vrijednosti (Eaton i sur., 2016.).



Slika 4. Rasprostranjenost hrasta lužnjaka u Europi i dijelu Azije (Izvor: Caudullo i sur., 2017.)

Posebno značajnu ulogu hrast lužnjak ima u RH, gdje se ubraja među gospodarski i ekološki najvažnije vrste drveća te predstavlja vrijedan izvor drvene biomase i ostataka pogodnih za energetske uporabu. Prema drvnoj zalihi, nalazi se među najzastupljenijim vrstama drveća, s udjelom od približno 11% (HŠ, 2024.). Rasprostranjen je prvenstveno u nizinskim područjima

uz riječne sustave Save, Drave, Dunava i Kupe, gdje formira vrijedne šumske sastojine (Vukelić, 2012.). Značajne površine nalaze se u Slavoniji, Posavini i Spačvanskom bazenu, jednom od najvećih kompleksa nizinskih šuma hrasta lužnjaka u Europi (Dubravac i sur., 2020.; Popović i sur., 2023.).

Ostaci iz šumarstva i drvoprerađivačke industrije imaju važnu ulogu u učinkovitijem iskorištavanju resursa, smanjenju količine otpada te povećanju ekonomske vrijednosti drvene biomase. Tijekom prerade hrastovih trupaca ostaju piljevina, drveni prah, kora, strugotine i manji komadi drva koji se mogu koristiti za proizvodnju toplinske i električne energije, peleta, briketa te različitih proizvoda od drvnih kompozita. Piljevina i sitniji drvni ostaci često se prešaju u pelete i brikete koji se koriste kao kruto gorivo u kućanstvima i industriji. Osim energetske primjene, drvni ostaci mogu poslužiti i kao sirovina za proizvodnju iverice, ploča srednje gustoće (MDF) i drugih kompozitnih drvnih materijala koji imaju široku primjenu u proizvodnji namještaja, građevinarstvu i unutarnjem uređenju prostora. Zbog relativno visoke ogrjevne vrijednosti i dobre dostupnosti nusproizvoda iz drvoprerađivačke industrije, drvni ostaci hrasta lužnjaka predstavljaju vrijednu sirovinu za proizvodnju peleta i drugih oblika biogoriva (Ogbu i sur., 2022.).

2.5.2. Soja (*Glycine max* L.)

Soja pripada porodici *Fabaceae* (*Leguminosae*), odnosno skupini mahunarki (leptirnjača), te je jedna od najvažnijih visokoproteinskih poljoprivrednih kultura na globalnoj razini. Njezino sjeme sadrži visok udio proteina (39-42%) i ulja (19-22%) (Pagano i Miransari, 2016.). Ima važnu ulogu u prehrambenoj industriji, stočarstvu i proizvodnji biogoriva. U 2025. godini bila je zasijana na gotovo 140 mil.ha, uz godišnju proizvodnju veću od 427 Mt (USDA, 2025a.). U RH se soja u 2025. godini uzgajala na oko 86 000 ha s ukupnom proizvodnjom od 200 000 t. U tablici 3 prikazana je proizvodnja soje u RH u razdoblju od 2022. do 2025. godine.

Tablica 3. Zasijane površine i prinosi soje u RH od 2022. do 2025. godine

SOJA	OSTVARENA PROIZVODNJA											
	2022.			2023.			2024.			2025.		
	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t
	91	2,1	195	71	2,8	203	103	2,5	255	86	2,3	200

Izvor: DZS 58457 (2023.); DZS 97383 (2025.)

Posliježetveni ostaci soje, koji uključuju stabljike, mahune i listove, predstavljaju značajan izvor lignocelulozne biomase (Kovačić i sur., 2017.). Slama soje sadrži približno 35% celuloze, 17% hemiceluloze i oko 22% lignina, uz 6 do 11% ekstraktivnih tvari i 5 do 11% pepela. U usporedbi s drvnom biomasom ima manji udio celuloze i lignina te veći udio pepela i silicija (Tapia-Blácido i sur., 2017.). Zbog velikih proizvodnih površina i kontinuirane proizvodnje, soja generira značajne količine posliježetvenih ostataka koji su vrijedan izvor lignocelulozne biomase. Njihovo energetske iskoristavanje može pridonijeti smanjenju emisija GHG, učinkovitijem korištenju biomase i dodatnoj ekonomskoj vrijednosti poljoprivredne proizvodnje, uz mogućnost vraćanja dijela ostataka u tlo radi očuvanja organske tvari. Zbog visokog udjela holoceluloze, posliježetveni ostaci soje pogodni su za proizvodnju peleta, briketa i biougljena (Imwinkler i sur., 2024.).

2.5.3. Kukuruz (*Zea mays* L.)

Kukuruz je jednogodišnja biljka iz porodice trava *Poaceae* i jedna od najvažnijih poljoprivrednih kultura u svijetu. Njegova proizvodnja ima važnu ulogu u globalnoj poljoprivredi, međunarodnoj trgovini i prehrambenoj sigurnosti (Erenstein i sur., 2022.). Na globalnoj razini proizvodnja kukuruza u 2025. godini iznosila je oko 1,3 mlrd. t (USDA, 2025b). U 2025. godini kukuruz je u RH zasijan na oko 267 000 ha s ukupnom proizvodnjom od približno 1 702 000 t (DZS 97383, 2025.). U tablici 4 prikazana je proizvodnja kukuruza u RH u razdoblju od 2022. do 2025. godine.

Tablica 4. Zasijane površine i prinosi kukuruza u RH od 2022. do 2025. godine

KUKURUZ	OSTVARENA PROIZVODNJA											
	2022.			2023.			2024.			2025.		
	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. ha	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t
	268	6,1	1 642	266	7,4	1 974	273	7,6	2 067	267	6,4	1 702

Izvor: DZS 58457 (2023.); DZS 97383 (2025.)

Kukuruz se ubraja među ratarske kulture s visokim potencijalom proizvodnje biomase po jedinici površine, zbog čega njegovi posliježetveni ostaci predstavljaju značajan izvor lignocelulozne biomase za energetske iskoristavanje. Nakon žetve zrna ostaju velike količine stabljike, listova i oklaska, koje se mogu koristiti za proizvodnju peleta i briketa prešanjem biomase (García-Lara i Serna-Saldivar, 2019.). Energetskim iskoristavanjem posliježetvenih ostataka povećava se ukupna iskoristivost poljoprivredne proizvodnje i smanjuje količina

neiskorištene biomase na poljoprivrednim površinama. Biomasa kukuruza može se koristiti i za proizvodnju bioetanol, bioplina i biougljena, čime predstavlja važan obnovljivi izvor energije i sirovinu za razvoj kružnog gospodarstva. U usporedbi s drvnom biomasom, biomasa kukuruza sadrži veći udio pepela i mineralnih tvari, što može utjecati na svojstva izgaranja, stvaranje taloga i emisije dimnih plinova tijekom energetske uporabe (El-Soaly i sur., 2017.). Stoga je pri korištenju biogoriva iz kukuruzne biomase potrebno voditi računa o kvaliteti sirovine i uvjetima izgaranja kako bi se postigla veća energetska učinkovitost i smanjio negativan utjecaj na okoliš.

2.5.4. Pšenica (*Triticum aestivum* L.)

Pšenica je jednogodišnja zeljasta biljka iz roda *Triticum*, porodice trava *Poaceae*. Zbog širokog geografskog područja rasprostranjenosti smatra se euritopnom vrstom (Metakovsky i sur., 2024.). Proizvodnja pšenice na globalnoj razini u 2025. godini iznosila je oko 842,1 Mt (USDA, 2025c.). Pšenica je u RH u 2025. godini bila zasijana na oko 158 000 ha (ozima, jara i sjemenska), s ukupnom proizvodnjom od približno 1,05 Mt. Zasijane površine i prinosi prikazani su u tablici 5 (DZS 97383, 2025.).

Tablica 5. Zasijane površine i prinosi pšenice u RH od 2022. do 2025. godine

PŠENICA	OSTVARENA PROIZVODNJA											
	2022.			2023.			2024.			2025.		
	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. ha	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t
	158	6,0	948	170	4,8	813	140	5,8	815	158	6,7	1 050

Izvor: DZS 58457 (2023.); DZS 97383 (2025.)

Slama pšenice može se koristiti kao stelja za stoku, zaoravati radi povećanja sadržaja organske tvari u tlu ili energetske valorizirati. Iako se u pojedinim područjima još uvijek spaljuje na poljima, takva praksa uzrokuje onečišćenje zraka i negativno utječe na kvalitetu tla. Osim poljoprivredne i energetske primjene, slama pšenice predstavlja vrijedan izvor vlakana za proizvodnju papira zbog značajnog udjela celuloze u biomasi (Španić i sur., 2018.). Slama pšenice jedan je od najzastupljenijih poljoprivrednih ostataka u EU, s procijenjenom godišnjom proizvodnjom od oko 144 Mt biomase (EC, 2017.). Zbog dobre dostupnosti i energetskeg potencijala često se koristi za proizvodnju peleta i briketa, koji mogu služiti za proizvodnju toplinske i električne energije. Međutim, u usporedbi s drvnom biomasom sadrži veći udio pepela i Si, što može potaknuti stvaranje taloga, otežati proces izgaranja i utjecati na emisije

dimnih plinova. Stoga su za njezino učinkovito korištenje potrebna prilagođena ložišta i odgovarajuće tehnologije izgaranja (Nath i sur., 2025.).

2.5.5. Suncokret (*Helianthus annuus* L.)

Suncokret pripada rodu *Helianthus* i porodici *Asteraceae* (glavočike), koja obuhvaća brojne gospodarski značajne biljne vrste. U 2025. godini na globalnoj razini proizvedeno je oko 54,1 Mt suncokretovog sjemena (USDA, 2025d.). U 2025. godini suncokret je u RH bio zasijan na oko 69 000 ha s ukupnom proizvodnjom od približno 205 000 t, kao što je prikazano u tablici 6.

Tablica 6. Zasijane površine i prinosi suncokreta u RH od 2022. do 2025. godine

SUNCOKRET	OSTVARENA PROIZVODNJA											
	2022.			2023.			2024.			2025.		
	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t	tis. ha	t/ha	ukupno tis. ha	tis. ha	t/ha	ukupno tis. t
	51	3,0	153	58	2,6	153	61	3,0	181	69	3,0	205

Izvor: DZS 58457 (2023.); DZS 97383 (2025.)

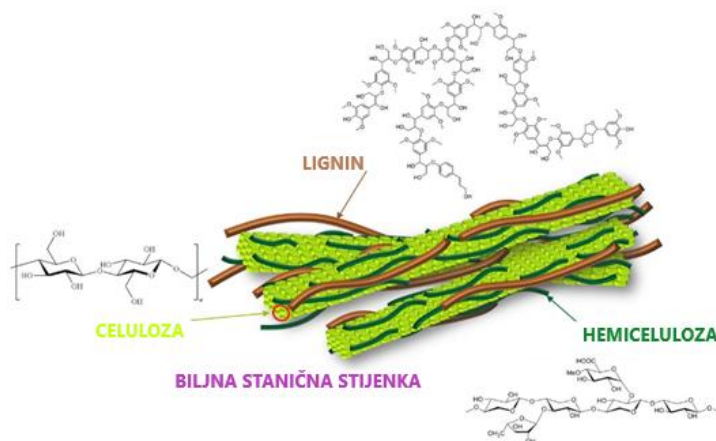
Biomasa stabljike suncokreta, koja se nekad smatrala nusproizvodom poljoprivredne proizvodnje, danas se sve više prepoznaje kao vrijedan izvor sirovine za energetske svrhe zbog dobre dostupnosti i povoljnih fizikalno-kemijskih svojstava (Ziebell i sur., 2013.). Nakon žetve može se sušiti, balirati ili usitniti te koristiti za proizvodnju toplinske energije, kao i za proizvodnju peleta i briketa veće gustoće pogodnih za skladištenje, transport i primjenu u automatiziranim sustavima grijanja (Havrysh i sur., 2023.). Zbog relativno visoke ogrjevne vrijednosti i mogućnosti iskorištavanja posliježetvenih ostataka, stabljika suncokreta predstavlja vrijedan izvor biomase za energetske uporabu. Međutim, povećani udio pepela i mineralnih tvari može utjecati na proces izgaranja te pridonijeti promjenama u sastavu dimnih plinova i stvaranju taloga tijekom energetske uporabe (Geletukha i sur., 2020.).

2.6. Kemijska i energetska karakterizacija lignocelulozne biomase

Biomasa ima specifična kemijska i strukturna svojstva koja određuju mogućnosti njezina korištenja i energetske uporabe. Po kemijskom, fizikalnom i mehaničkom sastavu svaka je biomasa jedinstvena, što ovisi o vrsti biljke, razdoblju žetve ili berbe, uvjetima sušenja i skladištenja te geografskom položaju uzgoja ili rasta (Vassilev i sur., 2010.). Osim za energetske uporabe, lignocelulozna biomasa ima i značajan potencijal za materijalnu uporabu u okviru održivog i kružnog gospodarstva (Španić i sur., 2012.).

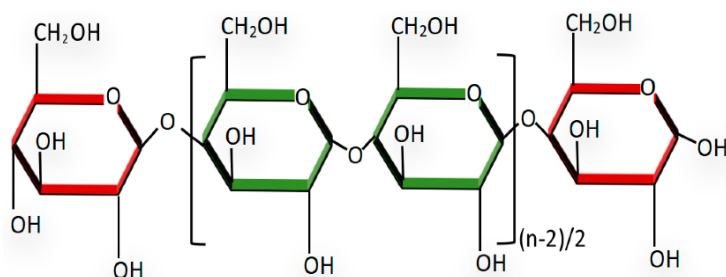
2.6.1. Kemijski sastav biomase

Biomasa se pretežno sastoji od celuloze, lignina i hemiceluloze, koji su glavne kemijske komponente biljne stijenke (slika 5). Njihov udio i međusobni odnos značajno utječu na fizikalna, kemijska i energetska svojstva biomase. Prosječan udio ovih komponenti iznosi 35 do 50% celuloze, 10 do 30% lignina i 20 do 35% hemiceluloze, dok ostali spojevi čine oko 5% ukupnog sastava biomase (Antonović i sur., 2019.).



Slika 5. Kemijska struktura lignocelulozne biomase (Izvor: Jensen i sur., 2017.)

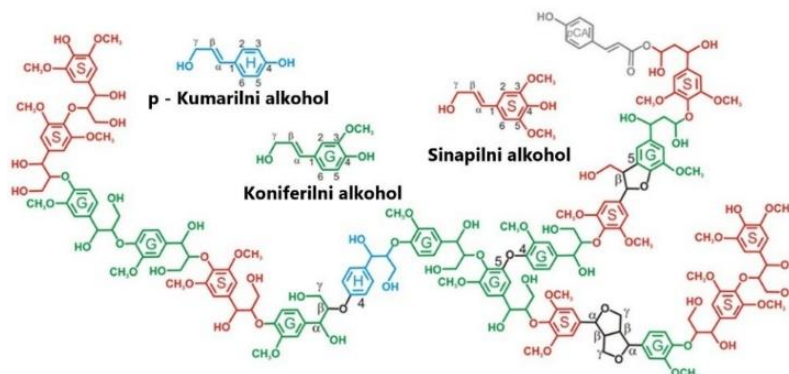
Celuloza (*cellula* → mala ćelija) glavni je strukturni polisaharid biljnih stanica koji osigurava čvrstoću i mehaničku stabilnost tkiva (slika 6). Građena je kao linearni, netopljivi i nerazgranati polimer sastavljen od β -(1→4)-D-glukoznih jedinica povezanih vodikovim vezama i Van der Waalsovima silama. Molekularni lanci celuloze organizirani su u mikrofibrile, visoko kristalne strukture koje karakteriziraju velika mehanička čvrstoća, kemijska stabilnost i otpornost na enzimsku razgradnju. U biomasi celuloza najčešće čini približno trećinu ukupne mase (Smole i sur., 2005.).



Slika 6. Kemijska struktura celuloze (Izvor: Alavi, 2019.)

Lignin je, nakon celuloze, drugi najzastupljeniji prirodni polimer i čini između 10 i 30% ukupne biomase, ovisno o vrsti biljke, starosti i uvjetima rasta. To je heterogeni polimer složenije strukture od celuloze i hemiceluloze, čija trodimenzionalna amorfna struktura nastaje

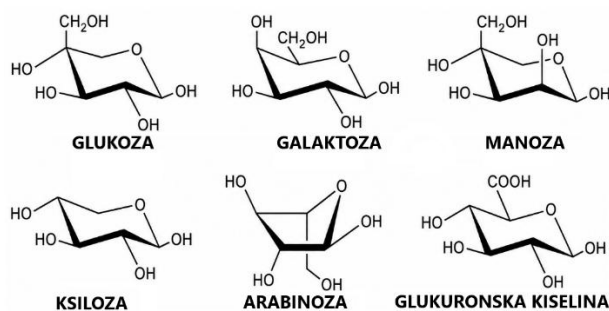
polimerizacijom p-kumarilnog, koniferilnog i sinapilnog alkohola (slika 7) (Ganewatta i sur., 2019.).



Slika 7. Kemijska struktura lignina (Izvor: Mota i sur., 2018.)

Zbog složene aromatske strukture lignin je otporniji na kemijsku i enzimsku razgradnju, što otežava proizvodnju tekućih biogoriva. Istodobno, veći udio lignina povećava ogrjevnu vrijednost biomase, pa je biomasa bogata ligninom pogodnija za proizvodnju krutih biogoriva. Od triju glavnih kemijskih komponenti biomase lignin ima najveću ogrjevnu vrijednost, od 22,2 do 28,5 MJ kg⁻¹, dok se ogrjevna vrijednost celuloze i hemiceluloze kreće od 17,0 do 18,6 MJ kg⁻¹ (Demirbas, 2017.).

Hemiceluloza je heterogeni polisaharid stanične stijenke koji se relativno lako izdvaja kemijskom ili alkalnom ekstrakcijom. Sastoji se od različitih monosaharida, među kojima najčešće prevladavaju ksiloza, arabinoza, manosa i glukoza te uronske kiseline (slika 8). Klasifikacija hemiceluloza temelji se na dominantnom monosaharidu u njihovoj strukturi, pri čemu su najzastupljeniji ksilanski i mananski tipovi. Za razliku od celuloze, hemiceluloza je amorfna i topljivija, što omogućuje lakšu ekstrakciju. Njezinu razgradnju kataliziraju enzimi hemicelulaze hidrolizom polisaharida stanične stijenke (Hemati i sur., 2022.; Machmudah i sur., 2017.).



Slika 8. Kemijska struktura hemiceluloze (Izvor: Okolie i sur., 2021.)

Udio i međusobni odnos celuloze, lignina i hemiceluloze značajno utječu na fizikalna i energetska svojstva biomase, a time i na kvalitetu proizvedenih peleta.

U tablici 7. prikazan je kemijski sastav pojedinih vrsta šumske i poljoprivredne biomase.

Tablica 7. Kemijski sastav pojedinih vrsta biomase (%)

Vrsta	Kemijska komponenta		
	Celuloza	Lignin	Hemiceluloza
Hrast^a	43,20	35,40	21,90
Stabljika kukuruza^b	37,50	17,60	22,40
Slama pšenice^c	38,70	17,30	19,00
Slama soje^d	37,60	15,20	27,80
Stabljika suncokreta^e	32,00	22,00	18,00

Izvor: a - Ghanney i sur. (2021.); b - Mosier i sur. (2005.); c - Valdez-Vazquez i sur. (2015.); d - Chen i sur. (2022.); e - Antonopoulou i sur. (2015.)

Osim glavnih kemijskih komponenti, biomasa sadrži i spojeve niže molekularne mase koji mogu značajno utjecati na njezina kemijska i energetska svojstva. U tu skupinu ubrajaju se ekstraktivne tvari (ET), vlaga i mineralne tvari koje nakon izgaranja tvore pepeo. Ekstraktivne tvari predstavljaju različite organske spojeve koji nisu sastavni dio strukturne matrice biljne stijenke te se mogu relativno lako izdvojiti primjenom različitih otapala (Frodeson i sur., 2019.). Tijekom kemijske analize biomase uklanjaju se postupkom ekstrakcije jer mogu utjecati na određivanje udjela glavnih kemijskih komponenti (Wang i sur., 2017.). Osim toga, mogu značajno povećati gornju ogrjevnu vrijednost (GOV) biomase, pri čemu pojedina istraživanja navode vrijednosti do približno 38,9 MJ kg⁻¹ (Esteves i sur., 2023.).

2.6.2. Energetska svojstva biomase

Jedan od najvećih izazova u korištenju biomase kao izvora energije jest velika varijabilnost njezina kemijskog sastava, koja ovisi o vrsti biljke, uvjetima rasta, dijelu biljke i načinu obrade. Biomasa s većim udjelom lignina obično ima veću energetska vrijednost, dok povećani udio mineralnih elemenata, poput K i Si, može uzrokovati stvaranje većih količina pepela te probleme povezane s taloženjem i korozijom u sustavima izgaranja (Nunes i sur., 2016.; Ibitoye i sur., 2023.). Drvna biomasa zbog relativno stabilnog kemijskog sastava i manjeg udjela pepela omogućuje učinkovitije i stabilnije izgaranje te se često koristi za proizvodnju peleta. Nasuprot tome, poljoprivredni ostaci uglavnom sadrže više mineralnih tvari, zbog čega su skloniji stvaranju pepela i naslaga tijekom izgaranja, pa njihovo korištenje često zahtijeva primjenu predtretmana ili prilagodbu tehnologije izgaranja (Wang i Tester, 2023.; Rabi Prasad i sur.,

2024.). Energetska svojstva biomase određena su udjelom gorivih i negorivih komponenti, koje utječu na količinu oslobođene energije, učinkovitost izgaranja i sastav produkata izgaranja (Bilandžija i sur., 2017.).

Gorive tvari biomase, uz prisutnost kisika iz zraka i odgovarajuću temperaturu, izgaraju uz stvaranje plamena ili žara, pri čemu nastaju plinoviti produkti izgaranja i nesagorivi ostaci. Glavne gorive komponente biomase su suha tvar, C, H, S, HT, C_{fix} i koks. Tijekom izgaranja C i H oksidiraju, a egzotermne reakcije dovode do stvaranja CO_2 i H_2O (Oberberger i sur., 2006.).

Suha tvar označava dio biomase koji ostaje nakon uklanjanja vode i važna je za izračun energetske dobiti u proizvodnji bioenergije. Određuje se sušenjem biomase na kontroliranoj temperaturi, najčešće oko 105 °C, do postizanja konstantne mase (Bilandžija, 2015.).

Ugljik ima ključnu ulogu u određivanju ogrjevnog vrijednosti biomase, odnosno količine toplinske energije koja se oslobađa tijekom izgaranja. Njegov udio u biomasi najčešće se kreće između 40 i 55%, ovisno o vrsti biomase. Općenito, veći udio ugljika doprinosi većoj energetske gustoći goriva i povoljnijim svojstvima izgaranja (Vassilev i sur., 2010.).

Vodik (H) u biomasi je obično zastupljen s 5 do 6% te, uz ugljik, predstavlja jedan od ključnih elemenata koji određuju energetske vrijednosti biomase i biogoriva (Joshi i sur., 2024.). Tijekom izgaranja oksidira u vodu, pri čemu oslobađa značajnu količinu energije zbog vrlo visokog energetske sadržaja po jedinici mase ($\approx 142 \text{ MJ kg}^{-1}$), koji je znatno veći od energetske sadržaja ugljika ($\approx 32 \text{ MJ kg}^{-1}$) (Elbaz i sur., 2022.; Wang i sur., 2023.). Međutim, udio vodika u biomasi relativno je nizak, zbog čega je njezina ukupna energetska vrijednost manja u usporedbi s nekim fosilnim gorivima. U prisutnosti sumpora i klora tijekom izgaranja može doći do kondenzacije korozivnih spojeva u sustavima za izgaranje (Speight, 2015.).

Sumpor se u biomasi najčešće javlja u koncentracijama manjim od 0,1%, zbog čega su emisije SO_2 tijekom izgaranja znatno niže nego kod većine fosilnih goriva. Međutim, njegova važnost proizlazi prvenstveno iz mogućnosti stvaranja korozivnih spojeva i naslaga koje mogu smanjiti učinkovitost sustava za izgaranje te povećati troškove održavanja. U prisutnosti Cl, sumpor može sudjelovati u reakcijama koje potiču visokotemperaturnu koroziju i taloženje spojeva na površinama izmjenjivača topline i drugih dijelova postrojenja (Poisa i sur., 2017.; Oberberger i sur., 2006.).

Hlapljive tvari najčešće čine više od 70% suhe mase biomase te značajno utječu na njezina goriva svojstva. To su spojevi koji se oslobađaju ili termički razgrađuju pri temperaturama

između 200 i 500 °C. Biomasa s većim udjelom HT odlikuje se većom reaktivnošću i bržim izgaranjem, što pogoduje brzom oslobađanju toplinske energije u sustavima za izgaranje (Sloss, 2010.; Miao i sur., 2021.). Tijekom izgaranja HT nastaju različiti plinoviti produkti, a nepotpuno izgaranje može povećati emisije onečišćujućih tvari u dimnim plinovima (Zhou i sur., 2023.).

Fiksirani ugljik predstavlja čvrsti zapaljivi ostatak koji ostaje nakon izdvajanja hlapljivih tvari tijekom izgaranja biomase. Njegov udio ovisi o vrsti biomase, a sastoji se pretežito od ugljika koji ne prelazi u plinovitu fazu tijekom zagrijavanja (Mamvura i Danha, 2020.; Behara i sur., 2020.). Veći udio C_{fix} pridonosi većoj ogrjevnoj vrijednosti i omogućuje dugotrajnije te stabilnije izgaranje. Ogrjevna vrijednost većine biomasa kreće se između 15 i 20 MJ kg⁻¹, dok materijali s većim udjelom C_{fix} , poput drvnog ugljena, mogu doseći i 30 MJ kg⁻¹ (Biswas, 2018.).

Koks predstavlja ugljikov ostatak nastao termičkom razgradnjom biomase pri ograničenoj prisutnosti kisika. Njegov udio može utjecati na ponašanje goriva tijekom termokemijskih procesa te na sastav emisija tijekom izgaranja (Miroshnichenko i sur., 2019.). U tablici 8 prikazan je sastav gorivih tvari različitih vrsta drvene i poljoprivredne biomase.

Tablica 8. Udio gorivih tvari u pojedinim vrstama biomase (%)

Vrsta	Goriva tvar				
	C	H	S	HT	C_{fix}
Hrast^a	47,20	7,10	-	78,70	16,30
Stabljika kukuruza^b	42,50	5,00	0,07	78,10	17,60
Slama pšenice^b	49,40	6,10	0,17	67,20	16,30
Slama soje^c	44,30	5,80	0,10	85,50	10,60
Stabljika suncokreta^d	43,38	6,62	-	83,59	14,51

C-ugljik, H-vodik, S-sumpor, HT-hlapljive tvari, C_{fix} -fiksirani ugljik; Izvor: a - Bianchini i sur. (2025.); b - Kang i sur. (2014.); c - Chen i sur. (2022.); d - Turzyński i sur. (2021.)

Za razliku od gorivih tvari, negorive komponente biomase ne sudjeluju u izgaranju te pri povišenim temperaturama zaostaju u obliku pepela i mineralnih taloga. Njihova prisutnost može smanjiti učinkovitost izgaranja te uzrokovati stvaranje naslaga i druge probleme u sustavima za izgaranje. U negorive tvari ubrajaju se vlaga, pepeo, N i O te mineralni elementi poput Si, K, Ca, Mg i P, uz manje količine Fe, Al i Na (Bilandžija, 2015.; Krička i sur., 2017.).

Vlaga je jedno od najvažnijih svojstava biomase jer značajno utječe na njezinu energetska vrijednost, proces izgaranja te troškove skladištenja i transporta (Ievinsh, 2023.). Udio vlage

može znatno varirati ovisno o vrsti biomase, pri čemu svježe prikupljena biomasa može sadržavati i do 80%. Povećani udio vlage smanjuje DOV biomase jer se dio energije tijekom izgaranja troši na isparavanje vode. Osim toga, veća vlaga povećava masu goriva, otežava skladištenje te može uzrokovati nestabilno i nepotpuno izgaranje uz povećane emisije CO₂, čađe i drugih onečišćujućih tvari (Brown, 2019.; Przywara i sur., 2023.).

Pepeo je anorganski nezapaljivi ostatak koji nastaje nakon termičke razgradnje ili izgaranja biomase. Budući da ne sudjeluje u izgaranju, povećani udio pepela smanjuje ogrjevnju vrijednost i ukupnu energetska učinkovitost goriva. Udio pepela u biomasi može značajno varirati, od približno 0,5% u drvnj biomasi do oko 12% u slami i drugim poljoprivrednim ostacima (Nguyen i sur., 2016.; Stella Mary i sur., 2016.).

Dušik je u biomasi najčešće zastupljen s 0,1 do 2,0 % mase, ovisno o vrsti i podrijetlu biomase. Veći udio dušika obično je prisutan u poljoprivrednoj biomasi i energetskim kulturama, dok drvena biomasa uglavnom sadrži manje količine (Vassilev i sur., 2010.). Iako ne doprinosi značajno energetska vrijednosti, tijekom izgaranja može dovesti do stvaranja dušikovih oksida (NO_x), koji pridonose onečišćenju zraka, stvaranju smoga i kiselih kiša (Darvell i sur., 2012.).

Kisik je jedan od glavnih elemenata u sastavu biomase i značajno utječe na njezina goriva svojstva. Njegov udio najčešće se kreće između 30 i 50% mase, što je znatno više nego kod fosilnih goriva. Visok udio O smanjuje energetska gustoću biomase i njezinu ogrjevnju vrijednost jer ne doprinosi oslobađanju energije tijekom izgaranja (McKendry, 2002.; Vassilev i sur., 2010.). U tablici 9 prikazane su negorive komponente različitih vrsta drvene i poljoprivredne biomase.

Tablica 9. Udio negorivih tvari u pojedinim vrstama biomase (%)

Vrsta	Negoriva tvar			
	Vlaga	Pepeo	N	O
Hrast^a	-	2,0	1,20	44,20
Stabljika kukuruza^b	10,60	7,10	0,80	42,60
Slama pšenice^b	10,10	6,40	0,70	43,60
Slama soje^c	-	3,90	0,70	45,20
Stabljika suncokreta^d	9,61	1,20	0,88	46,58

N-dušik, O-kisik; Izvor: a - Bianchini i sur. (2025.); b - Kang i sur. (2014.); c - Chen i sur. (2022.); d - Turzyński i sur. (2021.)

2.6.3. Ogrjevna vrijednost biomase

Ogrjevna vrijednost biomase označava količinu toplinske energije oslobođene tijekom njezina izgaranja i jedno je od najvažnijih svojstava goriva. Ovisi o vrsti biomase, kemijskom sastavu i udjelu vlage (Silitonga i sur., 2013.).

Ogrjevna vrijednost dijeli se na (Abrar i sur., 2023.):

- gornju ogrjevnju vrijednost (GOV) - ukupnu količinu energije oslobođenu potpunim izgaranjem goriva, uključujući i energiju nastalu kondenzacijom vodene pare,
- donju ogrjevnju vrijednost (DOV) - količinu energije oslobođenu izgaranjem goriva bez uključivanja latentne topline kondenzacije vodene pare.

Razlika između GOV i DOV prvenstveno ovisi o udjelu vlage i vodika u gorivu. Veći udio vlage smanjuje iskoristivu energetska vrijednost biomase jer se dio energije troši na isparavanje vode. GOV i DOV važni su pokazatelji pri procjeni energetskog potencijala biomase i projektiranju sustava za izgaranje (Demirbas, 2007.). U tablici 10 prikazane su ogrjevne vrijednosti različitih vrsta drvene i poljoprivredne biomase.

Tablica 10. Gornja i donja ogrjevna vrijednost pojedinih vrsta biomase (MJ kg⁻¹)

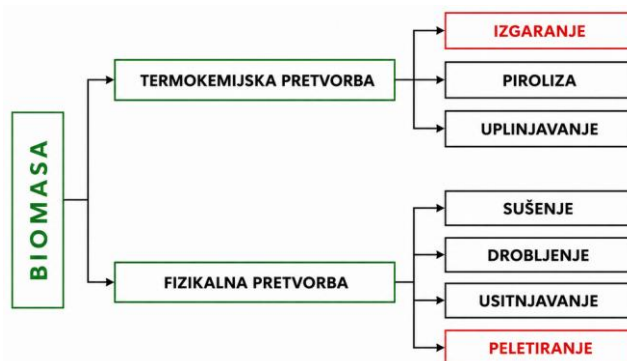
Vrsta	Ogrjevna vrijednost	
	GOV	DOV
Hrast^a	18,70	15,40
Stabljika kukuruza^b	16,30	14,90
Slama pšenice^c	16,70	15,40
Slama soje^d	16,10	15,30
Stabljika suncokreta^e	16,20	14,30

GOV-gornja ogrjevna vrijednost, DOV-donja ogrjevna vrijednost; Izvor: a - Telmo i Lousada (2011a.); b - Grubor i sur. (2018.); c - Matin i sur. (2019.); d - Chen i sur. (2022.); e - Duca i sur. (2015.)

2.7. Načini pretvorbe biomase u biogorivo

Kvaliteta biomase kao goriva ovisi o vrsti sirovine, uvjetima uzgoja, klimatskim i pedološkim uvjetima te načinu žetve i skladištenja. Prisutnost nečistoća, poput tla i prašine, može smanjiti njezinu energetska vrijednost i kvalitetu izgaranja (Vassilev i sur., 2010.; Zhang i sur., 2023.). Niska nasipna gustoća, promjenjiv udio vlage i heterogen sastav biomase otežavaju transport, skladištenje i energetska oporabu, pri čemu se neto energetska učinkovitost sustava može smanjiti i do 30% (Abdel Aal i sur., 2023.). Različite tehnologije konverzije (slika 9) omogućuju pretvorbu biomase u toplinsku i električnu energiju, biogoriva i biokemikalije. Odabir

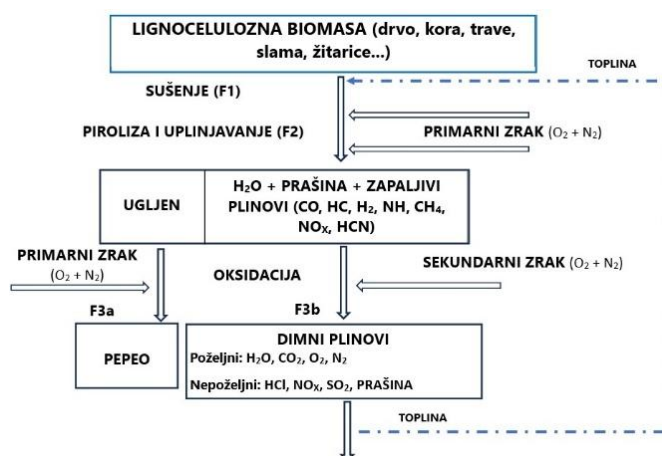
odgovarajuće tehnologije ovisi o svojstvima sirovine, željenom proizvodu, ekonomičnosti procesa i utjecaju na okoliš (Ibitoye i sur., 2023.).



Slika 9. Tehnologija pretvorbe biomase (Izvor: Singh i sur., 2020.)

2.7.1. Termokemijska pretvorba biomase

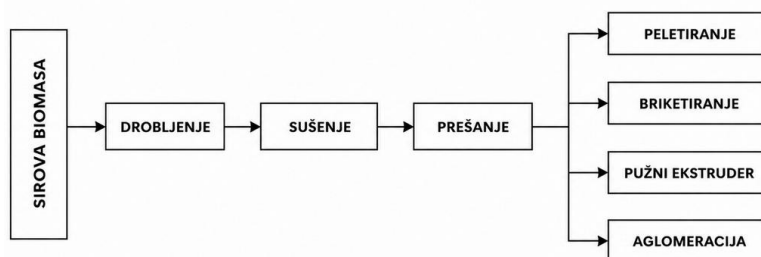
Termokemijskim procesima kemijska energija pohranjena u biomasi pretvara se u toplinsku energiju. Posebno su pogodni za relativno suhu biomasu, poput drvnih i poljoprivrednih ostataka, pri čemu se iskorištava energetski potencijal lignina i ugljikohidratne frakcije (Kundu i sur., 2018.; Barot, 2022.). Među termokemijskim tehnologijama najzastupljenije je izravno izgaranje za proizvodnju toplinske i električne energije, a procesi se mogu provoditi sa ili bez katalizatora, ovisno o željenim svojstvima produkata (Ram i Mondal, 2022.). Izgaranje je proces oksidacije pri kojem se kemijska energija goriva pretvara u toplinsku energiju (slika 10). Proces obuhvaća faze sušenja, pirolize, izgaranja hlapljivih tvari i krutog ostatka, pri čemu nastaju toplina, CO_2 , H_2O i pepeo. Učinkovitost izgaranja ovisi o svojstvima goriva, količini zraka i uvjetima procesa, a u usporedbi s drugim tehnologijama pretvorbe predstavlja jednu od najjednostavnijih i najraširenijih metoda energetskog iskorištavanja biomase (Sadaka i Johnson, 2010.).



Slika 10. Shematski prikaz procesa izgaranja biomase (Izvor: Valantinavičius i Vonžodas, 2014.)

2.7.2. Fizikalna pretvorba biomase

Fizikalne tehnike pretvorbe imaju važnu ulogu u pripremi biomase za proizvodnju krutih biogoriva (slika 11). Za razliku od termokemijskih i biokemijskih procesa, ne uključuju kemijsku razgradnju biomase, već promjenu njezinih fizikalnih svojstava radi povećanja nasipne gustoće, smanjenja udjela vlage te poboljšanja transportnih, skladišnih i gorivih svojstava. U fizikalne tehnike pretvorbe ubrajaju se drobljenje, usitnjavanje, sušenje i ugušćivanje biomase prešanjem u pelete ili brikete (Ramos i sur., 2022.).



Slika 11. Fizikalne tehnike pretvorbe biomase (Izvor: Tumuluru i sur., 2012.)

2.8. Peleti kao biogorivo

Peleti su jedan od najraširenijih oblika krutog biogoriva koji se proizvode iz drvene biomase, posliježetvenih poljoprivrednih ostataka i drugih lignoceluloznih materijala. Budući da se proizvode iz obnovljivih sirovina, predstavljaju značajnu alternativu fosilnim gorivima (Saletnik i sur., 2022.). Proizvode se postupkom prešanja usitnjene sirovine pod visokim tlakom, pri čemu omekšani lignin djeluje kao prirodno vezivo (Carroll i Finnan, 2012.; Stelte i sur., 2012b.). U odnosu na sirovu biomasu, peleti imaju veću nasipnu gustoću, niži udio vlage te povoljnija svojstva za skladištenje, transport i izgaranje. Procesom prešanja postiže se nasipna gustoća od približno 600 do 800 kg/m³, dok je kod piljevine i drvene sječke najčešće između 100 i 200 kg/m³ (Kaliyan i Morey, 2009.). Nizak udio vlage (< 10%) pridonosi većoj ogrjevnoj vrijednosti (16-19 MJ kg⁻¹) i stabilnijem izgaranju (Adapa i sur., 2011.; Stelte i sur., 2011.). Kvaliteta peleta značajno utječe na učinkovitost sustava za izgaranje, potrošnju goriva i potrebe održavanja opreme (Lee i sur., 2011.).

2.9. Normizacija čvrstih biogoriva

Čvrsta biogoriva obuhvaćaju drvenu biomasu (sječka, drvo za ogrjev, peleti i briketi), poljoprivrednu biomasu (slama, trava, energetske kulture) te različite ostatke i mješavine biomase, poput komine masline, koštica voća i ljuski orašastih plodova. U ovu skupinu ne ubraja se biomasa životinjskog podrijetla niti korišteno drvo nastalo rušenjem građevinskih objekata (Kofman, 2016.). Standardizacija čvrstih biogoriva važna je za osiguravanje

ujednačene kvalitete goriva, sigurnog rada sustava za izgaranje i smanjenje emisija onečišćujućih tvari. U EU i svijetu kvaliteta čvrstih biogoriva uređena je nizom EN i ISO normi razvijenih u okviru tehničkih odbora za čvrsta biogoriva (Hiegl i sur., 2009.; Alakangas, 2011.), pri čemu je u RH za normizaciju nadležan Hrvatski zavod za norme (HZN). Norme prikazane u tablici 11 predstavljaju temeljne dokumente za klasifikaciju i kontrolu kvalitete čvrstih biogoriva.

Tablica 11. Norme koje se koriste za čvrsta biogoriva

Oznaka	Naslov
HRN EN ISO 15234:2011	Jamstvo kvalitete goriva, 1. dio: Opći zahtjevi
HRN EN ISO 16559:2022	Terminološki rječnik
HRN EN ISO 17225:2021	Specifikacije goriva i razredi, dijelovi 1 - 8
HRN EN ISO 18135:2017	Uzorkovanje
HRN EN ISO 14780:2017	Priprema uzoraka
HRN EN ISO 17827:2024	Određivanje granulometrijskog sastava
HRN EN ISO 17828:2025	Određivanje nasipne gustoće
HRN EN ISO 18125:2017	Određivanje ogrjevnog vrijednosti
HRN EN ISO 18122:2022	Određivanje udjela pepela
HRN EN ISO 18134:2022	Određivanje udjela vlage - Metoda sušionika.

Izvor: HZN (2011.; 2017.; 2021.; 2022.; 2024.; 2025.)

2.10. Normizacija peleta

Drveni peleti proizvode se preradom drvnih ostataka te zbog ujednačenih svojstava i standardizirane kvalitete predstavljaju jedno od najvažnijih krutih biogoriva za energetska primjenu. Klasifikacija i zahtjevi kvalitete definirani su normom HRN EN ISO 17225, koja obuhvaća klasifikaciju krutih biogoriva te zahtjeve za sirovine i gotove proizvode. HRN EN ISO 17225-1 propisuje opće zahtjeve, HRN EN ISO 17225-2 klasifikaciju drvnih peleta, a HRN EN ISO 17225-6 klasifikaciju nedrvnih peleta.

2.10.1. Sirovine za proizvodnju krutih biogoriva prema HRN EN ISO 17225-1

Navedena norma određuje razrede kvalitete goriva i specifikacije za kruta biogoriva proizvedena od sirovih i prerađenih materijala podrijetlom iz:

- šumarstva i arborikulture,
- poljoprivrede i hortikulture,
- akvakulture.

2.10.2. Klasifikacija razreda drvnih peleta prema HRN EN ISO 17225-2

Norma HRN EN ISO 17225-2 definira razrede kvalitete i specifikacije drvnih peleta za neindustrijsku i industrijsku primjenu. Obuhvaća pelete proizvedene od neobrađenog drva, nusproizvoda i ostataka drvoprerađivačke industrije te kemijski neobrađenog korištenog drva. Definirane su klase A1, A2 i B za neindustrijsku primjenu te I1, I2 i I3 za industrijsku primjenu, pri čemu su za svaku klasu propisane granične vrijednosti pojedinih svojstava peleta. Svojstva drvnih peleta razreda A1, A2 i B prikazana su u tablici 12.

Tablica 12. Granične vrijednosti drvnih peleta za neindustrijsku primjenu

Svojstvo	Mj. jed.	A1	A2	B
Promjer	mm	6 ± 1; 8 ± 1		
Duljina	mm	3,15 < L ≤ 40		
Vlaga	w-%	≤ 10		
Pepeo	w-%	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0
Mehanička izdržljivost	w-%	≥ 98,0	≥ 97,5	≥ 96,5
Fine čestice (< 3.15 mm)	w-%	≤ 1,0		
Ogrjevna vrijednost	MJ kg ⁻¹	≥ 16,5		
Nasipna gustoća	kg/m ³	600 ≤ NG ≤ 750		
Aditivi	w-%	≤ 2		
Dušik	w-%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Sumpor	w-%	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,05
Klor	w-%	≤ 0,02		≤ 0,03
Talište pepela	°C	≥ 1200	≥ 1100	
Arsen	mg/kg	≤ 1		
Kadmij	mg/kg	≤ 0,5		
Krom	mg/kg	≤ 10		
Bakar	mg/kg	≤ 10		
Olovo	mg/kg	≤ 10		
Živa	mg/kg	≤ 0,1		
Nikal	mg/kg	≤ 10		
Cink	mg/kg	≤ 100		

Izvor: HRN EN ISO 17225-2:2021

Svojstva peleta razreda I1, I2 i I3 prikazana su u tablici 13.

Tablica 13. Granične vrijednosti drvnih peleta za industrijsku primjenu

Svojstvo	Mj. jed.	I1	I2	I3
<i>Promjer</i>	mm	$6 \pm 1; 8 \pm 1$	$6 \pm 1; 8 \pm 1;$ 10 ± 1	$6 \pm 1; 8 \pm 1;$ $10 \pm 1; 12 \pm 1$
<i>Duljina</i>	mm	$3,15 < L \leq 40$		
<i>Vlaga</i>	w-%	≤ 10		
<i>Pepeo</i>	w-%	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	$\leq 3,0$
<i>Mehanička izdržljivost</i>	w-%	$97,5 \leq MI \leq 99$	$97 \leq MI \leq 99$	$96,5 \leq MI \leq 99$
<i>Fine čestice</i>	w-%	$\leq 4,0$	$\leq 5,0$	$\leq 6,0$
<i>Ogrjevna vrijednost</i>	MJ kg ⁻¹	$\geq 16,5$		
<i>Nasipna gustoća</i>	kg/m ³	≥ 600		
<i>Aditivi</i>	w-%	< 3		
<i>Dušik</i>	w-%	$\leq 0,3$		$\leq 0,6$
<i>Sumpor</i>	w-%	$\leq 0,05$		
<i>Klor</i>	w-%	$\leq 0,03$	$\leq 0,05$	$\leq 0,1$
<i>Arsen</i>	mg/kg	≤ 2		
<i>Kadmij</i>	mg/kg	$\leq 1,0$		
<i>Krom</i>	mg/kg	≤ 15		
<i>Bakar</i>	mg/kg	≤ 20		
<i>Olovo</i>	mg/kg	≤ 10		
<i>Živa</i>	mg/kg	$\leq 0,1$		
<i>Nikl</i>	mg/kg	≤ 10		
<i>Cink</i>	mg/kg	≤ 100		

Izvor: HRN EN ISO 17225-2:2021.

2.10.3. Klasifikacija nedravnih peleta prema HRN EN ISO 17225-6

Norma HRN EN ISO 17225-6 definira razrede kvalitete i specifikacije nedravnih peleta proizvedenih od zeljaste, voćne i vodene biomase te njihovih mješavina. Budući da su u ovom istraživanju analizirani peleti proizvedeni iz poljoprivredne biomase, navedena norma predstavlja osnovu za usporedbu njihovih fizikalnih, kemijskih i energetske svojstva. Svojstva nedravnih peleta razreda A i B prikazana su u tablici 14.

Tablica 14. Granične vrijednosti nedravnih peleta

Svojstvo	Mj. jed.	A	B
<i>Promjer</i>	mm	6 - 25±1	
<i>Duljina</i>	mm	3,15 < L ≤ 40 3,15 < L ≤ 50	
<i>Vlaga</i>	w-%	≤ 12	≤ 15
<i>Pepeo</i>	w-%	≤ 6,0	≤ 10,0
<i>Mehanička izdržljivost</i>	w-%	≥ 97,5	≥ 96,0
<i>Fine čestice (< 3.15 mm)</i>	w-%	≤ 2,0	≤ 3,0
<i>Ogrjevna vrijednost</i>	MJ kg ⁻¹	≥ 14,5	
<i>Nasipna gustoća</i>	kg/m ³	≥ 600	≥ 550
<i>Aditivi</i>	w-%	≤ 5,0	
<i>Dušik</i>	w-%	≤ 1,5	≤ 2,0
<i>Sumpor</i>	w-%	≤ 0,20	≤ 0,30
<i>Klor</i>	w-%	≤ 0,10	≤ 0,40
<i>Arsen</i>	mg/kg	≤ 1	≤ 1,5
<i>Kadmij</i>	mg/kg	≤ 0,5	≤ 0,5
<i>Krom</i>	mg/kg	≤ 50	≤ 50
<i>Bakar</i>	mg/kg	≤ 20	≤ 20
<i>Olovo</i>	mg/kg	≤ 10	≤ 10
<i>Živa</i>	mg/kg	≤ 0,1	≤ 0,1
<i>Nikl</i>	mg/kg	≤ 10	≤ 10
<i>Cink</i>	mg/kg	≤ 100	≤ 100

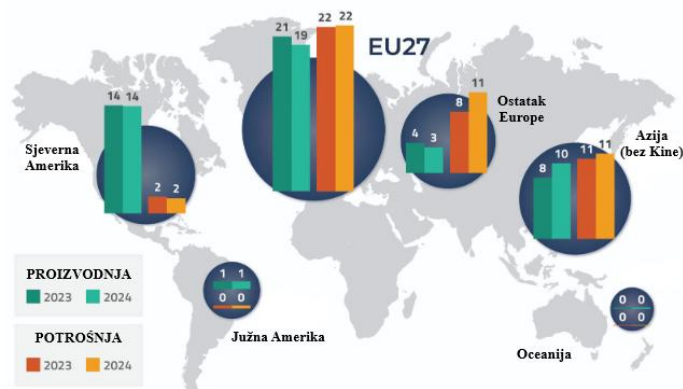
Izvor: HRN EN ISO 17225-6:2021

Nedrvni peleti često sadrže veći udio pepela, Cl, N i S u usporedbi s drvnim peletima, zbog čega se preporučuje njihova uporaba u uređajima prilagođenima za ovu vrstu goriva. Povećan sadržaj Cl, P i K može povećati rizik od taloženja pepela i korozije tijekom izgaranja, osobito kod biomase bogate K i Si, a siromašne Ca. Osim sastava sirovine, na kvalitetu konačnog proizvoda značajno utječu i uvjeti prešanja (Stelte i sur., 2011.).

2.11. Proizvodnja i potrošnja drvnih peleta

Posljednjih godina zabilježen je porast udjela stambenog i komercijalnog sektora u ukupnoj potrošnji drvnih peleta, koja danas čini približno 60% ukupne potrošnje. Grijanje na pelete sve

se češće koristi u kućanstvima i ruralnim područjima kao dostupna alternativa fosilnim gorivima (BEE, 2024.). Globalna proizvodnja peleta u 2024. godini iznosila je približno 48 Mt, pri čemu je EU zadržala vodeću poziciju s oko 22,7 Mt proizvodnje (slika 12). Unatoč blagom smanjenju proizvodnje u pojedinim državama, zbog ograničene dostupnosti sirovine, povećanih troškova proizvodnje i strožih zahtjeva održivosti, EU i dalje predstavlja najvažnije svjetsko tržište peleta. Značajan doprinos globalnoj proizvodnji ostvaruju i zemlje Sjeverne Amerike i Azije, dok međunarodnu trgovinu peletima predvode SAD, Vijetnam i Kanada (WBA, 2025.).



Slika 12. Globalna proizvodnja peleta u 2024. godini (Izvor: WBA, 2025.)

2.12. Proizvodnja peleta i ostalih krutih biogoriva u RH

U 2024. godini proizvodnja krutih biogoriva u RH obuhvaćala je drvene pelete i brikete, drveni ugljen, drvenu sječku i ogrjevno drvo (tablica 15). Proizvodnja peleta odvijala se u 28 pogona s ukupnim kapacitetom od 428 580 t, od čega je iskorišteno 64,5%. Prema proizvodnim kapacitetima i tržišnoj vrijednosti, drveni peleti predstavljaju najznačajniji oblik krutog biogoriva u RH (EIHP, 2024.; EIHP, 2025.).

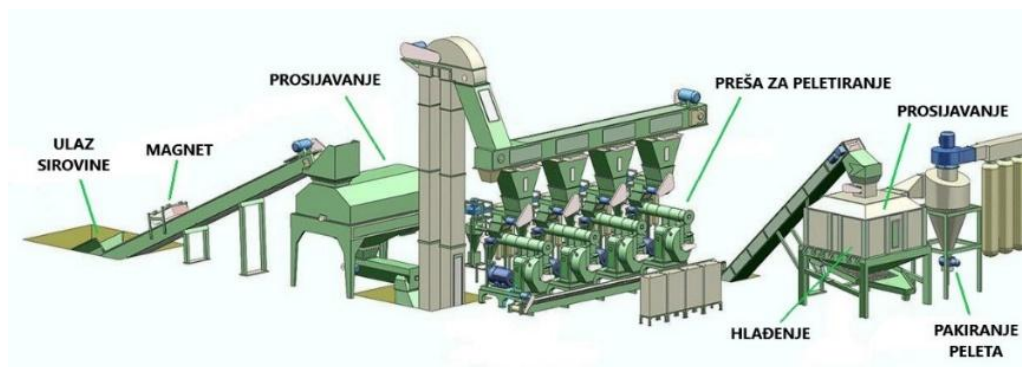
Tablica 15. Proizvodnja krutih biogoriva u RH od 2021. do 2024. godine

Vrsta krutog biogoriva	Proizvodnja			
	2021.	2022.	2023.	2024.
Drvni peleti (t)	344 750 (75%)	351 128 (82%)	343 247 (80%)	276 296 (64%)
Drvni briketi (t)	56 539	71 015	62 237	57 349
Drveni ugljen (t)	14 227	11 476	10 231	9 596
Drvena sječka (t)	424 891	474 793	442 453	416 162
Ogrjevno drvo (m³)	5 472 900	4 883 600	4 549 700	4 449 400

Izvor: EIHP (2022.), EIHP (2023.), EIHP (2024.), EIHP (2025.)

2.13. Proces prešanja peleta

Proizvodnja peleta obuhvaća više tehnoloških koraka (slika 13) uključujući prikupljanje i pripremu sirovine, drobljenje, sušenje, usitnjavanje, miješanje i kondicioniranje, prešanje, hlađenje, prosijavanje, pakiranje, transport i skladištenje (Kaliyan i Morey, 2009.).



Slika 13. Shematski prikaz procesa prešanja peleta (Izvor: Omer i sur., 2018.)

2.13.1. Prikupljanje i priprema sirovine

Za proizvodnju peleta najčešće se koristi drvena biomasa, poput piljevine i drvene sječke, te različiti poljoprivredni ostaci i energetske kulture. Kvaliteta sirovine ima važnu ulogu u procesu proizvodnje i kvaliteti konačnog proizvoda, zbog čega biomasa ne smije sadržavati primjese poput tla, kamenja i metalnih dijelova. Prije prešanja potrebno je osigurati ujednačenu veličinu čestica i homogena svojstva biomase kako bi se omogućio stabilan rad preše i proizvodnja peleta ujednačene kvalitete (Pradhan i sur., 2018a.).

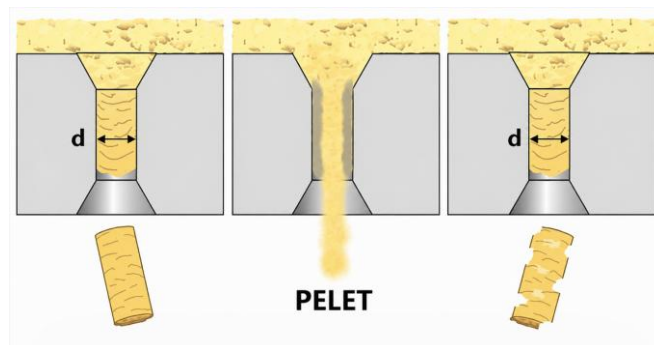
2.13.2. Drobljenje sirovine

Drobljenje biomase važan je postupak pripreme sirovine za daljnju obradu i proizvodnju peleta. Primjenjuje se kod većih i krutih materijala, poput trupaca, grana, korijenja i većih komada drvene biomase, pri čemu se veličina sirovine smanjuje na manje komade pogodne za daljnju obradu. Time se olakšava rukovanje biomasom, smanjuje opterećenje usitnjivača te povećava učinkovitost daljnjih procesa pripreme biomase. Za ovaj postupak najčešće se koriste različite vrste drobilica i rotacijskih rezača (John i sur., 2024.).

2.13.3. Sušenje sirovine

Udio vlage jedan je od najvažnijih parametara u proizvodnji peleta jer značajno utječe na kvalitetu proizvoda i energetske učinkovitost procesa. Za većinu vrsta biomase optimalni udio vlage tijekom prešanja kreće se između 10 i 15%, iako ovisi o vrsti sirovine. Previsok udio vlage može smanjiti gustoću i MI peleta te povećati emisije tijekom izgaranja. S druge strane, prenizak udio vlage otežava vezivanje čestica tijekom prešanja i može smanjiti kvalitetu peleta

(slika 14) . Optimalna vlažnost omogućuje bolje aktiviranje lignina, stabilnije formiranje peleta i manju potrošnju energije tijekom prešanja (Ståhl i sur., 2004.).

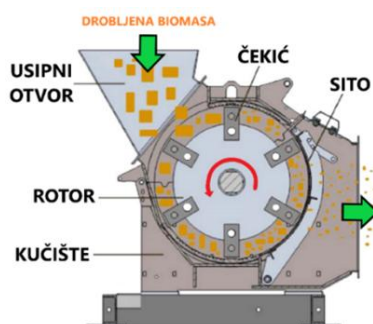


Slika 14. Utjecaj udjela vlage u sirovini na formiranje peleta (Izvor: Garcia-Maraver i Carpio, 2015.)

Prema dosadašnjim istraživanjima, optimalni udio vlage za prešanje drvene biomase najčešće iznosi između 8 i 15% (Lehtikangas, 2001.), dok je za poljoprivrednu biomasu između 10 i 20% (Stelte i sur., 2012a.). Sušenje biomase jedan je od značajnijih energetske i ekonomske izazova u proizvodnji peleta (Nolan i sur., 2010.).

2.13.4. Usitnjavanje sirovine

Nakon drobljenja i sušenja biomasa se dodatno usitnjava kako bi se dobile čestice odgovarajuće veličine za proizvodnju peleta. Kod sirovina većih dimenzija postupak se najčešće provodi u dvije faze, grubom i finom usitnjavanju, pri čemu se konačna veličina čestica prilagođava zahtjevima procesa prešanja (Bagagiolo i sur., 2017.). Veličina čestica značajno utječe na kvalitetu peleta i stabilnost proizvodnog procesa. Prevelike čestice mogu otežati formiranje peleta i uzrokovati oštećenja opreme, dok presitne povećavaju potrošnju energije i udio finih čestica u gotovom proizvodu (Moiceanu i sur., 2019.; Halba i sur., 2022.). Za usitnjavanje biomase najčešće se koriste mlinovi čekićari (slika 15), koji zbog jednostavne konstrukcije i učinkovitog rada imaju široku primjenu u pripremi biomase za prešanje (Paraschiv i sur., 2021.).



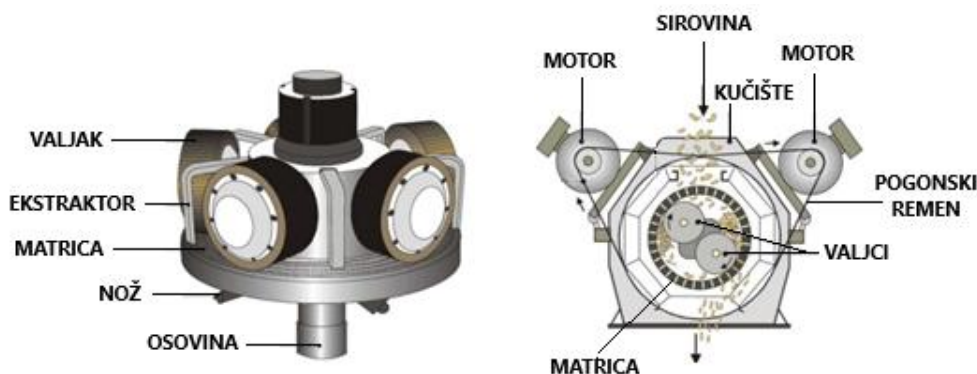
Slika 15. Shematski prikaz rada mlina čekićara (Izvor: Romaniuk i sur., 2021.)

2.13.5. Miješanje i kondicioniranje sirovine

Miješanje biomase provodi se radi postizanja ujednačenih svojstava sirovine prije prešanja, osobito kod mješavina različitih vrsta biomase ili sirovina različite vlažnosti i gustoće (Yancey i sur., 2013.). Tijekom tog postupka mogu se dodavati aditivi koji poboljšavaju proces prešanja i kvalitetu konačnog proizvoda (HRN EN ISO 17225-2). Kondicioniranje biomase podrazumijeva pripremu sirovine prije prešanja dodatkom vode ili vodene pare radi poboljšanja vezivnih svojstava. Time se potiče aktivacija lignina koji djeluje kao prirodno vezivo između čestica i omogućuje formiranje čvršćih peleta. U pojedinim sustavima koristi se pregrijana vodena para, koja povećava plastičnost biomase te može poboljšati kvalitetu peleta i smanjiti trošenje opreme (Kaliyan i Morey, 2009.; Peksa i sur., 2007.).

2.13.6. Prešanje sirovine

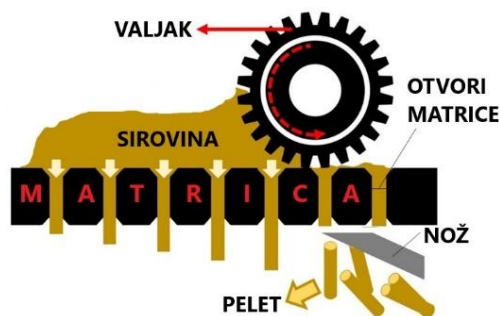
Nakon usitnjavanja biomasa se podvrgava prešanju radi povećanja energetske gustoće i poboljšanja svojstava važnih za transport, skladištenje i energetske primjene. Time se biomasa pretvara u kompaktnije oblike goriva, poput peleta i briketa, koji omogućuju jednostavnije rukovanje, skladištenje i izgaranje (Muh i sur., 2021.; Clarke i Preto, 2011.). Najznačajnije tehnologije prešanja biomase su baliranje, briketiranje i peletiranje. Peleti se proizvode pomoću preša čiji su najvažniji dijelovi valjci i matrica s cilindričnim otvorima kroz koje se potiskuje sirovina i oblikuje pelet (slika 16). Kvaliteta peleta uvelike ovisi o konstrukciji matrice i uvjetima prešanja jer oni određuju stupanj zbijanja sirovine i mehanička svojstva konačnog proizvoda. Matrica može biti izvedena kao ravna ploča ili prsten (John i sur., 2024.).



Slika 16. Konstrukcija preša za peletiranje (Izvor: Alakangas i Paju, 2002.)

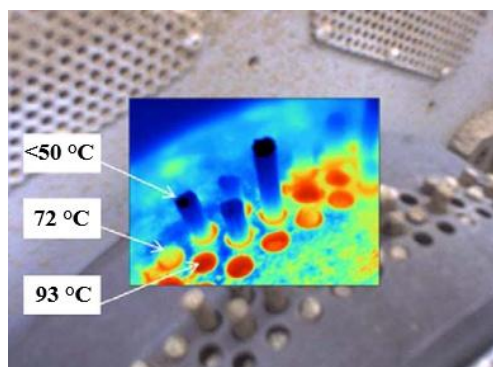
Razmak između valjaka i matrice utječe na kvalitetu peleta, potrošnju energije i trošenje opreme. Istraživanja pokazuju da povećanje razmaka do 1 mm povećava potrošnju energije približno 1,2 puta, ali istodobno smanjuje količinu sitnih čestica za oko 30% (Alakangas i Paju, 2002.). Na slici 17 prikazan je proces prešanja peleta pri kojem se biomasa pomoću pužnog dozatora dovodi u prešu, raspoređuje po matrici te djelovanjem valjaka potiskuje kroz njezine

kanale. Visoki tlak i trenje uzrokuju zagrijavanje biomase i omekšavanje lignina, koji djeluje kao prirodno vezivo između čestica (Kaliyan i Morey, 2009.). Nakon izlaska iz matrice peleti se režu na željenu duljinu (Tumuluru i Wright, 2010.).



Slika 17. Shematski prikaz procesa prešanja (Izvor: Sanchumpu i sur., 2024.)

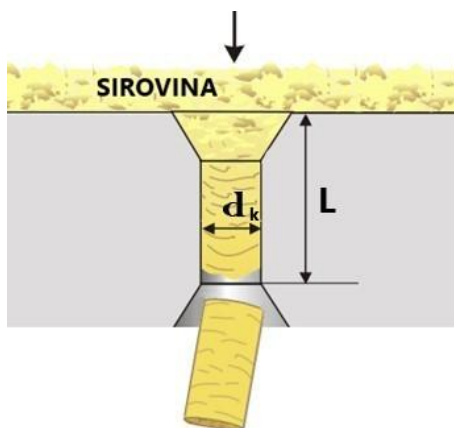
Alakangas i Paju (2002.) navode da na proces prešanja utječu svojstva sirovine, konstrukcijske značajke matrice i valjaka te radni parametri preše. Posebno su važni trenje u kanalima matrice, dimenzije kanala, debljina sloja sirovine i frekvencija prešanja. Pri stabilnim uvjetima rada temperatura matrice može doseći oko 90 °C, dok temperatura biomase iznosi približno 70 °C (slika 18) (Serrano i sur., 2011.).



Slika 18. Temperature na matrici tijekom prešanja sirovine (Izvor: Serrano i sur., 2011.)

Optimalna temperatura prešanja ovisi o vrsti biomase i značajno utječe na gustoću, mehaničku izdržljivost i kvalitetu peleta. Drvena biomasa najčešće se preša pri temperaturama između 110 i 130 °C, dok su za poljoprivrednu biomasu optimalne niže temperature (Stelte i sur., 2012a.; Moon i sur., 2014.). Šafran (2015.) utvrdio je da više temperature prešanja, između 170 i 220 °C, mogu povećati gustoću peleta i njihovu ogrjevnu vrijednost. Međutim, previsoke temperature mogu uzrokovati poteškoće u doziranju sirovine, osobito kod slame i trave (Larsson i sur., 2012.). Osim temperature, važan čimbenik procesa prešanja je tlak između matrice i valjaka. Na tlak utječu svojstva sirovine, snaga motora, brzina valjanja i dimenzije kanala matrice (Alakangas i Paju, 2002.; Stelte i sur., 2012b.). Prešanje se najčešće provodi pri tlakovima između 115 i 300 MPa, pri čemu povišeni tlakovi uglavnom poboljšavaju mehanička

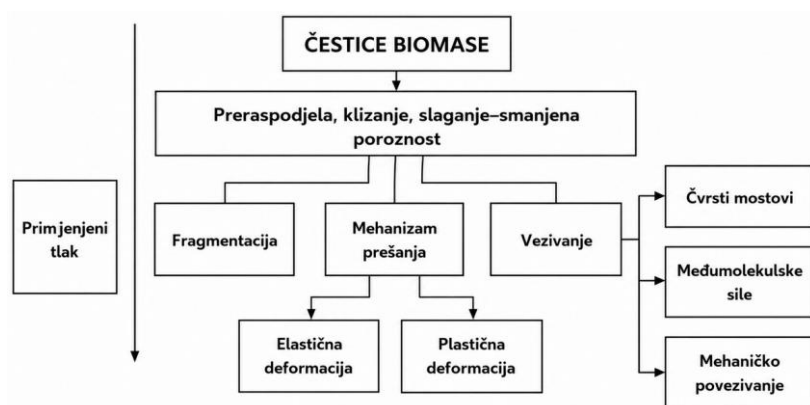
svojstva peleta, dok niski tlakovi dovode do slabijeg povezivanja čestica biomase (Nielsen i sur., 2009.). Važan parametar matrice je i omjer duljine i promjera kanala (L/d_k), odnosno omjer kompresije kojem je biomasa izložena tijekom prolaska kroz matricu (slika 19). Veći omjer kompresije povećava zbijanje biomase i čvrstoću peleta, ali istodobno povećava otpor protoku materijala i potrošnju energije (Holubcik i sur., 2012.).



Slika 19. Omjer kompresije L/d_k pri prešanju sirovine (Izvor: Holubcik i sur., 2012.)

2.13.7. Mehanizam vezivanja čestica biomase u peletima

Mehanizam vezivanja čestica tijekom prešanja ključan je za razvoj čvrstoće i stabilnosti peleta te se temelji na fizikalnim i kemijskim interakcijama između čestica biomase (slika 20). U početnoj fazi povećanjem tlaka dolazi do preraspodjele čestica i uklanjanja zraka iz međučestičnih prostora, nakon čega se čestice povezuju djelovanjem međumolekulskih sila i prolaze kroz elastičnu i plastičnu deformaciju (Pietsch, 2008.).



Slika 20. Mehanizam vezivanja čestica sirovine tijekom prešanja (Izvor: Tumuluru i sur., 2011.)

Važnu ulogu u procesu ima lignin koji pri povišenim temperaturama i tlakovima omekšava te djeluje kao prirodno vezivo biomase. Time se omogućuje stvaranje čvrstih veza između vlakana odgovornih za mehaničku stabilnost peleta (Kaliyan i Morey, 2010.; Stelte i sur., 2011.).

Povećanjem temperature lignin prelazi iz staklastog u plastično stanje, pri čemu temperatura staklastog prijelaza (T_g) ovisi o vrsti biomase, sastavu lignina i udjelu vlage (Stelte i sur., 2012b.). Nakon hlađenja lignin ponovno očvršćuje i stabilizira strukturu peleta (Greene, 2021.). Primjerice, T_g lignina kod slame pšenice pri 8% vlage iznosi 53-63 °C, dok je kod smreke oko 91 °C (Stelte i sur., 2011.). Prešanje pri temperaturama iznad T_g lignina poboljšava mehanička svojstva peleta i olakšava prolazak biomase kroz matricu.

2.13.8. Hlađenje i prosijavanje peleta

Nakon prešanja peleti izlaze iz preše pri temperaturama između 70 i 90 °C te ih je potrebno ohladiti prije skladištenja i transporta. Hlađenje je važan korak procesa jer se tijekom njega lignin ponovno očvršćuje, čime peleti postižu konačnu mehaničku čvrstoću (Carroll i Finnan, 2012.). Proces se najčešće provodi strujanjem zraka dok temperatura peleta ne bude približno 5 °C viša od temperature okoline. Pravilno hlađenje smanjuje stvaranje pukotina, lomljivost i udio sitnih čestica tijekom rukovanja i transporta (Lehtikangas, 2001.; Alakangas i Paju, 2002.). Nakon hlađenja peleti prolaze kroz vibrirajuća sita radi uklanjanja sitnih čestica i prašine, koje se najčešće vraćaju u proces proizvodnje kako bi se povećalo iskorištenje sirovine i smanjili gubici (Peksa i sur., 2007.; Masche i sur., 2019.).

2.13.9. Pakiranje i transport peleta

Pakiranje i transport ključni su za očuvanje kvalitete i mehaničke izdržljivosti peleta tijekom distribucije do krajnjeg korisnika. Peleti se najčešće pakiraju u male vreće mase od 15 do 25 kg namijenjene kućanstvima ili u velike vreće kapaciteta od 500 do 1 000 kg za opskrbu većih potrošača. Tijekom transporta potrebno je spriječiti izlaganje vlazi i mehanička oštećenja jer mogu smanjiti mehaničku izdržljivost peleta i povećati količinu prašine, što negativno utječe na kvalitetu goriva (Alakangas i Paju, 2002.).

2.13.10. Skladištenje peleta

Peleti se najčešće skladište u silosima ili zatvorenim skladištima. U praksi se koriste silosi sa suženim dnom koji omogućuju gravitacijsko pražnjenje te silosi s ravnim dnom opremljeni pužnim transporterima (Khalil i sur., 2022.). Tijekom skladištenja potrebno je kontrolirati temperaturu i vlagu jer povećani udio vlage može uzrokovati mikrobiološku degradaciju i samozagrijavanje peleta. Također, može doći do stvaranja zapaljivih plinova i eksplozivnih smjesa prašine, zbog čega požari i eksplozije predstavljaju značajan sigurnosni rizik. Stoga se u suvremenim skladišnim sustavima koriste senzori za praćenje temperature, vlage i koncentracije plinova te sustavi za detekciju požara (Miyawaki i sur., 2021.).

2.14. Karakterizacija kvalitete peleta

Kvaliteta peleta važna je za njihovu sigurnu uporabu, energetska učinkovitost i tržišnu vrijednost. Procjena kvalitete obuhvaća određivanje fizikalno-kemijskih, mehaničkih i energetskih svojstava, poput dimenzija, pojedinačne i nasipne gustoće, mehaničke izdržljivosti i tlačne čvrstoće. Radi osiguravanja ujednačene kvalitete razvijene su međunarodne norme, poput ENplus i ISO 17225, koje definiraju tehničke zahtjeve i klasifikaciju peleta prema kvaliteti (Roman i Grzegorzewska, 2024.).

2.14.1. Dimenzije i oblik peleta

Dimenzije i oblik peleta važni su za pravilan rad sustava za izgaranje, transport i automatsko doziranje goriva. Prema međunarodnim standardima, peleti najčešće imaju promjer od 6 do 8 mm i duljinu od 3,15 do 40 mm (Sermiyagina i sur., 2022.). Ujednačene dimenzije osiguravaju ravnomjeran protok i stabilno izgaranje, dok predugi ili deformirani peleti te povećana količina sitnih čestica mogu uzrokovati probleme pri rukovanju i doziranju goriva (Gasperini i sur., 2024.). Kvalitetni peleti trebaju biti cilindričnog oblika, homogene površine, bez vidljivih pukotina i deformacija, što upućuje na pravilno provedeno prešanje i dobro povezivanje čestica biomase (Pradhan i sur., 2018b.).

2.14.2. Pojedinačna gustoća peleta

Pojedinačna gustoća (PG) predstavlja omjer mase i volumena peleta te je važan pokazatelj njegove kvalitete. Veća gustoća omogućuje sporije i ravnomjernije izgaranje, povećava energetska gustoća goriva i doprinosi većoj otpornosti peleta na mehanička oštećenja tijekom transporta i skladištenja. Vrijednosti PG najčešće se kreću od 1 000 do 1 200 kg/m³, ovisno o vrsti biomase i uvjetima prešanja (Carroll i Finnan, 2012.).

2.14.3. Nasipna gustoća peleta

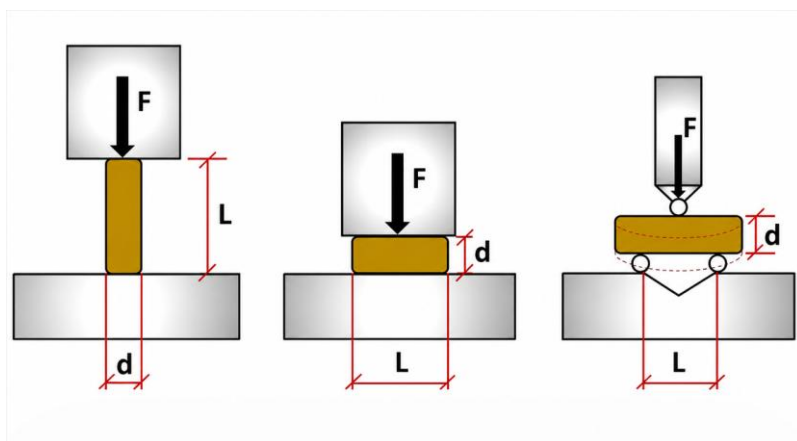
Nasipna gustoća označava masu peleta unutar određenog volumena, uključujući međuprostor između pojedinačnih peleta. Ovo svojstvo važno je za procjenu učinkovitosti skladištenja i transporta jer veća NG omogućuje veću količinu energije u manjem volumenu. Peleti s većom NG obično imaju bolju stabilnost tijekom rukovanja te manju sklonost lomu i stvaranju prašine. Vrijednosti NG najčešće se kreću od 550 do 700 kg/m³, ovisno o vrsti biomase, stupnju zbijanja i uvjetima proizvodnje. Razlike u NG povezane su s fizikalno-kemijskim svojstvima biomase, zbog čega drvena i poljoprivredna biomasa mogu pokazivati različite vrijednosti ovog svojstva (Carroll i Finnan, 2012.).

2.14.4. Mehanička izdržljivost peleta

Mehanička izdržljivost (MI) jedno je od najvažnijih svojstava peleta jer pokazuje njihovu sposobnost zadržavanja oblika i strukture tijekom rukovanja, transporta i skladištenja (HRN EN ISO 16559:2022). Peleti niske MI lakše se lome i stvaraju sitne čestice te prašinu, što može otežati doziranje goriva, smanjiti učinkovitost izgaranja i povećati sigurnosne rizike (Kanageswari i sur., 2022.). Mehanička izdržljivost izražava se kao udio mase peleta koji ostaju neoštećeni nakon mehaničkog opterećenja, pri čemu veće vrijednosti ukazuju na kvalitetnije i stabilnije pelete. Na MI utječu vrsta biomase, veličina čestica, udio vlage te uvjeti prešanja, posebno temperatura i tlak, kao i udio lignina te ostalih vezivnih komponenti u sirovini (Oduntan i Koya, 2015.; Horabik i sur., 2021.). Ispitivanje MI provodi se prema normi HRN EN ISO 17831-1.

2.14.5. Tlačna čvrstoća peleta

Tlačna čvrstoća (TČ) predstavlja maksimalno opterećenje koje pelet može podnijeti prije loma ili značajne deformacije te je važan pokazatelj njegove otpornosti tijekom rukovanja, skladištenja i transporta (Abdollahi i sur., 2013.; Kumar i sur., 2022.). Iako ne postoji jedinstvena metoda za određivanje TČ peleta, u istraživanjima se često primjenjuje metoda ispitivanja tlačne čvrstoće cilindričnih uzoraka betona prema normi HRN EN 12390-3:2019. Tijekom ispitivanja pelet se opterećuje do loma, a TČ se može odrediti u aksijalnom i radijalnom smjeru te savijanjem, kao što je prikazano na slici 21 (Williams i sur., 2018.).



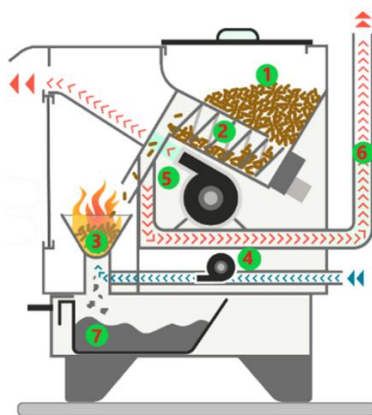
Slika 21. Shematski prikaz određivanja tlačne čvrstoće (Izvor: Williams i sur., 2018.)

Tijekom skladištenja i transporta peleti su izloženi silama iz različitih smjerova, zbog čega neki autori navode da radijalno određivanje TČ može bolje prikazati njihovo ponašanje u stvarnim uvjetima. Razlog je što se lom najčešće javlja u najslabijem dijelu strukture peleta. Na TČ utječu sastav i homogenost sirovine, udio vlage, dimenzije peleta te uvjeti skladištenja. Povećani udio vlage može oslabiti vezivne sile između čestica biomase, dok nepravilna i nehomogena

struktura peleta uzrokuje neujednačen raspored naprezanja i raniji lom uzorka (Kubik i Kažimírová, 2015.; Kabay i Aköz, 2020.).

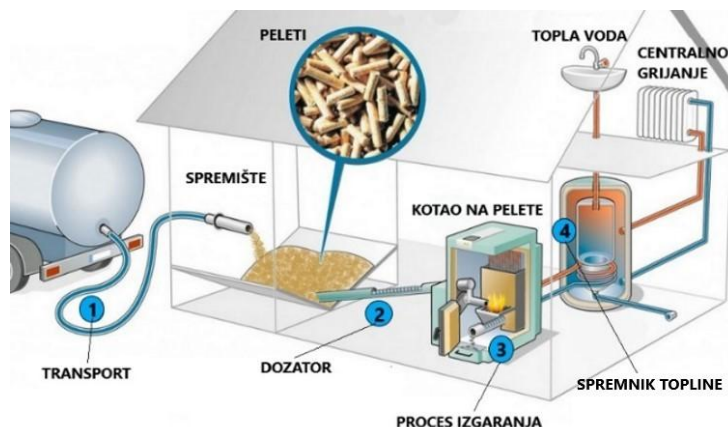
2.15. Sustavi za izgaranje peleta

Sustavi za izgaranje peleta posljednjih su godina sve zastupljeniji u kućanstvima, komercijalnim objektima i manjim energetske postrojenjima. Najčešće se koriste peći i kotlovi na pelete za grijanje prostora i pripremu tople vode (Bärfver i sur., 2011.). Rad peći temelji se na automatskom doziranju goriva u ložište, čime se osigurava kontinuirano i ravnomjerno izgaranje. Na slici 22 prikazani su glavni dijelovi peći na pelete: spremnik goriva (1), sustav za doziranje (2), ložište (3), ventilatori (4 i 5), dimovod (6) i spremnik pepela (7) (Angi, 2025.).



Slika 22. Shematski prikaz glavnih dijelova peći na pelete (Izvor: Angi, 2025.)

Za pravilan rad sustava važan je odgovarajući dovod zraka, dok se toplina nastala izgaranjem preko izmjenjivača topline prenosi u prostor ili sustav grijanja, a dimni plinovi odvede kroz dimovodni sustav (Karamarković i sur., 2015.; EPA, 2025.). Kotlovi na pelete najčešće se koriste u centralnim sustavima grijanja (slika 23), pri čemu moderni sustavi imaju automatizirano upravljanje koje omogućuje stabilniji rad i veću energetske učinkovitost (Brunner, 2011.).



Slika 23. Shematski prikaz sustava kotla na pelete (Izvor: Pellergy, 2025.)

2.16. Emisije dimnih plinova pri izgaranju goriva

2.16.1. Sastav i utjecaj onečišćujućih tvari u dimnim plinovima

Do onečišćenja zraka dolazi prirodnim i antropogenim putem, pri čemu su danas posebno značajni izvori povezani s proizvodnjom energije, industrijom, prometom i kućanstvima (Farid i sur., 2023.). Tijekom izgaranja nastaju dimni plinovi koji sadrže različite onečišćujuće tvari. Najčešće se dijele na primarne, poput SO_x , NO_x , CO_2 , CO , amonijaka (NH_3), metana (CH_4), VOC-a te lebdećih čestica ($\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10}), i sekundarne, poput prizemnog ozona (O_3), koji nastaje fotokemijskim reakcijama NO_x i VOC spojeva (Wang i sur., 2020a.). Među najznačajnijim posljedicama emisija dimnih plinova ističu se efekt staklenika, kisele kiše te negativan utjecaj lebdećih čestica i prizemnog ozona na kvalitetu zraka i ljudsko zdravlje (Perera, 2018.; Wang i sur., 2024.).

2.16.2. Izvori i sastav emisija pri izgaranju goriva

Najznačajniji izvori onečišćenja zraka dijele se na pokretne i nepokretne. Pokretni izvori obuhvaćaju prometna sredstva, poput osobnih i teretnih vozila, autobusa, vlakova, plovila i zrakoplova, pri čemu tijekom izgaranja goriva nastaju emisije CO , NO_x , ugljikovodika (HC) i PM (Zhang i sur., 2021.). Nepokretni izvori uključuju industrijska postrojenja, termoelektrane, spalionice otpada i kućna ložišta koja emitiraju značajne količine dimnih plinova, ponajprije SO_2 , NO_x , CO i lebdećih čestica. Količina i sastav emisija ovise o vrsti goriva, uvjetima izgaranja i učinkovitosti sustava za pročišćavanje dimnih plinova (Vallero, 2020.).

2.16.3. Praćenje emisija dimnih plinova

Redovita kontrola emisija iz nepokretnih izvora provodi se analizom sastava dimnih plinova kako bi se utvrdila usklađenost s propisanim graničnim vrijednostima emisija (GVE) (Testo, 2014.). Granične vrijednosti definirane su nacionalnim i europskim zakonodavstvom s ciljem smanjenja negativnog utjecaja emisija na okoliš i kvalitetu zraka. U slučaju prekoračenja

dopuštenih vrijednosti potrebno je provesti korektivne mjere, poput optimizacije procesa izgaranja ili primjene sustava za pročišćavanje dimnih plinova (EC, 2025.). Radi usporedbe rezultata s propisanim GVE, koncentracije onečišćujućih tvari izražavaju se pri standardnim uvjetima temperature i tlaka ($T = 273,15 \text{ K}$; $p = 101,325 \text{ kPa}$) (Schröder i sur., 2018.). Najčešće se koriste masena koncentracija, izražena u mg/m^3 , i volumni udio, izražen u % ili ppm. Masena koncentracija predstavlja masu tvari u jedinici volumena plina, dok volumni udio označava omjer volumena pojedinog plina i ukupnog volumena dimnih plinova (Renke, 2025.).

2.17. Zakonska regulativa emisija iz uređaja na kruta goriva i biomasu

2.17.1. Hrvatski zakonodavni okvir

Hrvatski zakonodavni okvir za praćenje emisija onečišćujućih tvari temelji se na Zakonu o zaštiti zraka (ZZZ) (NN 127/2019), kojim su definirane mjere praćenja emisija, procjene kvalitete zraka te sprječavanja i smanjenja onečišćenja radi zaštite zdravlja ljudi i okoliša. Na temelju ZZZ-a doneseni su podzakonski propisi koji detaljnije uređuju područje praćenja emisija i kvalitete zraka:

- Pravilnik o praćenju emisija (PPE) onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 47/2021),
- Uredba o graničnim vrijednostima emisija (Uredba o GVE) onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 42/2021).

Ovim propisima definirani su način praćenja emisija, referentne metode mjerenja, uzorkovanje, vrednovanje rezultata te granične vrijednosti emisija za nepokretne izvore. PPE dodatno propisuje vrste i opseg mjerenja, provjeru i umjeravanje mjernih instrumenata te obveze dostave podataka u informacijski sustav zaštite zraka i informiranja javnosti o rezultatima praćenja emisija (NN 47/2021.). Uredbom o GVE uređuju se granične vrijednosti emisija onečišćujućih tvari iz nepokretnih izvora, način praćenja i vrednovanja emisija te uvjeti dopuštenih prekoračenja za postojeće izvore. Granična vrijednost emisije predstavlja najveću dopuštenu koncentraciju ili količinu onečišćujuće tvari ispuštene u određenom vremenu, a primjenjuje se na mjestu ispusta otpadnih plinova iz postrojenja. Nepokretni izvori moraju zadovoljiti propisane GVE za otpadne plinove i fuge emisije, pri čemu se emisije utvrđuju mjerenjem i/ili izračunom. Praćenje emisija provodi se prema odredbama PPE-a i Uredbe o GVE, a mjerenja mogu biti prva, povremena, kontinuirana ili posebna (NN 42/2021.).

2.17.2. Uredba Komisije (EU) 2015/1189 o ekološkom dizajnu kotlova na kruto gorivo

Uz hrvatski zakonodavni okvir, emisije iz uređaja na kruta goriva regulirane su i propisima EU koji definiraju zahtjeve energetske učinkovitosti i zaštite okoliša za proizvode povezane s energijom. Uredba Komisije (EU) 2015/1189 donesena je na temelju Direktive 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća, kojom je uspostavljen okvir za određivanje zahtjeva ekološkog dizajna proizvoda povezanih s energijom. Uredbom su definirani zahtjevi koje kotlovi na kruta goriva moraju zadovoljiti pri stavljanju na tržište i uporabi, uključujući dopuštene razine emisija. Primjenjuje se na kotlove nazivne toplinske snage do 500 kW, uključujući kotlove na biomasu i pelete. Uredba propisuje granične vrijednosti emisija onečišćujućih tvari u dimnim plinovima, uključujući CO i NO_x. Za automatski ložene kotlove na biomasu emisije CO ne smiju prelaziti 500 mg/m³, a emisije NO_x, izražene kao NO₂, 200 mg/m³ pri referentnom udjelu O₂ od 10% u dimnim plinovima. Cilj uredbe je smanjenje emisija onečišćujućih tvari i povećanje energetske učinkovitosti uređaja za grijanje na kruta goriva u državama članicama Europske unije (EUR-Lex 1189, 2015.).

2.17.3. Granične vrijednosti emisija

U tablici 16 prikazane su GVE za onečišćujuće tvari obuhvaćene ovim istraživanjem prema Uredbi o GVE i Uredbi Komisije (EU) 2015/1189 za male uređaje za loženje (MUL) na kruta goriva i goriva od biomase. Uredba Komisije propisuje strože granične vrijednosti emisija CO te dodatno definira GVE za NO_x u odnosu na nacionalnu Uredbu o GVE.

Tablica 16. Granične vrijednosti emisija za CO i NO_x prema regulativi RH i EU

Onečišćujuća tvar	Uredba o GVE (mg/m ³)	Uredba Komisije (EU) 2015/1189 (mg/m ³)
CO	1000	500
NO _x	-	200

Izvor: EUR-Lex 1189 (2015.); NN 42 (2021.)

2.18. Mjerenje i uzorkovanje dimnih plinova iz nepokretnih izvora

Mjerenje koncentracija onečišćujućih tvari u otpadnim plinovima mora biti reprezentativno, a operater je dužan osigurati odgovarajuće mjerno mjesto na svakom ispustu sukladno normi HRN EN 15259. Mjerno mjesto mora omogućiti sigurno i pouzdano provođenje mjerenja. Za određivanje parametara stanja otpadnih plinova i koncentracija onečišćujućih tvari primjenjuju se metode propisane CEN i ISO normama iz Priloga I. Pravilnika. Ako takve norme nisu dostupne, mogu se koristiti metode drugih normizacijskih tijela i tehničke smjernice, poput DIN, BS, EPA i VDI dokumenata. Rezultati mjerenja emisija izražavaju se kao srednje

vrijednosti dobivene tijekom propisanog razdoblja uzorkovanja, sukladno PPE onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 47/2021.).

2.18.1. Sustav za analizu emisija dimnih plinova

Za mjerenje koncentracija dimnih plinova najčešće se koriste uređaji koji omogućuju istodobno određivanje koncentracija više plinova. Takvi uređaji sastoje se od sustava za uzimanje uzorka dimnog plina i sustava za analizu koncentracija plinova. Njihov rad temelji se na uzimanju uzorka iz dimovodnog kanala i njegovu provođenju do analitičkog sustava. Sustav za uzimanje uzorka osigurava dovođenje plina do analizatora, dok se analitički sustav sastoji od više senzora koji primjenjuju različite metode određivanja koncentracija pojedinih plinova.

Sustav za uzimanje uzorka obuhvaća sondu za uzorkovanje dimnih plinova, filter za uklanjanje čestica i nečistoća, transportnu liniju za prijenos plina do analizatora, sustav za kondicioniranje plina kojim se uklanja vlaga te pumpu i sustav za regulaciju protoka koji osiguravaju stalan i kontroliran protok plina kroz mjerni sustav (Testo, 2014.; Schröder i sur., 2018.)

2.19. Metode analize sastava dimnih plinova

2.19.1. Određivanje koncentracije ugljikova monoksida

Referentna metoda za određivanje masene koncentracije CO u dimnim plinovima definirana je normom HRN EN 15058:2017 i temelji se na nedisperzivnoj infracrvenoj (NDIR) spektrometriji. Metoda omogućuje određivanje koncentracije CO u dimnim plinovima emitiranim iz dimnjaka i ispušnih kanala. Rezultati se iskazuju na suhoj osnovi pri referentnim uvjetima temperature i tlaka (273,15 K i 101,325 kPa).

2.19.2. Određivanje koncentracije dušikovih oksida

Referentna metoda za određivanje masene koncentracije NO_x definirana je normom HRN EN 14792:2017 i temelji se na kemiluminescentnoj reakciji NO s ozonom. Nastalo elektromagnetsko zračenje proporcionalno je koncentraciji NO u uzorku plina, a rezultati se iskazuju kao koncentracija NO_x izražena kao NO₂.

2.19.3. Određivanje koncentracije sumpornih dioksida

Referentna metoda za određivanje masene koncentracije SO₂ definirana je normom HRN EN 14791:2017. Određivanje koncentracije temelji se na ionskoj kromatografiji ili Thorinovoju metodi, a rezultati se iskazuju na suhoj osnovi pri referentnim uvjetima temperature i tlaka.

2.19.4. Određivanje koncentracije sumporovodika

Za razliku od ostalih plinova, za određivanje masene koncentracije sumporovodika (H₂S) u dimnim plinovima ne postoji izravna standardna referentna metoda. Stoga se primjenjuje

neizravni analitički postupak temeljen na termičko-katalitičkoj konverziji H_2S u SO_2 , nakon čega se koncentracija određuje UV-fluorescentnom metodom. Sustav uključuje uzorkovanje i kondicioniranje plina te uklanjanje mogućih interferencija. Validacija alternativnog mjernog sustava provodi se prema zahtjevima norme HRN EN 14793, dok se kalibracija i izračun koncentracije temelje na principima norme HRN EN 14791.

2.19.5. Određivanje koncentracije kisika

Paramagnetska metoda za određivanje volumne koncentracije O_2 definirana je normom HRN EN 14789:2017. Izmjerene vrijednosti koriste se za preračunavanje koncentracija onečišćujućih tvari na referentni udio kisika i uvjete suhog plina.

2.19.6. Određivanje koncentracije ugljikova dioksida

Određivanje volumne koncentracije CO_2 provodi se infracrvenom spektrometrijom prema tehničkoj specifikaciji CEN/TS 17405:2020. Metoda se temelji na apsorpciji infracrvenog zračenja i omogućuje određivanje koncentracije CO_2 u dimnim plinovima iz dimnjaka i ispustnih kanala.

2.20. Iskazivanje i standardizacija rezultata emisija dimnih plinova

Rezultati ispitivanja emisija dimnih plinova najčešće se iskazuju kao masena koncentracija ili volumni udio pojedinih plinova. Masena koncentracija predstavlja količinu tvari u određenom volumenu dimnog plina i najčešće se izražava u miligramima po kubnom metru (mg/m^3) ili mikrogramima po kubnom metru ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Volumni udio plinova iskazuje se u postocima (%) ili dijelovima na milijun (ppm). Radi usporedivosti rezultata, izmjerene vrijednosti korigiraju se na normirane uvjete temperature i tlaka (273,15 K i 101,325 kPa) te na referentni udio O_2 , ovisno o vrsti goriva i uvjetima izgaranja (EPA, 2021.; Tamelová i sur., 2022.).

3. MATERIJALI I METODE

U istraživanju je kao sirovina korištena drvena biomasa hrasta lužnjaka (HRA) te poljoprivredna biomasa suncokreta (SUN), soje (SOJ), kukuruza (KUK) i pšenice (PŠE). Drvena biomasa hrasta lužnjaka pribavljena je iz tvrtke Bjelin Otok d.o.o. (45°09'01.8" N, 18°55'11.6" E), dok je poljoprivredna biomasa, odnosno stabljike suncokreta i kukuruza te slama soje i pšenice, pribavljena iz Poljoprivrednog instituta Osijek (45°32'26.7" N, 18°44'09.4" E).

3.1. Prikupljanje biomase i priprema uzoraka za analize

3.1.1. Prikupljanje biomase

U prvoj fazi istraživanja prikupljena je drvena biomasa hrasta lužnjaka u obliku ostataka nastalih tijekom obrade trupaca na tračnoj pili u tvrtki Bjelin Otok d.o.o., pri proizvodnji hrastovog furnira. Uzorci su prikupljeni tijekom veljače 2023. S ostataka je mehanički uklonjena kora, nakon čega je biomasa u pogonu usitnjena do veličine krupne sječke i pakirana u transportne vreće za rasuti teret mase 500 kg (slika 24).



Slika 24. Odkoreni i usitnjeni ostaci hrasta (Izvor: vlastita arhiva)

Poljoprivredna biomasa prikupljena je kao posliježetveni ostatak nakon primarne proizvodnje na proizvodnim površinama Poljoprivrednog instituta Osijek tijekom vegetacijske sezone 2023. godine. Posliježetveni ostaci skladišteni su u četvrtastim i valjkastim balama (slika 25). Metodom nasumičnog odabira izdvojene su bale ukupne mase oko 100 kg slame soje i pšenice, dok su stabljike kukuruza bile skladištene u valjkastim balama mase približno 400 kg. Stabljike suncokreta prikupljene su izravno s proizvodne površine nakon uklanjanja cvatnih glava, također metodom nasumičnog uzorkovanja, pri čemu je ukupna masa prikupljenog materijala iznosila oko 100 kg.



Slika 25. Poljoprivredna biomasa u obliku bala (Izvor: vlastita arhiva)

Nakon provedenog uzorkovanja, biomasa je transportirana na Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvne tehnologije (FŠDT), radi pripreme za daljnje analize. Analize su provedene na Zavodu za tehnologije materijala, u Laboratoriju za kemiju lignoceluloznih materijala FŠDT-a, te na Zavodu za održive tehnologije i obnovljive izvore energije, u Laboratoriju za istraživanje biomase i energetske iskoristivost u poljoprivredi, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.

3.1.2. Sušenje biomase

Ostaci hrasta nakon obrade na tračnoj pili, a prije usitnjavanja u drvoprerađivačkom pogonu, skladišteni su na paletama i izloženi vanjskim vremenskim uvjetima. Zbog toga je provedeno konvekcijsko sušenje radi ujednačavanja udjela vlage u sirovini, pri temperaturi od 60 °C tijekom 48 sati. Istom postupku sušenja podvrgnuti su i posliježetveni ostaci poljoprivrednih kultura. Sušenje je provedeno u sušioniku Memmert UN750plus (Memmert GmbH + Co. KG, Njemačka) (Slika 26).



Slika 26. Sušenje drvene i poljoprivredne biomase u sušioniku (Izvor: vlastita arhiva)

Tijekom sušenja biomasa je u posudama povremeno miješana radi osiguranja ravnomjernog sušenja. Udio vlage u biomasi kontroliran je halogenim analizatorom vlage KERN DAB 100-3 (KERN & SOHN GmbH, Njemačka) (slika 27).



Slika 27. Određivanje udjela vlage na analizatoru KERN (Izvor: vlastita arhiva)

3.1.3. Usitnjavanje uzoraka biomase

Nakon sušenja, uzorci biomase hrasta i poljoprivrednih kultura usitnjeni su pomoću mlina sjekača Retsch SM400 (Retsch GmbH, Njemačka) (slika 28), pri čemu je korišteno sito s okruglim otvorima promjera 10 mm, sukladno normi HRN EN ISO 14780:2017. Usitnjeni uzorci biomase pohranjeni su u označene PVC vreće do daljnjih analiza.



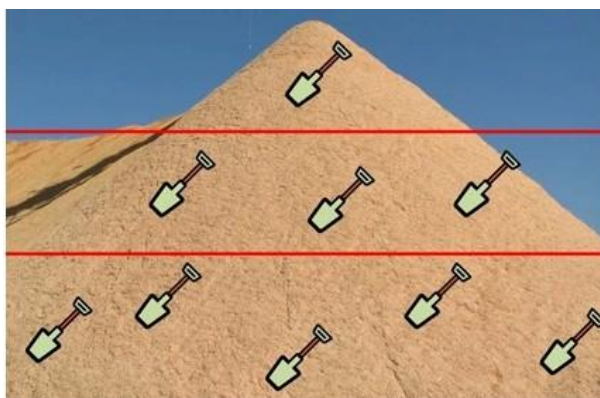
Slika 28. Usitnjavanje biomase na mlinu sjekaču (Izvor: vlastita arhiva)

Daljnje usitnjavanje manjeg dijela prethodno pripremljenih uzoraka biomase provedeno je mlinom čekićarem Retsch SR300 (Retsch GmbH, Njemačka), pri čemu je korišteno sito s trapezoidnim otvorima promjera 2 mm, sukladno normi HRN EN ISO 14780:2017, uz frekvenciju rotacije od 3000 min^{-1} . Cilj usitnjavanja bio je dobiti što veći udio čestica veličine između 0,50 i 0,71 mm, pogodnih za daljnje kemijske analize. Tijekom usitnjavanja praćena je temperatura uzorka, pri čemu nisu zabilježena značajnija odstupanja u odnosu na temperaturu sušenja. Temperatura uzorka kretala se između 40 i 60 °C (slika 29).



Slika 29. Usitnjavanje biomase na mlinu čekićaru i kontrola zagrijavanja uzorka (Izvor: vlastita arhiva)

Nakon usitnjavanja svaki uzorak biomase oblikovan je u konusnu hrpu iz koje je lopaticom uzeto devet jednakih probira: jedan s vrha, tri iz srednjeg dijela i pet iz donjeg dijela hrpe. Uzorci su uzimani najmanje 30 cm iznad podloge kako bi se izbjegla moguća kontaminacija (slika 30).



Slika 30. Shematski prikaz uzorkovanja (Izvor: Marinescu i sur., 2015.)

Svih devet probira objedinjeno je u jedinstveni uzorak koji je zatim više puta promiješan radi postizanja homogenosti. Homogenizirani uzorak raspoređen je na podlogu u obliku kruga ujednačene debljine te podijeljen na poduzorke. Dva dijagonalno suprotna poduzorka spremljena su u PVC vreće radi zaštite od vanjskih utjecaja i mogućih promjena svojstava uzorka. Na vreće su postavljene etikete s oznakama uzorka.

3.1.4. Prosijavanje i određivanje granulometrijskog sastava usitnjene biomase

Uzorci biomase nakon usitnjavanja prosijani su na vibracijskoj sitotresilici Retsch AS200 BASIC (Retsch GmbH, Njemačka) sukladno normi HRN EN ISO 17827-2:2024, koristeći sita Retsch prema normi ISO 3310-1:2016 s otvorima 2,0, 1,25, 1,0, 0,71, 0,50, 0,125 i <0,125 mm. Granulometrijski sastav određen je vaganjem 100 g uzorka na preciznoj vagi KERN 440-49N (KERN & SOHN GmbH, Njemačka), nakon čega je uzorak prosijavan 30 minuta pri amplitudi

oscilacije 80 (slika 31). Sadržaj svakog sita zasebno je izvagan te je određen maseni udio pojedine frakcije. Preostali dio uzoraka dodatno je prosijan radi izdvajanja frakcije veličine između 0,50 i 0,71 mm, koja je korištena za daljnje analize.



Slika 31. Prosijavanje uzoraka na sitotresilici (Izvor: vlastita arhiva)

3.2. Određivanje fizikalno-kemijskih svojstava biomase

Nakon pripreme uzoraka određena su fizikalno-kemijska svojstva biomase. Dobiveni rezultati korišteni su za usporedbu svojstava biomase i promjena nastalih tijekom procesa prešanja.

3.2.1. Određivanje nasipne gustoće u biomasi

Analiza nasipne gustoće biomase, kao i kasnije proizvedenih peleta, provedena je prema normi HRN EN ISO 17828:2025, koja se temelji na određivanju mase uzorka unutar poznatog volumena (slika 32). Uzorak je pažljivo dodan u standardiziranu posudu volumena 5 L bez dodatnog sabijanja te je odvagnut preciznom vagom točnosti 0,10 g, nakon čega je određena ukupna masa.



Slika 32. Određivanje nasipne gustoće biomase i peleta (Izvor: vlastita arhiva)

Nasipna gustoća izračunata je prema jednadžbi 1:

$$\rho_n \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{m_p}{V_{po}} = \frac{m_2 - m_1}{V_{po}} \quad (1)$$

gdje je:

ρ_n - nasipna gustoća (kg/m³)

m_1 - masa prazne posude (kg)

m_2 - masa posude s uzorkom (kg)

V_{po} - volumen posude (m³)

3.2.2. Određivanje udjela vlage u biomasi

Analiza udjela vlage provedena je prema normi HRN EN ISO 18134-1:2022 u laboratorijskom sušioniku Memmert UF160 (Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Njemačka). Na analitičkoj vagi RADWAG AS310.X2 PLUS (RADWAG, Radom, Poljska) odvagano je približno 1 g uzorka u staklenoj posudici, nakon čega je uzorak sušen na temperaturi od 103±2 °C tijekom 4 sata (slika 33). Sušenje je ponavljano do postizanja konstantne mase uzorka.



Slika 33. Određivanje udjela vlage u laboratorijskom sušioniku (Izvor: vlastita arhiva)

Udio vlage izračunat je prema jednadžbi 2:

$$w \text{ (\%)} = \frac{b - a}{b} * 100 \quad (2)$$

gdje je:

w - udio vlage (%)

a - masa uzorka nakon sušenja (g)

b - masa uzorka prije sušenja (g)

3.2.3. Određivanje udjela pepela u biomasi

Analiza udjela pepela provedena je prema normi HRN EN ISO 18122:2022 u mufolnoj peći Nabertherm L9/11/B170 (Nabertherm GmbH, Njemačka) (slika 34). Za analizu je u porculanskoj posudici na analitičkoj vagi odvađnuto 2 do 3 g uzorka, nakon čega je uzorak žaren na temperaturi od 550 °C tijekom 4 sata. Nakon žarenja posudice su ohlađene u eksikatoru, a zatim je određena masa preostalog pepela.



Slika 34. Analiza udjela pepela u mufolnoj peći (Izvor: vlastita arhiva)

Udio pepela izračunat je prema jednadžbi 3:

$$P (\%) = \frac{a}{b} * 100 \quad (3)$$

gdje je:

P - udio pepela (%)

a - masa ostatka pepela (g)

b - masa apsolutno suhog uzorka (g)

3.2.4. Određivanje udjela koksa u biomasi

Analiza udjela koksa provedena je prema normi HRN EN ISO 18123:2023 u mufolnoj peći Nabertherm L9/11/B170 (Nabertherm GmbH, Njemačka) (slika 34). Za analizu je u porculanskoj posudici na analitičkoj vagi odvađnuto 2 do 3 g uzorka. Uzorak je žaren u poklopljenoj posudici pri temperaturi od 900±10 °C tijekom 7 minuta, nakon čega je posudica ohlađena i ponovno izvagana. Udio koksa izračunat je prema jednadžbi 4:

$$Koks (\%) = \frac{m_2}{m_1} * 100 \quad (4)$$

gdje je:

m_1 - masa apsolutno suhog uzorka (g)

m_2 - masa uzorka nakon žarenja (g)

3.2.5. Određivanje udjela fiksiranog ugljika u biomasi

Analiza udjela C_{fix} provedena je računski prema normi HRN EN ISO 18123:2023, koristeći vrijednosti udjela vlage, pepela i hlapljivih tvari (HT). Udio C_{fix} izračunat je prema jednadžbi 5:

$$C_{fix} (\%) = 100 - [vlaga (\%) + pepeo (\%) + HT(\%)] \quad (5)$$

3.2.6. Određivanje udjela hlapljivih tvari u biomasi

Analiza udjela HT provedena je prema normi HRN EN ISO 18123:2023, pri čemu je najprije određen udio gorivih tvari (GT) prema jednadžbi 6, a potom udio HT prema jednadžbi 7.

$$GT (\%) = 100 - [vlaga (\%) + pepeo (\%)] \quad (6)$$

$$HT (\%) = GT (\%) - C_{fix} (\%) \quad (7)$$

3.3. Određivanje elementarnog sastava biomase

Elementarni sastav biomase, koji obuhvaća udjele C, H, O, N i S, važan je pokazatelj njezinih kemijskih i energetske svojstava. Ovi elementi utječu na ogrjevnost, karakteristike izgaranja, emisije dimnih plinova te prikladnost biomase za proizvodnju biogoriva.

3.3.1. Određivanje udjela ugljika, dušika, vodika i sumpora u biomasi

Analiza udjela C, H i N u uzorcima provedena je metodom suhog spaljivanja prema normi HRN EN ISO 16948:2015, dok je udio S određen prema normi HRN EN ISO 16994:2016. Analiza je izvedena na analizatoru Vario MACRO CHNS (Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Njemačka) (slika 35). Postupak se temelji na izgaranju uzorka u struji O_2 pri temperaturi od 1150 °C uz prisutnost volframova oksida (WO_3) kao katalizatora. Tijekom izgaranja nastaju NO_x , CO_2 , SO_2 i H_2O , koji prolaze kroz redukcijsku kolonu zagrijanu na 850 °C, gdje se pomoću bakra NO_x reducira u N_2 . Nastali N_2 transportira se plinom nosiocem, helijem (He), do termo-vodljivog detektora (TCD), dok ostali plinovi prije detekcije prolaze kroz adsorpcijske kolone u kojima se zasebno zadržavaju i kvantificiraju.



Slika 35. Analiza elementarnog sastava u CHNS analizatoru (Izvor: vlastita arhiva)

3.3.2. Određivanje udjela kisika u biomasi

Udio kisika u biomasi određen je neizravno, primjenom bilance mase na temelju prethodno utvrđenog elementarnog sastava uzorka, odnosno poznatih udjela C, H, N i S. Budući da zbroj masenih udjela svih elemenata u biomasi iznosi 100%, udio O izračunava se prema jednadžbi 8:

$$O (\%) = 100 - (C (\%) + H (\%) + N (\%) + S (\%)) \quad (8)$$

3.3.3. Određivanje H/C i O/C omjera pojedinačne vrste biomase

Omjeri H/C i O/C određeni su na temelju elementarnog sastava biomase izraženog masenim udjelima H, C i O. Za izračun molarnih omjera, maseni udjeli elemenata podijeljeni su njihovim atomskim masama, a zatim su omjeri izračunati prema jednadžbama 9 i 10 (XOS, 2025.; Molyarova i sur., 2025.):

$$H/C = \frac{w_{\%}H / 1}{w_{\%}C / 12} \quad (9)$$

$$O/C = \frac{w_{\%}O / 16}{w_{\%}C / 12} \quad (10)$$

gdje je:

$w_{\%}$ - maseni udio vodika (H), ugljika (C) i kisika (O)

atomska masa (približno): H = 1 g/mol, C = 12 g/mol, O = 16 g/mol

3.4. Određivanje ogrjevnih vrijednosti biomase

Ogrjevna vrijednost biomase određena je kalorimetrijskom metodom, koja omogućuje precizno mjerenje energije oslobođene izgaranjem uzorka u kontroliranim uvjetima. U istraživanju su određene gornja i donja ogrjevna vrijednost uzoraka biomase. Nakon analize pojedinačnih biomasa i njihovih mješavina, vrijednosti GOV i DOV preračunate su na apsolutno suhu tvar radi usporedbe s proizvedenim peletima.

3.4.1. Određivanje gornje ogrjevne vrijednosti biomase

Analiza gornje ogrjevne vrijednosti provedena je prema normi HRN EN ISO 18125:2017 primjenom adijabatskog kalorimetra IKA C6000 (IKA Analysentechnik GmbH, Staufen im Breisgau, Njemačka). Za analizu je u kvarcnoj posudici na analitičkoj vagi odvađeno 0,5 do 1,0 g uzorka, nakon čega je posudica postavljena u kalorimetrijsku bombu napunjenu O₂ (slika 36). Uzorak je zapaljen pomoću zapaljive niti, a uređaj je bilježio porast temperature nastao njegovim izgaranjem. Na temelju izmjerene porasta temperature određena je gornja ogrjevna vrijednost uzorka.



Slika 36. Analiza gornje ogrjevne vrijednosti pomoću kalorimetra (Izvor: vlastita arhiva)
Gornja ogrjevna vrijednost na apsolutno suhoj tvari (a.s.t.) izračunata je prema jednadžbi 11 (Marrot i sur., 2022.):

$$GOV_{(ast)} = GOV_{(vla)} * \frac{100}{100 - w} \quad (11)$$

gdje je:

$GOV_{(ast)}$ - gornja ogrjevna vrijednost uzorka na a.s.t. (MJ kg⁻¹)

$GOV_{(vla)}$ - gornja ogrjevna vrijednost uzorka (MJ kg⁻¹)

w - udio vlage analiziranog uzorka (%)

3.4.2. Određivanje donje ogrjevne vrijednosti biomase

Donja ogrjevna vrijednost izračunata je prema jednadžbi 12:

$$DOV \text{ (MJ kg}^{-1}\text{)} = GOV - [2,4418 * (8,936 * H)]/100 \quad (12)$$

gdje je:

DOV - donja ogrjevna vrijednost (MJ kg⁻¹)

GOV - gornja ogrjevna vrijednost (MJ kg⁻¹)

2,4418 - latentna toplota isparavanja vode (MJ kg⁻¹)

8,936 - količina H₂O nastala izgaranjem H (1 kg H $\approx$ 9 kg H₂O)

H - maseni udio vodika u gorivu (%)

Donja ogrjevna vrijednost na a.s.t. izračunata je prema jednadžbi 13 (Marrot i sur., 2022.):

$$DOV_{ast} (MJ kg^{-1}) = GOV_{ast} - 0.212 * H_{ast} - 0.0008 * (O_{ast} + N_{ast}) \quad (13)$$

gdje je:

DOV_{ast}- donja ogrjevna vrijednost uzorka na a.s.t. (MJ kg⁻¹)

GOV_{ast} - gornja ogrjevna vrijednost uzorka (MJ kg⁻¹)

H_{ast} - udio vodika u uzorku na a.s.t. (%)

O_{ast} - udio kisika u uzorku na a.s.t. (%)

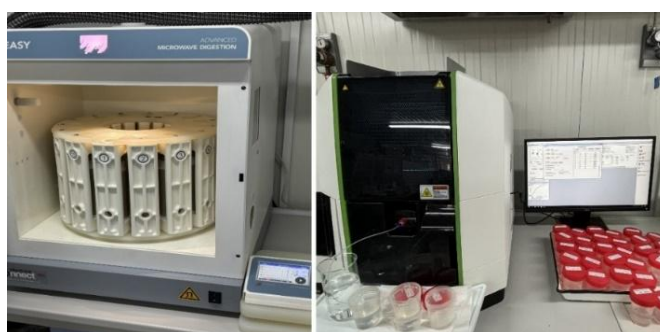
N_{ast} - udio dušika u uzorku na a.s.t. (%)

3.5. Određivanje mineralnog sastava biomase

Kako bi se odredio mineralni, odnosno anorganski sastav biomase, u istraživanju su analizirani udjeli mikroelemenata i makroelemenata.

3.5.1. Određivanje sadržaja mikroelemenata u biomasi

Analiza sadržaja mikroelemenata kadmija (Cd), kobalta (Co), kroma (Cr), bakra (Cu), mangana (Mn), nikla (Ni), olova (Pb) i cinka (Zn) provedena je prema normi HRN EN ISO 16968:2015. Za analizu je korišten atomski apsorpcijski spektrometar PerkinElmer PinAAcle 500 (PerkinElmer Singapore Pte Ltd, Singapur), uz prethodnu pripremu uzoraka u mikrovalnom sustavu za zatvorenu digestiju ETHOS EASY (Milestone Srl, Sorisole, Italija) (slika 37).



Slika 37. Analiza mikro i makro elemenata (Izvor: vlastita arhiva)

3.5.2. Određivanje sadržaja makroelemenata u biomasi

Analiza sadržaja makroelemenata Ca, Fe, K, Mg i Na provedena je prema normi HRN EN ISO 16967:2015. Za analizu je korišten isti postupak kao i za mikroelemente.

3.6. Određivanje kemijskog sastava biomase

Određivanje kemijskog sastava biomase obuhvatilo je analizu glavnih lignoceluloznih komponenti: celuloze, lignina i hemiceluloze, uz prethodnu ekstrakciju ET.

3.6.1. Određivanje udjela ekstraktivnih tvari u biomasi

Analiza udjela ET provedena je prema načelu norme TAPPI T204 cm-97 ekstrakcijom uzorka smjesom etanola (C_2H_5OH) i toluena (C_7H_8) u volumnom omjeru 1:2, koristeći Soxhletov ekstraktor R108S BEHROTEST (Behr Labor-Technik GmbH, Düsseldorf, Njemačka) (slika 38).



Slika 38. Analiza ekstraktivnih tvari pomoću Soxhlet ekstraktora (Izvor: vlastita arhiva)

Udio ekstraktivnih tvari izračunat je prema jednadžbi 14:

$$ET (\%) = \frac{b - a}{c} * 100 \quad (14)$$

gdje je:

ET - udio ekstraktivnih tvari (%)

a - masa prazne tikvice (g)

b - masa tikvice s posušenim ekstraktivnim tvarima (g)

c - masa apsolutno suhog uzorka (g)

3.6.2. Određivanje udjela celuloze u biomasi

Analiza udjela celuloze provedena je prema Kürschner-Hofferovoj metodi, pri čemu je 1 g uzorka ekstrahirano u 25 mL smjese dušične kiseline (HNO_3) i etanola (C_2H_5OH) u volumnom omjeru 1:4. Ekstrakcija je provedena u okrugloj tikvici na vodenoj kupelji Hydro H9V Lauda (Lauda GmbH, Lauda-Königshofen, Njemačka) (slika 39). Otapalo je svakih sat vremena dekantirano kroz filter papir, nakon čega je dodano novih 25 mL otapala. Postupak je ponavljan

do potpunog izbjeljenja uzorka. Nakon završetka ekstrakcije uzorak celuloze sušen je pri temperaturi od $105 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do postizanja konstantne mase.



Slika 39. Određivanje udjela celuloze na vodenoj kupelji (Izvor: vlastita arhiva)

Udio celuloze izračunat je prema jednadžbi 15:

$$C (\%) = \frac{b - a}{c} * 100 \quad (15)$$

gdje je:

C - udio celuloze (%)

a - masa filter papira (g)

b - masa filter papira s celulozom (g)

c - masa apsolutno suhog uzorka (g)

3.6.3. Određivanje udjela lignina u biomasi

Analiza udjela lignina provedena je prema normi TAPPI T222 om-02. Uzorak je prethodno tretiran s 15 mL 72%-tne H_2SO_4 tijekom 2,5 sata, nakon čega je dodano 560 mL destilirane vode te je provedena ekstrakcija na zagrijanoj magnetskoj miješalici IKA C-MAG HS 7 (IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Njemačka) tijekom 4 sata. (slika 40).



Slika 40. Analiza udjela lignina pomoću magnetne mješalice s grijačem (Izvor: vlastita arhiva)

Udio lignina izračunat je prema jednadžbi 16:

$$L (\%) = \frac{b - a}{c} * 100 \quad (16)$$

gdje je:

L - udio lignina (%)

a - masa filter papira (g)

b - masa filter papira s ligninom (g)

c - masa apsolutno suhog uzorka (g)

3.6.4. Određivanje udjela hemiceluloze u biomasi

Udio hemiceluloze određen je računski na temelju prethodno izračunatih udjela celuloze, lignina, ET-a i pepela. Udio hemiceluloze izračunat je prema jednadžbi 17:

$$\text{Hemiceluloza (\%)} = 100 - (\% P + \% ET + \% \text{ celuloze} + \% \text{ lignina}) \quad (17)$$

3.7. Analiza svojstva mješavina biomasa

Za mješavine biomase hrasta i poljoprivrednih kultura provedene su iste analize svih svojstava kao i za pojedinačne biomase. Kako bi se procijenio utjecaj miješanja biomase hrasta i poljoprivrednih kultura (kukuruz, soja, pšenica i suncokret) na energetska svojstva, analizirane vrijednosti mješavina uspoređene su s teorijskim vrijednostima dobivenima izračunom ponderiranog prosjeka pojedinačnih biomasa.

3.7.1. Izračun teorijskih vrijednosti i apsolutnog odstupanja

Ponderirani prosjek predstavlja očekivanu vrijednost promatranog svojstva mješavine, pri čemu udio svake biomase određuje njezin doprinos ukupnoj vrijednosti. Usporedbom teorijskih i analiziranih vrijednosti moguće je utvrditi aditivni (ADU), sinergijski (SIU) ili antagonistički (ANU) učinak između komponenti mješavine (Borges i sur., 2025.; Ajorloo i sur., 2025.).

Teorijska vrijednost promatranog svojstva mješavine izračunata je prema jednadžbi 18:

$$Y_T = (w_1 * v_1) + (w_2 * v_2) \quad (18)$$

gdje:

Y_T - teorijska vrijednost promatranog svojstva mješavine

w - udio pojedine biomase u mješavini (%)

v - analizirana vrijednost promatranog svojstva pojedinačne biomase

Za svaku mješavinu provedena je usporedba teorijske i analizirane vrijednosti promatranog svojstva izračunom apsolutne razlike (ΔY) prema jednadžbi 19 (Gu i sur., 2020.):

$$\Delta Y = Y_T - Y_I \quad (19)$$

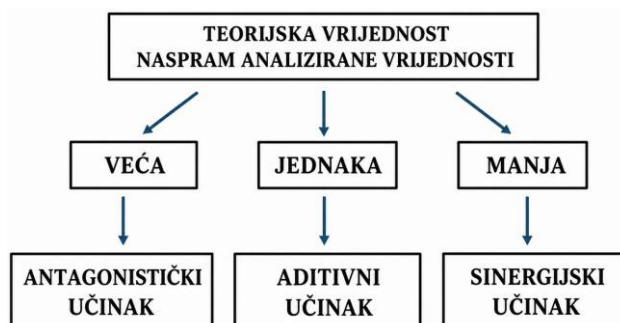
gdje:

ΔY - apsolutna razlika promatranog svojstva mješavine,

Y_T - teorijska vrijednost promatranog svojstva mješavine

Y_I - analizirana vrijednost promatranog svojstva mješavine

Vrijednost ΔY može biti pozitivna, negativna ili jednaka nuli, što upućuje na SIU, ANU ili ADU između komponenti mješavine (slika 41).



Slika 41. Shematski prikaz odnosa teorijske i analizirane vrijednosti (Izvor: Braga i sur., 2020.)

Sinergijski učinak označava da kombinacija biomasa pokazuje povoljnija svojstva od očekivanih, ANU upućuje na slabija svojstva mješavine, dok ADU predstavlja ponašanje u skladu s teorijski očekivanim vrijednostima (Zhao i sur., 2024.; Zhao i sur., 2025.; Mukamparirwa i sur., 2024.). Ovakav pristup omogućuje procjenu međudjelovanja biomasa i njihove prikladnosti za energetska primjenu, posebno u pogledu promjena gorivih svojstava i ponašanja tijekom izgaranja (Abifarini i sur., 2025.).

3.7.2. Relativna postotna pogreška i interpretacija odstupanja

Nakon izračuna ΔY određena je i relativna postotna pogreška (%E), koja prikazuje veličinu odstupanja u postocima između teorijske i analizirane vrijednosti promatranog svojstva mješavine. Relativna %E izračunata je prema jednadžbi 20 (CLRN, 2025.):

$$\%E (\%) = \frac{Y_T - Y_I}{Y_T} * 100 \quad (20)$$

gdje:

%E - relativna postotna pogreška (%)

Y_T - teorijska vrijednost promatranog svojstva mješavine

Y_I - analizirana vrijednost promatranog svojstva mješavine

U dostupnoj literaturi ne postoji jedinstvena granica prihvatljivih vrijednosti relativne postotne pogreške (%E) pri ponderiranom proračunu svojstava mješavina biomase, jer ona ovisi o cilju istraživanja i eksperimentalnim uvjetima. Općenito, manja odstupanja (< 5-10 %) smatraju se zanemarivima i najčešće nemaju značajan utjecaj na interpretaciju rezultata (LPC, 2025.), dok veća odstupanja mogu upućivati na izraženije interakcije između sastavnica biomase. Slijedom navedenog, za potrebe vrednovanja odstupanja između teorijskih i analiziranih vrijednosti, u ovom istraživanju predložena je klasifikacija relativne postotne pogreške (%E) prema veličini odstupanja, prikazana u tablici 17.

Tablica 17. Klasifikacija %E prema veličini odstupanja

Kategorija	%E	Tumačenje
Aditivni učinak (ADU)	$\leq 5\%$	Odstupanja su zanemariva, a analizirane vrijednosti odgovaraju teorijskim
Malo odstupanje (MO)	$5\% < \%E \leq 10\%$	Male razlike uz moguće slabije interakcije, ali i dalje blizu ADU
Značajno odstupanje (ZO)	$10\% < \%E \leq 30\%$	Veće razlike koje mogu upućivati na SIU ili ANU
Veliko odstupanje (VO)	$> 30\%$	Izražena odstupanja koja ukazuju na značajne interakcije između sastavnica

Predložena klasifikacija korištena je za vrednovanje odstupanja između teorijskih i analiziranih vrijednosti svih promatranih svojstava mješavina biomase te za lakšu interpretaciju mogućih sinergijskih i antagonističkih učinaka.

Ponderirani proračun predstavlja linearnu referencu za predviđanje svojstava mješavina biomase, pri čemu se pretpostavlja da svaka komponenta zadržava svoja individualna svojstva i da je konačno svojstvo linearni zbroj pojedinačnih udjela. Takav pristup podrazumijeva

proporcionalni doprinos svake komponente bez značajnih međusobnih interakcija (Van Loo i Koppejan, 2008.). Primjenjivost linearnog modela ovisi o prirodi analiziranog svojstva. Kod svojstava poput elementarnog i kemijskog sastava, odstupanja između teorijskih i analiziranih vrijednosti uglavnom su mala jer se udjeli pojedinih komponenata tijekom miješanja bitno ne mijenjaju (Demirbaş, 2004.; Vassilev i sur., 2010.). Nasuprot tome, tijekom izgaranja mogu se pojaviti sinergijske i antagonističke interakcije koje uzrokuju odstupanja kod ogrjevnosti, sastava dimnih plinova i mineralnog sastava (Jenkins i sur., 1998.; Wang i sur., 2017.). Odstupanja su moguća i kod mehaničkih svojstava peleta, pri čemu morfologija čestica i međusobno vezivanje vlakana utječu na gustoću i čvrstoću peleta (Tumuluru i sur., 2011.). Zbog složenih interakcija između komponenti biomase, za pouzdanu procjenu svojstava mješavina potrebno je istodobno razmatrati fizikalno-kemijska, elementarna, kemijska i mehanička svojstva biomase i proizvedenih peleta (McKendry, 2002.; Bridgwater, 2011.).

3.8. Usitnjavanje biomase na granulaciju pogodnu za prešanje

Nakon usitnjavanja biomase hrasta i poljoprivrednih kultura na mlinu sjekaču SM400 preko sita s otvorima veličine 10 mm, manji dio uzoraka usitnjen je na mlinu SR300 za potrebe laboratorijskih analiza, dok je preostali dio korišten za proizvodnju peleta. Budući da je za pravilan protok materijala tijekom prešanja najprikladnija veličina čestica između 3 i 6 mm, biomasa namijenjena prešanju usitnjena je na mlinu čekićaru PM-5000 (Sinitech Industries, Sisak, Hrvatska) preko sita s okruglim otvorima veličine 8 mm (slika 42).



Slika 42. Usitnjavanje biomase za prešanje pomoću mlina čekićara (Izvor: vlastita arhiva)

Nakon usitnjavanja, uzorci su pohranjeni u PVC vreće i PVC posude s poklopcima kako bi se spriječilo vlaženje i kontaminacija. Svi uzorci označeni su etiketama s pripadajućim podacima.

3.9. Priprema i kondicioniranje za prešanje

Biomasa namijenjena prešanju prethodno je usitnjena i homogenizirana radi postizanja ravnomjerne raspodjele čestica. Tako pripremljena biomasa hrasta i pojedinačnih poljoprivrednih biomasa pohranjena je u PVC posude s poklopcem. Radi postizanja udjela vlage pogodnog za prešanje, biomasa je kondicionirana u klima komori Memmert HCP240 (Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Njemačka) pri temperaturi od 25 °C i relativnoj vlažnosti zraka od 50% (slika 43), sve do postizanja ciljanog raspona vlage od 12 do 15%.



Slika 43. Kondicioniranje biomase za prešanje u klima komori (Izvor: vlastita arhiva)

Uzorci su kondicionirani do postizanja ciljanog udjela vlage između 12 i 15%, koji je praćen gravimetrijskom metodom u sušioniku i analizatorom vlage KERN. Od kondicioniranih biomasa pripremljeno je ukupno 17 uzoraka za prešanje peleta. Jedan uzorak sadržavao je 100% biomase hrasta, četiri uzorka sadržavala su po 100% biomase pojedine poljoprivredne kulture, dok je preostalih 12 uzoraka pripremljeno kao mješavina biomase hrasta i biomase poljoprivrednih kultura u masenim omjerima 75:25, 50:50 i 25:75. Masa svakog uzorka iznosila je 10 kg, a omjeri mješavina određeni su prema masenom udjelu pojedine biomase u smjesi.

3.10. Postupak prešanja peleta iz pojedinačnih i mješavina biomasa

Postupak prešanja peleta proveden je korištenjem preše KAHL 14-175 (Amandus Kahl GmbH & Co. KG, Reinbek, Njemačka) pogonjene trofaznim elektromotorom nazivne snage 3 kW (slika 44).



Slika 44. Preša KAHL 14-175 (Izvor: vlastita arhiva)

Preša je bila opremljena s dva valjka promjera 130 mm i širine 29 mm (slika 45/a), čija se obodna brzina kretala između 0,5 i 0,8 m/s, te matricom promjera 175 mm i širine 18 mm s kanalima promjera 6 mm (slika 45/b). Tijekom rada uređaj je radio s najviše 85% instalirane snage (oko 2,55 kW) kako bi se spriječilo preopterećenje sustava. Sirovina je dozirana pužnim transporterom (slika 45/c), pri čemu je brzina doziranja prilagođavana uvjetima prešanja radi sprječavanja nakupljanja materijala na matrici i zagušenja valjaka. Tijekom prolaska kroz kanale matrice razvijalo se trenje između sirovine, valjaka i matrice, pri čemu je temperatura prešanja iznosila između 90 i 100 °C (slika 45/d). Povišena temperatura omogućila je aktivaciju lignina koji je djelovao kao prirodno vezivo. Razmak između valjaka i matrice iznosio je od 0,2 do 0,5 mm. Nakon izlaska iz matrice peleti su rezani na željenu duljinu noževima smještenim ispod matrice (slika 45/e) te skupljani u PVC posudu na izlazu iz preše (slika 45/f).



Slika 45. Konstrukcijski dijelovi preše i postupak prešanja (Izvor: vlastita arhiva)

Po završetku prešanja, peleti su podvrgnuti hlađenju radi stabilizacije strukture i postizanja odgovarajuće MI, budući da su nakon izlaska iz preše, zbog povišene temperature, bili podložni

deformacijama. Hlađeni su do sobne temperature tako da su najprije raspoređeni na sita izložena temperaturi radnog prostora, a zatim dodatno ohlađeni pomoću hladnjaka. Nakon hlađenja provedeno je prosijavanje na situ s otvorima od 3,15 mm radi uklanjanja sitnih čestica. Svaka skupina peleta potom je vakuumirana u zasebnu vrećicu s pripadajućom oznakom uzorka. Vakuumirani peleti pohranjeni su pri temperaturi od 4 °C radi smanjenja apsorpcije vlage, oksidacije i gubitka hlapljivih spojeva te očuvanja svojstava uzoraka tijekom skladištenja (Canbaş i sur., 2001.).

3.11. Analiza svojstava peleta proizvedenih iz pojedinačnih biomasa i njihovih mješavina

Postupkom prešanja proizvedeno je ukupno 17 skupina peleta iz pojedinačnih biomasa i njihovih mješavina. Pet skupina proizvedeno je od pojedinačnih biomasa hrasta, soje, kukuruza, pšenice i suncokreta, dok je preostalih 12 skupina proizvedeno od mješavina hrastove biomase i pojedinih poljoprivrednih biomasa u masenim omjerima 75:25, 50:50 i 25:75. Za sve proizvedene pelete provedene su analize svojstava radi procjene njihove prikladnosti za korištenje kao biogoriva. Norme i metode korištene za određivanje fizikalno-kemijskih svojstava, elementarnog, kemijskog i mineralnog sastava te ogrjevnice vrijednosti bile su jednake onima primijenjenima pri analizi biomase te se stoga ponovno ne navode. U nastavku su opisane samo metode i norme specifične za analizu peleta kao oblika biogoriva.

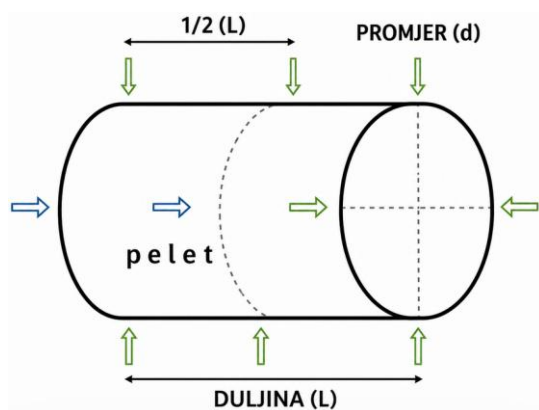
3.11.1. Određivanje pojedinačne gustoće peleta

Analiza PG provedena je prema normi HRN EN ISO 18847:2024 kao omjer mase i volumena pravilno oblikovanih cilindričnih peleta, čiji su krajevi prethodno izbrušeni radi postizanja pravilnog oblika. Analizirano je 30 nasumično odabranih peleta, pri čemu je masa određena analitičkom vagom točnosti 0,1 mg (slika 46).



Slika 46. Analiza pojedinačne gustoće peleta (Izvor: vlastita arhiva)

Volumen je određen mjerenjem duljine u tri ponavljanja te vanjskog promjera u šest ponavljanja (dva mjerenja na svakom kraju i dva na sredini) (slika 46 i slika 47) pomoću elektroničkog mikrometra INSIZE S3100 (INSIZE CO. LTD, Suzhou, Kina), sukladno normama HRN EN ISO 17829:2025 i HRN EN ISO 18847:2024.



Slika 47. Shematski prikaz mjerenja duljine i promjera peleta (Izvor: HRN EN ISO 18847:2024)

Volumen peleta izračunat je prema jednadžbi 21:

$$V_p (cm^3) = \frac{d^2 * \pi * L}{4} \quad (21)$$

gdje je:

V_p - volumen peleta (cm^3)

d - promjer peleta (cm)

π - 3,14

L - duljina peleta (cm)

Gustoća peleta izračunata je prema jednadžbi 22 (Zafari i Kianmehr, 2012.):

$$\rho_p (kg/m^3) = \frac{m_p}{V_p} * 10^3 \quad (22)$$

gdje je:

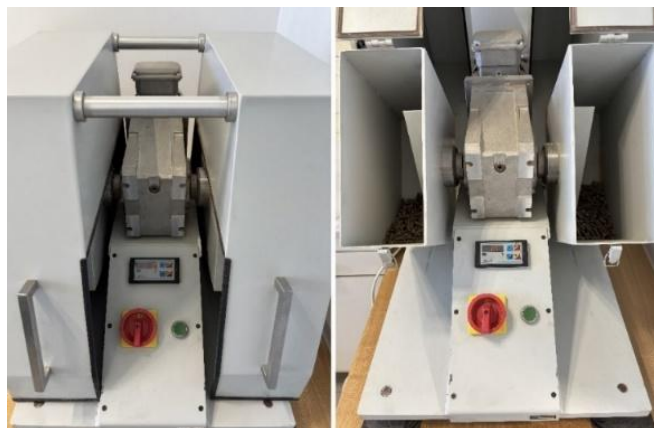
ρ_p - gustoća peleta (kg/m^3)

m_p - masa peleta (g)

V_p - volumen peleta (cm^3)

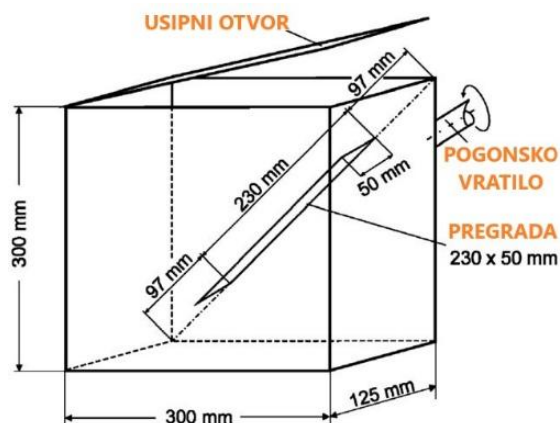
3.11.2. Određivanje mehaničke izdržljivosti peleta

Analiza MI peleta provedena je prema normi HRN EN ISO 17831-1:2025 pomoću uređaja za ispitivanje mehaničke izdržljivosti peleta HSTec (CHIRON Croatia, Zadar, Hrvatska) (slika 48).



Slika 48. Analiza mehaničke izdržljivosti peleta (Izvor: vlastita arhiva)

Uzorak mase 500 ± 10 g prosijanih peleta stavljen je u dvije komore uređaja, koje su zatim rotirane 500 puta pri brzini od 50 okretaja min^{-1} . Tijekom rotacije peleti su dolazili u kontakt sa stijenkama komora i pregradom širine 50 mm (slika 49). Nakon ispitivanja peleti su izvađeni iz komora i ručno prosijani kroz sito s okruglim otvorima promjera 3,15 mm (HRN ISO 3310-1:2016) te su izvagani na preciznoj vagi RADWAG.



Slika 49. Shematski prikaz komore uređaja za ispitivanje MI peleta (Izvor: Temmerman i sur., 2006.)

Postotak MI peleta izračunat je prema jednadžbi 23:

$$D_u (\%) = \frac{m_a}{m_e} * 100 \quad (23)$$

gdje je:

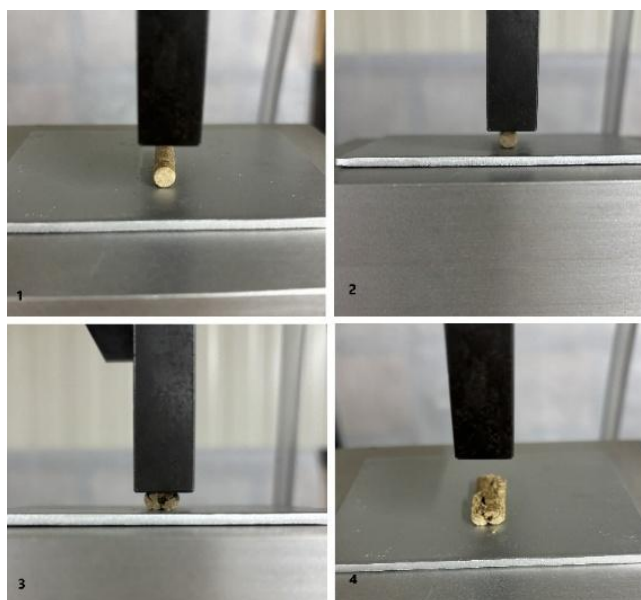
D_u - mehanička izdržljivost (%)

m_a - masa peleta prije rotacije (g)

m_e - masa peleta nakon rotacije (g)

3.11.3. Određivanje tlačne čvrstoće peleta u radijalnom smjeru

Analiza TČ peleta u radijalnom smjeru provedena je pomoću univerzalnog uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava UPM 20T (SCHENCK RoTec GmbH, Darmstadt, Njemačka). Prije početka ispitivanja na uređaju je podešena brzina tlačenja od 10 mm/min uz maksimalno opterećenje od 10 kN. Tijekom ispitivanja pelet je postavljen između dvije metalne ploče, od kojih je jedna bila pomična, a sila je postupno povećavana do loma peleta (slika 50). Početna sila zabilježena na početku ispitivanja oduzeta je od sile izmjerene u trenutku loma kako bi se odredila stvarna TČ peleta.



Slika 50. Ispitivanje TČ peleta u radijalnom smjeru (Izvor: vlastita arhiva)

Tlačna čvrstoća peleta u radijalnom smjeru izračunata je prema jednadžbi 24 (Ben i sur., 2023.):

$$\sigma_r \text{ (MPa)} = \frac{2 * F_{\max}}{\pi * d * L} \quad (24)$$

gdje je:

σ_r - radijalna tlačna čvrstoća (MPa)

$F_{\max}$ - sila loma peleta (N)

d - promjer peleta (mm)

L - duljina peleta (mm)

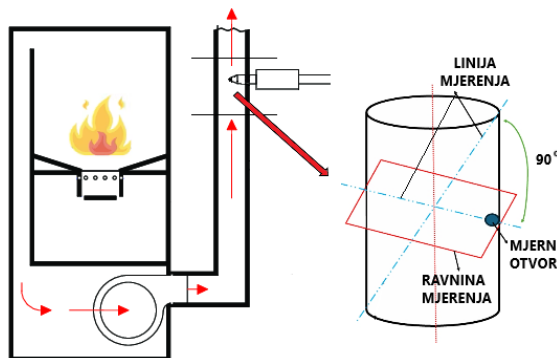
3.11.4. Analiza koncentracija dimnih plinova nastalih izgaranjem peleta

Mjerenje koncentracija dimnih plinova O_2 , CO , CO_2 , NO_x , NO , NO_2 , SO_2 i H_2S provedeno je analizatorom Testo 350 (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Njemačka), koji se sastoji od kontrolne jedinice, analizatora i sonde za uzorkovanje dimnih plinova (slika 51).



Slika 51. Analizator dimnih plinova TESTO 350 (Izvor: vlastita arhiva)

Prije početka ispitivanja na kontrolnoj jedinici definirani su osnovni parametri mjerenja, uključujući trajanje mjerenja (30 min), interval očitavanja (15 s) i vrijeme ispiranja senzora (5 min). Također su uneseni podaci o uređaju za izgaranje, gorivu i uvjetima mjerenja koji mogu utjecati na rezultate analize. Izgaranje peleta provedeno je u kotlu na pelete PEL-TEC E-24 (Centrometal, Macinec, Hrvatska), nazivne toplinske snage 24 kW, koji se prema Uredbi o GVE svrstava u male uređaje za loženje (MUL). Ispitivanje je provedeno u kontroliranim uvjetima pri temperaturi radnog prostora od 20 °C. Za potrebe mjerenja korištena je funkcija kotla „Dimnjačar“, pri čemu je temperatura kotla bila postavljena na 60 °C, a opterećenje na 85% nazivne snage (D5). Mjerenje koncentracija dimnih plinova provedeno je na vertikalnom dijelu dimovodnog kanala promjera 130 mm, na visini od 1,5 m iznad ložišta. Mjesto uzorkovanja određeno je prema ravnini poprečnog presjeka dimovodnog kanala (slika 52).



Slika 52. Shematski prikaz mjesta uzorkovanja dimnih plinova (Izvor: Polonini i sur., 2019.)

Mjerenje emisija svake skupine peleta trajalo je 30 minuta, s intervalom očitavanja od 15 s (slika 53), i provedeno je u tri ponavljanja. Po završetku mjerenja uređaj je automatski pohranio srednje vrijednosti rezultata, uz mogućnost prikaza minimalnih i maksimalnih vrijednosti te pojedinačnih očitavanja. Sva mjerenja provedena su prema prethodno navedenim normama i uvjetima ispitivanja radi osiguranja pouzdanosti i usporedivosti rezultata.



Slika 53. Prikaz mjerenja koncentracija plinova (Izvor: vlastita arhiva)

3.11.5. Preračunavanje i korekcija rezultata analize dimnih plinova

Uređaji za analizu dimnih plinova najčešće prikazuju rezultate mjerenja u ppm (CO, NO_x i SO₂), dok se volumni udjeli O₂ i CO₂ iskazuju u postocima. Radi usporedbe rezultata s propisanim GVE, izmjerene koncentracije potrebno je preračunati u masenu koncentraciju izraženu u mg/m³. Pretvorba koncentracije iz ppm u mg/m³ izračunava se pomoću jednadžbe 25 (Sun i sur., 2023.):

$$c \text{ (mg/m}^3\text{)} = \text{ppm} * \frac{M_p}{V_{\text{mol}}} * \frac{273,15}{(273,15 + T)} * \frac{P}{101,325} \quad (25)$$

gdje je:

c - masena koncentracija plina (mg/m³)

ppm - volumni udio izmjeren analizatorom

M_p - molekularna masa plina (g/mol)

V_{mol} - molarni volumen idealnog plina pri standardnim uvjetima (22,41 L/mol)

T - temperatura na mjestu mjerenja (°C)

P - atmosferski tlak na mjestu mjerenja (kPa)

Molekularne mase plinova korištene pri preračunu navedene su u tablici 18.

Tablica 18. Molekularne mase analiziranih plinova (g/mol)

Plin	Molekularna masa
Kisik (O ₂)	32,00
Ugljikov monoksid (CO)	28,01
Ugljikov dioksid (CO ₂)	44,01
Sumporovodik (H ₂ S)	34,08
Dušikov monoksid (NO)	30,01
Dušikov dioksid (NO ₂)	46,01
Sumporov dioksid (SO ₂)	64,06

Izvor: Chemed (2025.)

3.11.6. Korekcija na referentni volumni udio kisika

Nakon pretvorbe rezultata u masenu koncentraciju, izmjerene vrijednosti potrebno je korigirati na referentni volumni udio O₂. Prema Uredbi o GVE, referentni volumni udio O₂ za drvo i biomasu iznosi 11% (NN 42/2021.), dok prema Uredbi Komisije (EU) 2015/1189 iznosi 10% (EUR-Lex 1189, 2015.). Korekcija se provodi pomoću jednadžbe 26:

$$C_z = C_m * \frac{21 - V_r}{21 - V_m} \quad (26)$$

gdje je:

C_z - masena koncentracija plina korigirana na referentni volumni udio O₂ (mg/m³)

C_m - izmjerena masena koncentracija plina pri izmjenom volumnom udjelu O₂ (mg/m³)

V_m - izmjereni volumni udio O₂ u % volumena suhog otpadnog plina

V_r - referentni volumni udio O₂ (%) za određeni nepokretni izvor

3.12. Statistička obrada podataka istraživanja

Nakon provedenih laboratorijskih analiza, statistička obrada podataka dobivenih u fazama 2 do 4 provedena je primjenom programskog paketa TIBCO Statistica (v. 13.3.0, TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, SAD; 2017). Za analizirana svojstva biomase, proizvedenih peleta i dimnih plinova primijenjena je analiza varijance (ANOVA) radi utvrđivanja statistički značajnog utjecaja vrste biomase i udjela poljoprivredne biomase u mješavinama na promatrane varijable. Razlike između srednjih vrijednosti uzoraka određene su Tukeyevim post-hoc HSD testom, pri razini značajnosti $p \leq 0,05$. Međusobna povezanost promatranih varijabli određena je korelacijskom analizom.

4. REZULTATI

4.1. Analiza svojstava biomase

U ovom istraživanju analizirani su uzorci drvene biomase hrasta te poljoprivredne biomase soje, kukuruza, suncokreta i pšenice. Ovaj dio rada prikazuje rezultate analize fizikalno-kemijskih svojstava, elementarnog, kemijskog i mineralnog sastava, ogrjevnosti te granulometrijskog sastava biomase nakon usitnjavanja.

4.1.1. Granulometrijski sastav biomase

Analiza granulometrijskog sastava biomasa provedena je radi određivanja raspodjele veličina čestica unutar uzorka, što je važno za daljnju obradu biomase i provedbu kemijskih i energetskih analiza. U tablici 19 prikazan je postotni udio čestica dobiven prosijavanjem.

Tablica 19. Granulometrijski sastav analiziranih biomasa nakon usitnjavanja (%)

Biomasa	Vrsta	2,00	1,25	1,00	0,71	0,50	0,125	< 0,125
	HRA	0,00	0,40	39,61	35,91	12,04	10,23	1,81
	KUK	0,00	0,30	31,29	30,49	23,07	8,83	6,02
	SOJ	0,00	0,10	37,25	22,29	21,59	13,05	5,72
	PŠE	0,00	0,10	42,41	19,20	23,12	12,15	3,02
	SUN	0,00	0,29	35,98	29,61	18,92	10,68	4,52
	Prosječna vrijednost	0,00	0,24	37,31	27,50	19,75	10,99	4,22
	Minimalno	0,00	0,10	31,29	19,20	12,04	8,83	1,81
	Maksimalno	0,00	0,40	42,41	35,91	23,12	13,05	6,02

Veličina čestica ima važnu ulogu u analizi biomase, pri čemu se za kemijske analize najčešće koriste frakcije između 0,50 i 1,00 mm. Rezultati pokazuju da su u svim uzorcima najzastupljenije frakcije 0,50, 0,71 i 1,00 mm, što potvrđuje njihovu prikladnost za pripremu reprezentativnih uzoraka biomase. Kod frakcije 1,00 mm najveći udio zabilježen je kod PŠE (42,41%), a najmanji kod KUK (31,29%). U frakciji 0,71 mm najveći udio imao je HRA (35,91%), a najmanji PŠE (19,20%), dok je u frakciji 0,50 mm najveći udio zabilježen kod PŠE (23,12%), a najmanji kod HRA (12,04%). Prosječni udjeli navedenih frakcija iznosili su 19,75% za 0,50 mm, 27,50% za 0,71 mm i 37,31% za 1,00 mm. Budući da su te frakcije bile najzastupljenije u svim uzorcima, odabrane su za daljnje kemijske analize jer omogućuju pripremu homogenijih i reprezentativnijih uzoraka biomase. Frakcije manje od 0,50 mm i veće od 1,00 mm bile su zastupljene u manjim udjelima, što potvrđuje opravdanost primjene frakcija u rasponu od 0,50 do 1,00 mm za kemijske analize biomase.

4.1.2. Fizikalno-kemijska i mehanička svojstva biomase

Analiza fizikalno-kemijskih i mehaničkih svojstava drvene i poljoprivredne biomase obuhvatila je određivanje udjela vlage, pepela, koksa, C_{fix} , HT i vrijednosti NG. Rezultati analiza tih svojstava prikazani su u tablici 20.

Tablica 20. Udio vlage, pepela, C_{fix} , HT (%) i NG (kg/m^3) u analiziranim biomasama

Biomasa	Vrsta	Vlaga	Pepeo	C_{fix}	Koks	HT	NG
	HRA	8,09 $\pm 0,04^c$	0,10 $\pm 0,01^a$	16,93 $\pm 0,52^f$	18,53 $\pm 0,56^c$	74,88 $\pm 0,52^c$	346,77 $\pm 4,14^d$
	KUK	7,71 $\pm 0,06^b$	3,21 $\pm 0,19^b$	7,33 $\pm 0,42^{bc}$	11,42 $\pm 0,45^a$	81,75 $\pm 0,42^f$	120,85 $\pm 1,46^a$
	SOJ	7,05 $\pm 0,01^a$	3,73 $\pm 0,10^d$	6,35 $\pm 0,37^{ab}$	10,84 $\pm 0,40^a$	82,87 $\pm 0,37^g$	209,81 $\pm 1,13^c$
	PŠE	7,13 $\pm 0,01^a$	7,43 $\pm 0,05^f$	9,98 $\pm 0,19^d$	18,75 $\pm 0,2^c$	75,46 $\pm 0,19^c$	130,64 $\pm 1,12^b$
	SUN	11,96 $\pm 0,11^g$	12,55 $\pm 0,09^h$	6,16 $\pm 0,16^a$	21,25 $\pm 0,19^d$	69,32 $\pm 0,16^a$	128,40 $\pm 3,12^{ab}$
Prosječna vrijednost		8,39	5,40	9,35	16,16	76,86	187,29
Minimalno		7,05	0,10	6,16	10,84	69,32	120,85
Maksimalno		11,96	12,55	16,93	21,25	82,87	346,77
Statistička značajnost		*	*	*	*	*	*

C_{fix} - fiksirani ugljik, HT - hlapljive tvari, NG - nasipna gustoća; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza fizikalno-kemijskih i mehaničkih svojstava pokazala je statistički značajne razlike između analiziranih vrsta biomase. Biomasa HRA imala je najveću NG (346,77 kg/m^3) i udio C_{fix} (16,93%) te najmanji udio pepela (0,10%), dok je KUK imao najmanju NG (120,85 kg/m^3). SUN je imao najveći udio vlage (11,96%), pepela (12,55%) i koksa (21,25%) te najmanji udio C_{fix} (6,16%) i HT (69,32%), dok je SOJ imao najveći udio HT (82,87%) te najmanji udio vlage (7,05%) i koksa (10,84%).

4.1.3. Elementarni sastav biomase

Uz fizikalno-kemijska svojstva, važan pokazatelj kvalitete biomase kao sirovine predstavlja i njezin elementarni sastav. Udio C, H, N, O i S izravno utječe na energetska svojstva biomase i emisije nastale tijekom procesa izgaranja. Rezultati analize elementarnog sastava prikazani su u tablici 21.

Tablica 21. Udio C, H, N, O i S u analiziranim biomasama (%)

Biomasa	Vrsta	C	H	N	O	S
	HRA	46,48±0,01^h	6,22±0,01 ^d	0,09±0,01^a	47,12±0,01^a	0,10±0,01^a
	KUK	43,86±0,01 ^f	6,30±0,01 ^e	0,58±0,01 ^d	49,16±0,02 ^c	0,10±0,03^a
	SOJ	43,19±0,03 ^e	6,38±0,01^f	0,77±0,02^f	49,57±0,01 ^d	0,10±0,01^a
	PŠE	41,57±0,07 ^c	6,12±0,01 ^c	0,45±0,02 ^c	51,75±0,07 ^f	0,11±0,04 ^a
	SUN	39,44±0,03^a	5,97±0,02^b	0,75±0,03 ^f	53,69±0,01^g	0,16±0,01^c
Prosječna vrijednost		42,91	6,20	0,53	50,26	0,11
Minimalno		39,44	5,97	0,09	47,12	0,10
Maksimalno		46,48	6,38	0,77	53,69	0,16
Statistička značajnost		*	*	*	*	*

C - ugljik, H - vodik, N - dušik, O - kisik, S - sumpor; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Elementarni sastav biomase pokazao je statistički značajne razlike među analiziranim uzorcima. HRA je imao najveći udio C (46,48%), dok je najmanji zabilježen kod SUN (39,44%). Najveći udio H imala je SOJ (6,38%), a najmanji SUN (5,97%). Najveći udio N zabilježen je kod SOJ (0,77%), a najmanji kod HRA (0,09%). HRA je također imao najmanji udio O (47,12%), dok je najveći utvrđen kod SUN (53,69%). Kod udjela S izdvajao se SUN s vrijednošću od 0,16%, dok su ostale biomase imale približno 0,10% S.

U tablici 22 prikazani su H/C i O/C omjeri pojedinačnih biomasa. Najmanji H/C omjer imao je HRA (1,59), a najveći SUN (1,80). Prosječna vrijednost H/C omjera za sve analizirane biomase iznosila je 1,72, što upućuje na relativno visok udio vodika u biomasu. Najmanji O/C omjer je također je utvrđen kod HRA (0,76), dok je najveći zabilježen kod SUN (1,02), a prosječna vrijednost O/C omjera iznosila je 0,88. Razlike između minimalnih i maksimalnih vrijednosti H/C i O/C omjera ukazuju na varijabilnost kemijskog sastava analiziranih biomasa.

Tablica 22. H/C i O/C omjeri analiziranih biomasa

Biomasa	Vrsta	H/C	O/C
	HRA	1,59	0,76
	KUK	1,71	0,84
	SOJ	1,76	0,86
	PŠE	1,75	0,93
	SUN	1,80	1,02
Prosječna vrijednost		1,72	0,88
Minimalno		1,59	0,76
Maksimalno		1,80	1,02

H/C - omjer vodika i ugljika, O/C - omjer kisika i ugljika

4.1.4. Kemijski sastav biomase

Kemijski sastav biomase obuhvaća udjele celuloze, lignina, hemiceluloze i ET, pri čemu te komponente različito utječu na termičku stabilnost i ponašanje biomase tijekom izgaranja. Rezultati analize kemijskog sastava biomase prikazani su u tablici 23.

Tablica 23. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u analiziranim biomasama (%)

Biomasa	Vrsta	Celuloza	Lignin	Hemiceluloza	ET
	HRA	49,51±0,34 ^{cd}	23,97±0,37 ^f	17,23±0,03 ^b	8,89±0,04 ^e
	KUK	52,26±0,22 ^f	18,82±0,07 ^{ab}	18,27±0,19 ^d	7,89±0,06 ^d
	SOJ	49,06±0,63 ^c	19,53±0,35 ^{ab}	21,19±0,43 ^f	7,48±0,04 ^{cd}
	PŠE	50,62±0,08 ^d	21,28±0,21 ^d	18,18±0,23 ^c	7,11±0,47 ^b
	SUN	47,74±0,33 ^b	20,54±0,29 ^c	17,97±0,41 ^a	7,28±0,28 ^d
Prosječna vrijednost		49,48	20,83	18,57	7,73
Minimalno		47,74	18,82	17,23	7,11
Maksimalno		52,26	23,97	21,19	8,89
Statistička značajnost		*	*	*	*

ET - ekstraktivne tvari; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Na temelju rezultata analize kemijskog sastava biomase utvrđene su statistički značajne razlike između analiziranih vrsta biomase. Najveći udio celuloze imao je KUK (52,26%), dok je najmanji utvrđen kod SUN (47,74%). Kod lignina najveći udio imao je HRA (23,97%), a najmanji KUK (18,82%). Biomasa SOJ imala je najveći udio hemiceluloze (21,19%), dok je najmanji zabilježen kod HRA (17,23%). U slučaju ET, najveći udio imao je HRA (8,89%), a najmanji PŠE (7,11%).

4.1.5. Mineralni sastav biomase

Mineralni sastav biomase, odnosno sadržaj mikroelemenata i makroelemenata, značajno utječe na njezina energetska svojstva. Visok sadržaj pojedinih elemenata može negativno utjecati na sustave za izgaranje, uzrokujući taloženje, snižavanje tališta pepela, koroziju, habanje i povećane emisije štetnih plinova.

4.1.5.1. Sadržaj makroelemenata u biomasi

U istraživanju je analiziran sadržaj makroelemenata Fe, Ca, K, Na i Mg. Sadržaj Mg nije utvrđen ni u jednom uzorku biomase jer je bio ispod granice detekcije metode. U tablici 24 prikazan je sadržaj ostalih analiziranih makroelemenata.

Tablica 24. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u analiziranim biomasama (mg/kg)

Biomasa	Vrsta	Fe	Ca	K	Na
	HRA	37,13±1,18 ^a	449,95±25,83 ^a	235,77±124,35 ^a	97,26±54,55 ^a
	KUK	382,40±166,46 ^b	1428,21±58,90 ^b	1459,54±757,85 ^a	174,65±79,71 ^a
	SOJ	85,27±0,80 ^a	4835,48±598,82 ^c	3436,72±1,83 ^{ab}	185,99±30,02 ^a
	PŠE	134,55±461,29 ^b	2438,59±3,65 ^b	9778,60±19,87 ^{ab}	192,80±14,05 ^a
	SUN	174,59±7,19 ^a	1864,85±430,48 ^{ab}	31683,65±8,85 ^c	268,98±63,89 ^a
Prosječna vrijednost		162,79	2203,42	9318,86	183,94
Minimalno		37,13	449,95	235,77	97,26
Maksimalno		382,40	4835,48	31 683,65	268,98
Statistička značajnost		*	*	*	n.s.

Fe - željezo, Ca - kalcij, K - kalij, Na - natrij; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza sadržaja makroelemenata pokazala je statistički značajne razlike u sadržaju Fe, Ca i K, dok kod sadržaja Na nisu utvrđene statistički značajne razlike. HRA je imao najmanji sadržaj svih analiziranih elemenata: Fe (37,13 mg/kg), Ca (449,95 mg/kg), K (235,77 mg/kg) i Na (97,26 mg/kg). Najveći sadržaj Fe zabilježen je kod KUK (382,40 mg/kg), najveći sadržaj Ca kod SOJ (4835,48 mg/kg), dok je SUN imao najveći sadržaj K (31 683,65 mg/kg) i Na (268,98 mg/kg).

4.1.5.2. Sadržaj mikroelemenata u biomasi

Od mikroelemenata analiziran je sadržaj Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Cu, Pb i Zn. Sadržaj Cd, Co, Cr, Pb i Zn nije utvrđen ni u jednom uzorku biomase jer je bio ispod granice detekcije metode. U tablici 25 prikazan je sadržaj zabilježenih mikroelemenata.

Tablica 25. Sadržaj Mn, Ni i Cu u analiziranim biomasama (mg/kg)

Biomasa	Vrsta	Mn	Ni	Cu
	HRA	10,66±0,19 ^a	2,84±0,02 ^{ab}	3,67±0,14 ^b
	KUK	45,37±24,68 ^{abc}	4,32±0,15^{bc}	3,60±0,63 ^a
	SOJ	9,43±0,21^{ab}	2,39±1,14 ^a	2,34±0,91^a
	PŠE	52,29±2,60^{bc}	1,51±0,23^a	2,34±0,85^a
	SUN	15,40±1,77 ^{ab}	2,92±0,37 ^{ab}	8,78±0,43^a
Prosječna vrijednost		26,69	2,80	4,15
Minimalno		9,43	1,51	2,34
Maksimalno		52,59	4,32	8,78
Statistička značajnost		*	*	*

Mn - mangan, Ni - nikl, Cu - bakar; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Kod mikroelemenata analiza je pokazala statistički značajne razlike u sadržaju svih analiziranih elemenata. Najmanji sadržaj Mn imala je SOJ (9,43 mg/kg), dok je najveći zabilježen kod PŠE (52,29 mg/kg). Kod Ni najmanji sadržaj imao je PŠE (1,51 mg/kg), a najveći KUK (4,32 mg/kg). Najmanji sadržaj Cu utvrđen je kod SOJ i PŠE (2,34 mg/kg), dok je najveći imao SUN (8,78 mg/kg).

4.1.6. Ogrjevna vrijednost biomase

Ogrjevna vrijednost jedan je od najvažnijih pokazatelja energetske učinkovitosti biomase i biogoriva jer određuje količinu energije koja se može osloboditi tijekom procesa izgaranja. U tablici 26 prikazane su vrijednosti GOV i DOV pojedinačnih vrsta biomase.

Tablica 26. Gornja i donja ogrjevna vrijednost analiziranih biomasa (MJ kg⁻¹)

Biomasa	Vrsta	GOV	DOV
	HRA	19,25±0,05^h	17,78±0,06^h
	KUK	18,52±0,04 ^e	17,03±0,04 ^e
	SOJ	18,60±0,03 ^f	17,11±0,03 ^f
	PŠE	17,81±0,01 ^d	16,37±0,02 ^d
	SUN	17,74±0,01^b	16,25±0,01^b
Prosječna vrijednost		18,38	16,91
Minimalno		17,74	16,25
Maksimalno		19,25	17,78
Statistička značajnost		*	*

GOV - gornja ogrjevna vrijednost, DOV - donja ogrjevna vrijednost; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Rezultati analize ogrjevnosti pokazali su statistički značajne razlike za GOV i DOV. Biomasa SUN imala je najmanje vrijednosti GOV ($17,74 \text{ MJ kg}^{-1}$) i DOV ($16,25 \text{ MJ kg}^{-1}$), dok je HRA imao najveće vrijednosti GOV ($19,25 \text{ MJ kg}^{-1}$) i DOV ($17,78 \text{ MJ kg}^{-1}$), što potvrđuje njegov visok energetska potencijal. SOJ je imao nešto veće vrijednosti GOV i DOV u odnosu na KUK i PŠE.

4.2. Analiza svojstava mješavina biomase

Jedan od glavnih ciljeva ovog istraživanja bio je utvrditi mogućnost proizvodnje peleta od mješavina drvene biomase hrasta i poljoprivrednih ostataka u tri različita masena omjera. U tu svrhu određena su fizikalno-kemijska, elementarna, kemijska i mineralna svojstva te ogrjevnost mješavina biomase radi procjene njihove prikladnosti za proizvodnju peleta i energetska primjenu. Radi jednostavnijeg prikaza rezultata, maseni omjer 75:25 označen je kao HRA+POLJ.KULT.1, omjer 50:50 kao HRA+POLJ.KULT.2, a omjer 25:75 kao HRA+POLJ.KULT.3.

4.2.1. Fizikalno-kemijska i mehanička svojstva mješavina biomase

Analiza fizikalno-kemijskih i mehaničkih svojstava mješavina biomase obuhvatila je određivanje udjela vlage, pepela, koksa, C_{fix} , HT i NG. Udjeli vlage, pepela i C_{fix} prikazani su u tablici 27.

Tablica 27. Udio vlage, pepela i C_{fix} u analiziranim mješavinama biomase (%)

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Vlaga	Pepeo	C_{fix}
	HRA+PŠE	1	7,21±0,01 ^b	1,98±0,02 ^e	15,15±0,01 ^{hi}
		2	6,98±0,03^b	3,86±0,05 ⁱ	14,18±0,47 ^{ghi}
		3	7,10±0,34 ^b	5,79±0,03 ^k	11,48±0,15 ^{hi}
	HRA+KUK	1	7,21±0,02 ^b	0,81±0,01^a	15,32±0,29ⁱ
		2	7,14±0,36 ^b	1,58±0,04 ^{cd}	12,96±0,45 ^{ghi}
		3	7,10±0,28 ^b	2,33±0,09 ^h	10,13±0,46 ^{efghi}
	HRA+SUN	1	9,29±0,08 ^b	2,96±0,04 ^{ef}	13,17±0,32 ^{fghi}
		2	9,98±4,82 ^b	5,94±0,14 ^j	10,85±0,24 ^{ghi}
		3	10,50±0,08^a	8,68±0,11^l	8,35±0,35^{efghi}
	HRA+SOJ	1	7,26±0,06 ^b	0,98±0,02 ^{ab}	14,77±0,01 ^{ghi}
		2	7,28±0,06 ^b	1,77±0,04 ^d	12,18±0,15 ^{ghi}
		3	7,11±0,10 ^b	2,71±0,03 ^h	9,38±0,47 ^{fghi}
	Prosječna vrijednost		7,85	3,28	12,33
	Minimalno		6,98	0,81	8,35
	Maksimalno		10,50	8,68	15,32
	Statistička značajnost		*	*	*

C_{fix} - fiksirani ugljik; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza mješavina biomase hrasta i poljoprivredne biomase pokazala je statistički značajne razlike u svim analiziranim svojstvima. Udio vlage bio je relativno ujednačen kod većine mješavina (oko 7%), osim kod mješavina sa SUN, gdje je dosežao do 10,50%. Udio pepela značajno je varirao, pri čemu je najmanja vrijednost utvrđena kod HRA+KUK1 (0,81%), a najveća kod HRA+SUN3 (8,68%). Najveći udio C_{fix} imao je HRA+KUK1 (15,32%), dok je najmanji zabilježen kod HRA+SUN3 (8,35%).

Udio koksa i HT te vrijednost NG prikazani su u tablici 28.

Tablica 28. Udio koksa i HT (%) te NG (kg/m³) u analiziranim mješavinama biomase

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Koks	HT	NG
	HRA+PŠE	1	18,46±0,01 ^{efgh}	75,67±0,01 ^b	288,65±152,82 ^{ab}
		2	19,39±0,51 ^{fghi}	74,98±0,47 ^b	231,14±123,29 ^{ab}
		3	19,15±0,14 ⁱ	72,28±0,15 ^b	182,77±0,20 ^{ab}
	HRA+KUK	1	17,38±0,25 ^{defg}	76,66±0,23 ^b	285,61±3,57 ^{abc}
		2	15,66±0,32 ^{defg}	77,22±0,09 ^b	229,89±2,77 ^{ab}
		3	13,74±0,56 ^{cdefg}	77,41±0,20 ^b	174,52±2,10^{ab}
	HRA+SUN	1	18,89±0,35 ^{defg}	76,49±1,59 ^b	288,33±3,73 ^{abc}
		2	19,68±0,26 ^{ghi}	72,36±0,14 ^b	231,31±3,59 ^{ab}
		3	21,39±0,16^{hi}	70,36±0,14^a	177,58±95,57 ^{ab}
	HRA+SOJ	1	16,97±0,01 ^{defg}	76,99±0,01 ^b	305,45±163,10^{ab}
		2	15,55±0,26 ^{bcdefg}	77,75±0,24^b	275,88±1,53 ^{ab}
		3	13,33±0,48^{defg}	77,14±0,45 ^b	239,93±0,31 ^{ab}
Prosječna vrijednost			17,47	75,44	242,59
Minimalno			13,33	70,36	174,52
Maksimalno			21,39	77,75	305,45
Statistička značajnost			*	*	*

HT - hlapljive tvari, NG - nasipna gustoća; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Najmanji udio koksa utvrđen je kod HRA+SOJ3 (13,33%), a najveći kod HRA+SUN3 (21,39%). Najmanji udio HT imao je HRA+SUN3 (70,36%), dok je najveći zabilježen kod HRA+SOJ2 (77,75%). Najmanju NG imao je HRA+KUK3 (174,52 kg/m³), a najveću HRA+SOJ1 (305,45 kg/m³). Općenito, povećanje udjela HRA u mješavini povećavalo je udio C_{fix} i HT, dok je veći udio SUN imao suprotan učinak, što upućuje na niži energetske potencijal takvih mješavina.

4.2.2. Elementarni sastav mješavina biomase

Slično kao i kod pojedinačnih vrsta drvne i poljoprivredne biomase, važan pokazatelj kvalitete mješavina biomase za proizvodnju biogoriva predstavlja i njihov elementarni sastav. Udio C, H, N, O i S značajno utječe na energetske vrijednosti biomase i emisije plinova tijekom procesa izgaranja. Vrijednosti udjela analiziranih elemenata prikazane su u tablici 29.

Tablica 29. Udio C, H, N, O i S u analiziranim mješavinama biomase (%)

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	C	H	N	O	S
	HRA+PŠE	1	45,03± 0,36 ^{jk}	6,17± 0,01 ^{ab}	0,19± 0,04^b	48,53± 0,03 ^c	0,09± 0,01^c
		2	43,77± 0,05 ^{de}	6,17± 0,04 ^{ab}	0,28± 0,02 ^{def}	49,69± 0,03 ^c	0,10± 0,01 ^c
		3	42,53± 0,02 ^b	6,12± 0,02 ^a	0,34± 0,02 ^{gh}	50,95± 0,03 ^a	0,10± 0,02 ^c
	HRA+KUK	1	45,49± 0,01 ^k	6,25± 0,01 ^{ab}	0,23± 0,01 ^{bc}	47,94± 0,06 ^c	0,10± 0,47 ^{abc}
		2	45,15± 0,36 ^{jk}	6,29± 0,03 ^{ab}	0,31± 0,03 ^{fg}	48,18± 0,44 ^c	0,09± 0,02^c
		3	44,49± 0,04 ^{gh}	6,31± 0,04 ^{ab}	0,48± 0,02 ^{lj}	48,65± 0,02 ^c	0,10± 0,03 ^c
	HRA+SUN	1	44,60± 0,17 ^{gh}	6,18± 0,03 ^{ab}	0,24± 0,01 ^{bcdef}	48,88± 0,55 ^c	0,10± 0,51 ^{abc}
		2	42,72± 0,17 ^{gh}	6,08± 0,03 ^{ab}	0,38± 0,02 ^{bcde}	50,71± 0,55 ^c	0,12± 0,51 ^{abc}
		3	40,87± 0,05^a	6,01± 0,44^b	0,58± 0,02^l	52,42± 0,02^c	0,13± 0,01^a
	HRA+SOJ	1	45,61± 0,06^k	6,27± 0,03 ^{ab}	0,24± 0,04 ^{bcd}	47,79± 0,08^c	0,10± 0,48 ^{abc}
		2	44,59± 0,07 ^{gh}	6,29± 0,01 ^{ab}	0,43± 0,01 ⁱ	48,61± 0,12 ^c	0,10± 0,10 ^c
		3	43,64± 0,10 ^{cde}	6,32± 0,01^{ab}	0,57± 0,03 ^{kl}	49,45± 0,10 ^c	0,10± 0,14 ^{bc}
	Prosječna vrijednost		44,04	6,21	0,36	49,32	0,10
	Minimalno		40,87	6,01	0,19	47,79	0,09
	Maksimalno		45,61	6,32	0,58	52,42	0,13
	Statistička značajnost		*	*	*	*	*

C - ugljik, H- vodik, N - dušik, O - kisik, S - sumpor; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Elementarni sastav mješavina pokazao je statistički značajne razlike za sve analizirane elemente. Najveći udio C imao je HRA+SOJ1 (45,61%), a najmanji HRA+SUN3 (40,87%), što upućuje na smanjenje energetskog potencijala s povećanjem udjela SUN u mješavini. Udio H kretao se između 6,01% i 6,32%, bez većih odstupanja među mješavinama, dok je udio N pokazao izraženije varijacije, od 0,19% kod HRA+PŠE1 do 0,58% kod HRA+SUN3. Kisik je bio najzastupljeniji element, s najmanjim udjelom kod HRA+SOJ1 (47,79%), i najvećim kod HRA+SUN3 (52,42%). Udio S kretao se od 0,09% kod HRA+PŠE1 i HRA+KUK2 do 0,13% kod HRA+SUN3, uz male razlike među mješavinama.

U tablici 30 prikazani su H/C i O/C omjeri mješavina biomase, koji su važni pokazatelji kvalitete biomase za energetska primjenu.

Tablica 30. H/C i O/C omjeri analiziranih mješavina biomase

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	H/C	O/C
	HRA+PŠE	1	1,63	0,81
		2	1,68	0,85
		3	1,71	0,90
	HRA+KUK	1	1,64	0,79
		2	1,66	0,80
		3	1,69	0,82
	HRA+SUN	1	1,65	0,82
		2	1,70	0,89
		3	1,75	0,96
	HRA+SOJ	1	1,64	0,79
		2	1,68	0,82
		3	1,73	0,85
	Prosječna vrijednost		1,68	0,84
	Minimalno		1,63	0,79
	Maksimalno		1,75	0,96

H/C - omjer vodika i ugljika, O/C - omjer kisika i ugljika

Rezultati pokazuju da se s povećanjem udjela poljoprivredne biomase povećavaju vrijednosti oba omjera. Najveći H/C omjer imao je HRA+SUN3 (1,75), a najmanji HRA+PŠE1 (1,63). Kod O/C omjera također je zabilježen porast s povećanjem udjela poljoprivredne biomase. Najmanji O/C omjer imali su HRA+KUK1 i HRA+SOJ1 (0,79), dok je najveći utvrđen za HRA+SUN3 (0,96).

4.2.3. Kemijski sastav mješavina biomase

Komponente kemijskog sastava biomase različito utječu na proces izgaranja, a njihov međusobni omjer izravno utječe na oslobađanje toplinske energije i učinkovitost izgaranja. Rezultati analize kemijskog sastava mješavina biomase prikazani su u tablici 31.

Tablica 31. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u analiziranim mješavinama biomase (%)

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Celuloza	Lignin	Hemiceluloza	ET
	HRA+PŠE	1	49,35±0,16 ^a	24,15±0,08 ^d	15,98±0,24 ^b	7,41±0,13 ^{fg}
		2	48,55±0,25 ^a	23,74±0,19 ^{cd}	18,95±0,65 ^a	6,90±0,22 ^{ef}
		3	48,37±0,17 ^a	22,52±0,34 ^{cd}	18,69±0,07 ^a	6,77±0,09^{def}
	HRA+KUK	1	48,54±0,50 ^a	23,71±0,35 ^d	18,58±0,48 ^a	7,51±0,12 ^{ab}
		2	49,01±0,17 ^a	22,98±0,50 ^{cd}	17,24±0,66 ^a	7,28±0,15 ^a
		3	49,85±0,60^a	21,65±10,84 ^{ab}	19,05±14,75 ^a	6,99±0,14 ^{bc}
	HRA+SUN	1	47,50±0,15 ^a	24,28±0,24 ^d	15,73±0,19^a	7,66±0,27 ^{ij}
		2	46,03±0,56 ^a	23,47±0,48 ^d	18,26±0,04 ^a	7,18±0,07 ^{hi}
		3	45,48±0,21^b	22,27±0,35 ^{cd}	16,23±0,14 ^a	7,65±0,29 ^{lm}
	HRA+SOJ	1	47,27±0,23 ^a	24,84±0,31^d	18,96±0,21 ^a	7,69±0,11^{cde}
		2	46,26±0,12 ^a	23,60±0,21 ^{cd}	20,11±0,38 ^a	7,52±0,22 ^{bcd}
		3	47,49±0,45 ^a	21,28±0,05^{cd}	21,21±0,45^a	6,94±0,08 ^{ab}
	Prosječna vrijednost		47,81	23,21	18,25	7,28
	Minimalno		45,48	21,28	15,73	6,77
	Maksimalno		49,85	24,84	21,21	7,69
	Statistička značajnost		*	*	*	*

ET - ekstraktivne tvari; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Kod kemijskog sastava mješavina biomase utvrđene su statistički značajne razlike za sve analizirane komponente. Najveći udio celuloze imao je HRA+KUK3 (49,85%), dok je najmanji utvrđen kod HRA+SUN3 (45,48%). Kod lignina najveći udio imao je HRA+SOJ1 (24,84%), a najmanji HRA+SOJ3 (21,28%), što može biti posljedica varijabilnosti SOJ biomase. Najveći udio hemiceluloze zabilježen je kod HRA+SOJ3 (21,21%), dok je najmanji imao HRA+SUN1 (15,73%). Udio ET bio je najveći kod HRA+SOJ1 (7,69%), a najmanji kod HRA+PŠE3 (6,77%).

4.2.4. Mineralni sastav mješavina biomase

Mineralni sastav mješavina biomase značajno utječe na kvalitetu sirovine za proizvodnju peleta, posebno zbog mogućeg povećanog udjela pepela i prisutnosti elemenata koji mogu uzrokovati taloženje i koroziju tijekom izgaranja. Takav sastav biomase može smanjiti energetske vrijednosti peleta te utjecati na njihovu klasifikaciju prema važećim standardima.

4.2.4.1. Sadržaj makroelemenata u mješavinama biomase

U mješavinama biomase analiziran je sadržaj makroelemenata Fe, Ca, K, Na i Mg. Sadržaj Mg nije utvrđen ni u jednoj mješavini biomase jer je bio ispod granice detekcije metode. Sadržaj analiziranih makroelemenata prikazan je u tablici 32.

Tablica 32. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u analiziranim mješavinama biomase (mg/kg)

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Fe	Ca	K	Na
	HRA+PŠE	1	53,27 ±2,88 ^a	778,07 ±432,17 ^a	2357,87 ±1117,21 ^{ab}	114,41 ±7,26 ^a
		2	75,33 ±185,17 ^d	1297,77 ±38,9 ^{ab}	4662,10 ±2415,99 ^{abc}	135,28 ±10,63 ^a
		3	94,52 ±24,34 ^{abc}	1792,77 ±962,78 ^{ab}	6604,49 ±3427,09 ^{abc}	150,41 ±91,14 ^a
	HRA+KUK	1	108,86 ±7,53 ^{abc}	619,43 ±305,05^a	586,56 ±26,37^a	128,85 ±95,90 ^a
		2	185,74 ±4,93 ^{bcd}	852,28 ±571,57 ^a	904,99 ±0,65 ^a	147,77 ±78,17 ^a
		3	271,41 ±104,18^{abcd}	1021,31 ±19,34 ^{ab}	1234,53 ±1,89 ^a	172,89 ±132,71 ^a
	HRA+SUN	1	63,60 ±0,90 ^{ab}	748,84 ±236,17 ^{ab}	7152,68 ±2,99 ^{abc}	151,22 ±88,51 ^a
		2	92,58 ±0,57 ^{abc}	1055,48 ±74,79 ^c	13707,73 ±7118,73 ^{cd}	192,63 ±85,99 ^a
		3	127,76 ±9,71 ^{abc}	1433,36 ±119,07 ^a	19332,67 ±5,87^e	238,90 ±109,16^a
	HRA+SOJ	1	43,69 ±13,79^{ab}	1342,64 ±119,76 ^{ab}	1089,82 ±4,98 ^{ab}	108,46 ±22,15^a
		2	55,37 ±5,30 ^{ab}	2330,66 ±12,26 ^a	1888,10 ±5,70 ^{ab}	132,33 ±19,08 ^a
		3	64,46 ±2,51 ^{abc}	3504,14 ±1820,90^{ab}	2443,15 ±5,70 ^{abc}	151,66 ±50,10 ^a
	Prosječna vrijednost		103,05	1398,06	5163,72	152,07
	Minimalno		43,69	619,43	586,56	108,46
	Maksimalno		271,41	3504,14	19332,67	238,90
	Statistička značajnost		*	*	*	n.s.

Fe - željezo, Ca - kalcij, K - kalij, Na - natrij; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Sadržaj makroelemenata u mješavinama biomase varirao je ovisno o vrsti i udjelu sirovina, pri čemu su statistički značajne razlike utvrđene za sadržaj Fe, Ca i K, ali ne i za Na. Najveći sadržaj Fe imao je HRA+KUK3 (271,41 mg/kg), a najmanji HRA+SOJ1 (43,69 mg/kg). Najveći sadržaj Ca zabilježen je kod HRA+SOJ3 (3504,14 mg/kg), dok je najmanji utvrđen kod HRA+KUK1 (619,43 mg/kg). Kalij je također pokazao izražene varijacije, od najmanjeg sadržaja kod HRA+KUK1 (586,56 mg/kg) do najvećeg kod HRA+SUN3 (19 332,67 mg/kg).

Natrij je bio prisutan u znatno manjim količinama, pri čemu je najmanji sadržaj imao HRA+SOJ1 (108,46 mg/kg), a najveći HRA+SUN3 (238,90 mg/kg).

4.2.4.2. Sadržaj mikroelemenata u mješavinama biomase

U mješavinama biomase analiziran je sadržaj mikroelemenata Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb i Zn. Sadržaj Cd, Co, Cr, Pb i Zn nije utvrđen ni u jednoj mješavini biomase jer je bio ispod granice detekcije metode. Sadržaj utvrđenih mikroelemenata Mn, Ni i Cu prikazan je u tablici 33.

Tablica 33. Sadržaj Mn, Ni i Cu u analiziranim mješavinama biomase (mg/kg)

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Mn	Ni	Cu
	HRA+PŠE	1	18,44 ±0,50 ^{abcde}	2,21 ±0,15 ^a	3,06 ±0,59 ^a
		2	28,56 ±3,18 ^{defghi}	1,92 ±0,48 ^{cdef}	2,74 ±0,90 ^{ab}
		3	37,89 ±1,34^{ghi}	1,72 ±0,25^{abcd}	2,36 ±0,50^{ab}
	HRA+KUK	1	17,70 ±0,76 ^{bcdefg}	2,76 ±0,61 ^{abcd}	3,34 ±0,85 ^{abc}
		2	26,64 ±0,17 ^{fghi}	3,18 ±0,01 ^{abc}	3,31 ±0,63 ^{bcde}
		3	34,39 ±0,14 ^{ij}	3,56 ±0,40^{abc}	3,29 ±0,69 ^{bcde}
	HRA+SUN	1	10,31 ±4,73 ^a	2,54 ±0,07 ^a	4,45 ±0,51 ^{bcde}
		2	12,45 ±0,95 ^{abc}	2,58 ±0,48 ^{abcd}	5,83 ±0,81 ^f
		3	13,62 ±1,13 ^{abcd}	2,63 ±0,62 ^{abc}	7,09 ±0,12^g
	HRA+SOJ	1	9,14 ±0,26 ^{ab}	2,39 ±0,17 ^{abcd}	3,08 ±0,61 ^{ab}
		2	8,48 ±0,30^{ab}	2,28 ±0,89 ^{abc}	2,65 ±0,67 ^{abcd}
		3	8,61 ±0,38 ^{ab}	2,17 ±0,08 ^{ab}	2,36 ±0,80^{abcd}
	Prosječna vrijednost		18,85	2,50	3,63
	Minimalno		8,48	1,72	2,36
	Maksimalno		37,89	3,56	7,09
	Statistička značajnost		*	*	*

Mn - mangan, Ni - nikl, Cu - bakar; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza mikroelemenata u mješavinama biomase pokazala je statistički značajne razlike za sva tri analizirana elementa. Najveći sadržaj Mn imao je HRA+PŠE3 (37,89 mg/kg), a najmanji HRA+SOJ2 (8,48 mg/kg). Kod Ni, najveći sadržaj utvrđen je kod HRA+KUK3 (3,56 mg/kg), dok je najmanji zabilježen kod HRA+PŠE3 (1,72 mg/kg). Najveći sadržaj Cu imao je

HRA+SUN3 (7,09 mg/kg), a najmanji HRA+PŠE3 i HRA+SOJ3 (2,36 mg/kg). Općenito, mješavine sa SUN imale su veći sadržaj Cu, što upućuje na veći doprinos biomase SUN ukupnom sadržaju ovog elementa u mješavinama.

4.2.5. Ogrjevna vrijednost mješavina biomase

Analiza ogrjevnosti vrijednosti mješavina drvene i poljoprivredne biomase važna je za procjenu njihova energetskog potencijala i prikladnosti za proizvodnju peleta. Različiti udjeli vlage, pepela i HT u mješavinama mogu značajno utjecati na ogrjevnost i učinkovitost izgaranja. Vrijednosti GOV i DOV mješavina drvene i poljoprivredne biomase prikazane su u tablici 34.

Tablica 34. Gornja i donja ogrjevna vrijednost analiziranih mješavina biomase (MJ kg⁻¹)

Biomasa mješavina	Kultura	Omjer	GOV	DOV
	HRA+PŠE	1	18,59±0,06 ^{ghi}	17,15±0,06 ^{hi}
		2	17,95±0,01 ^{ghi}	16,51±0,01 ^{cdef}
		3	17,65±0,08^{hi}	16,37±0,27^{cd}
	HRA+KUK	1	18,58±0,05 ^{hi}	17,14±0,22 ^{hi}
		2	18,41±0,39 ^{hi}	16,94±0,08 ^{gh}
		3	18,45±0,24 ^{hi}	16,96±0,13 ^{ghi}
	HRA+SUN	1	19,01±0,01 ⁱ	17,55±0,01 ^{hi}
		2	18,44±0,15 ^a	16,96±0,14 ^{cd}
		3	18,03±0,08 ^{ab}	16,57±0,11 ^b
	HRA+SOJ	1	19,03±0,02^{bc}	17,57±0,02ⁱ
		2	18,76±0,20 ^{bcd}	17,28±0,23 ⁱ
		3	18,39±0,06 ^{bcd}	16,90±0,01 ^{gh}
	Prosječna vrijednost		18,44	16,99
	Minimalno		17,65	16,37
	Maksimalno		19,03	17,57
	Statistička značajnost		*	*

GOV - gornja ogrjevna vrijednost, DOV - donja ogrjevna vrijednost; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Rezultati analize pokazali su statistički značajne razlike u vrijednostima GOV i DOV. Najveću vrijednost GOV imao je HRA+SOJ1 (19,03 MJ kg⁻¹), a najmanju HRA+PŠE3 (17,65 MJ kg⁻¹). Isti trend zabilježen je i kod DOV, pri čemu je najveću vrijednost imao HRA+SOJ1 (17,57 MJ kg⁻¹), a najmanju HRA+PŠE3 (16,37 MJ kg⁻¹). Najveće ogrjevnosti zabilježene su kod mješavina s manjim udjelom poljoprivredne biomase, osobito kod HRA+SOJ1 i HRA+SUN1. Također, uočena je povezanost između H/C i O/C omjera i ogrjevnosti, pri čemu su mješavine s većim udjelom HRA imale niže vrijednosti H/C i O/C omjera te veću ogrjevnost.

vrijednost. Posebno se izdvajaju mješavine sa SOJ, koje su pokazale nešto veću ogrjevnu vrijednost u odnosu na očekivane vrijednosti H/C i O/C omjera, što može biti povezano sa specifičnim kemijskim sastavom i prisutnošću ulja u biomasi soje.

4.3. Ponderirani proračun analiziranih svojstava mješavina biomase

Zbog ograničene dostupnosti podataka iz literature o svojstvima mješavina biomase, proveden je ponderirani proračun teorijskih vrijednosti na temelju udjela pojedinačnih biomasa. Usporedbom teorijskih i analiziranih vrijednosti određene su ΔY i %E. Detaljna analiza dobivenih odstupanja, uključujući moguću pojavu sinergijskih i antagonističkih učinaka, prikazana je u poglavlju Rasprava.

4.3.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava mješavina biomase

U tablici 35 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za NG, udio vlage i pepela analiziranih mješavina biomase.

Tablica 35. Ponderirani proračun ΔY i %E za NG, udio vlage i pepela u mješavinama biomase

	Vrsta	Omjer	NG		Vlaga		Pepeo	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
Biomasa mješavina	HRA+PŠE	1	-4,09	1,40	-0,64	8,15	0,05	2,46
		2	-7,57	3,17	-0,63	8,28	0,10	2,52
		3	-1,90	1,03	-0,27	3,66	0,19	3,44
	HRA+KUK	1	-4,68	1,61	-0,79	9,82	-0,07	7,69
		2	-3,92	1,68	-0,76	9,62	-0,07	4,53
		3	-2,81	1,58	-0,71	9,03	-0,10	4,21
	HRA+SUN	1	-3,85	1,32	0,23	2,57	-0,25	7,86
		2	-6,27	2,64	-0,04	0,45	-0,39	6,09
		3	-5,41	2,96	-0,49	4,48	-0,76	8,03
	HRA+SOJ	1	-7,08	2,27	-0,57	7,28	-0,03	2,73
		2	-2,41	0,87	-0,29	3,83	-0,15	7,57
		3	-4,12	1,69	-0,20	2,74	-0,11	3,99

NG - nasipna gustoće, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

U tablici 36 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za udio C_{fix} , koksa i HT u analiziranim mješavinama biomase.

Tablica 36. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio C_{fix} , koksa i HT u mješavinama biomase

	Vrsta	Omjer	C_{fix}		Koks		HT	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
Biomasa mješavina	HRA+PŠE	1	-0,04	0,28	-0,13	0,67	0,65	0,86
		2	0,73	5,39	0,75	4,02	-0,19	0,25
		3	-0,24	2,03	0,45	2,43	-3,04	4,03
	HRA+KUK	1	0,79	5,44	0,63	3,75	0,06	0,08
		2	0,83	6,84	0,68	4,57	-1,10	1,40
		3	0,40	4,11	0,54	4,11	-2,62	3,28
	HRA+SUN	1	-1,07	7,50	-0,32	1,67	3,00	4,08
		2	-0,70	6,02	-0,21	1,06	0,26	0,36
		3	-0,50	5,68	0,82	3,99	-0,35	0,49
	HRA+SOJ	1	0,48	3,40	0,36	2,18	0,11	0,15
		2	0,54	4,64	0,87	5,89	-1,13	1,43
		3	0,39	4,28	0,57	4,45	-3,73	4,62

C_{fix} - fiksirani ugljik, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.3.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava mješavina biomase

U tablici 37 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za udio C, H i N u analiziranim mješavinama biomase.

Tablica 37. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio C, H i N u mješavinama biomase

	Vrsta	Omjer	C		H		N	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
Biomasa mješavina	HRA+PŠE	1	-0,22	0,49	-0,03	0,40	0,01	5,56
		2	-0,25	0,58	0,00	0,00	0,01	3,70
		3	-0,27	0,63	-0,03	0,41	-0,02	5,56
	HRA+KUK	1	-0,34	0,73	0,01	0,16	0,02	8,24
		2	-0,02	0,04	0,03	0,48	-0,03	7,46
		3	-0,02	0,06	0,03	0,48	0,02	4,92
	HRA+SUN	1	-0,12	0,27	0,02	0,37	-0,02	5,88
		2	-0,24	0,56	-0,01	0,25	-0,04	9,52
		3	-0,33	0,80	-0,02	0,37	-0,01	0,85
	HRA+SOJ	1	-0,05	0,10	0,01	0,16	-0,02	7,69
		2	-0,24	0,55	-0,01	0,16	0,00	0,00
		3	-0,37	0,85	-0,02	0,32	-0,03	5,00

C - ugljik, H - vodik, N - dušik, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

Vrijednosti ΔY i %E za udio O i S u analiziranim mješavinama biomase prikazane su u tablici 38.

Tablica 38. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio O i S u mješavinama biomase

	Vrsta	Omjer	O		S	
			ΔY	%E	ΔY	%E
Biomasa mješavina	HRA+PŠE	1	0,25	0,52	-0,01	9,27
		2	0,26	0,52	-0,01	9,52
		3	0,36	0,71	-0,01	9,77
	HRA+KUK	1	0,31	0,65	0,00	1,00
		2	0,04	0,08	-0,01	6,00
		3	0,00	0,00	0,00	4,00
	HRA+SUN	1	0,12	0,24	-0,01	12,17
		2	0,31	0,61	-0,01	8,85
		3	0,37	0,72	-0,02	10,34
	HRA+SOJ	1	0,06	0,12	0,00	4,00
		2	0,27	0,55	0,00	3,42
		3	0,49	1,01	0,00	4,14

O - kisik, S - sumpor, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.3.3. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera mješavina biomase

U tablici 39 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za H/C i O/C omjer analiziranih mješavina biomase.

Tablica 39. Ponderirani proračun ΔY i %E za H/C i O/C omjer mješavina biomase

	Vrsta	Omjer	H/C		O/C	
			ΔY	%E	ΔY	%E
Biomasa mješavina	HRA+PŠE	1	0,00	0,00	0,01	0,94
		2	0,01	0,60	0,01	0,59
		3	0,00	0,00	0,01	1,41
	HRA+KUK	1	0,02	1,23	0,01	1,28
		2	0,01	0,61	0,00	0,00
		3	0,01	0,60	0,00	0,00
	HRA+SUN	1	0,00	0,46	-0,01	0,61
		2	0,00	0,29	0,00	0,00
		3	0,00	0,14	0,00	0,52
	HRA+SOJ	1	0,00	0,46	0,01	0,64
		2	0,00	0,30	0,01	1,23
		3	0,01	0,73	0,02	1,79

H/C - omjer vodika i ugljika, O/C - omjer kisika i ugljika, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.3.4. Ponderirani proračun kemijskog sastava mješavina biomase

U tablici 40 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u analiziranim mješavinama biomase.

Tablica 40. Ponderirani proračun ΔY i %E za udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u mješavinama biomase

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Celuloza		Lignin		Hemiceluloza		ET	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	-0,44	0,88	0,85	3,66	-1,49	8,52	-1,04	12,26
		2	-1,52	3,03	1,12	4,93	1,25	7,03	-1,10	13,75
		3	-1,97	3,92	0,57	2,59	0,75	4,17	-0,79	10,39
	HRA+KUK	1	-1,66	3,30	1,03	4,53	1,09	6,23	-1,13	13,08
		2	-1,88	3,68	1,59	7,41	-0,51	2,87	-1,11	13,23
		3	-1,72	3,34	1,54	7,67	1,04	5,77	-1,15	14,13
	HRA+SUN	1	-1,57	3,19	1,17	5,05	-1,69	9,68	-0,83	9,75
		2	-2,60	5,34	1,22	5,46	0,66	3,75	-0,91	11,19
		3	-2,70	5,61	0,87	4,08	-1,56	8,74	-0,03	0,42
	HRA+SOJ	1	-2,13	4,31	1,98	8,66	0,74	4,06	-0,76	9,18
		2	-3,03	6,14	1,85	8,51	0,90	4,69	-1,09	14,27
		3	-1,68	3,42	0,64	3,10	1,01	5,00	-0,83	11,96

ET - ekstraktivne tvari, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.3.5. Ponderirani proračun mineralnog sastava mješavina biomase

U tablici 41 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za sadržaj makroelemenata Fe, Ca, K i Na u analiziranim mješavinama biomase.

Tablica 41. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Fe, Ca, K i Na u mješavinama biomase

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Fe		Ca		K		Na	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	-8,22	13,36	-19,04	2,39	-136,17	5,19	-3,71	5,60
		2	-10,51	12,24	-46,50	3,46	-345,09	6,89	6,49	9,98
		3	-15,68	14,22	-98,66	5,22	-440,48	5,96	3,60	5,64
	HRA+KUK	1	-14,59	11,82	-72,39	9,11	37,27	6,88	5,66	7,39
		2	-24,03	11,45	-88,00	6,57	57,34	6,76	7,57	8,81
		3	-24,67	8,33	-46,15	2,45	57,76	5,01	6,28	6,59
	HRA+SUN	1	-7,90	11,04	12,26	2,86	301,06	3,72	8,29	7,04
		2	-13,28	12,54	-7,65	1,26	-965,32	6,05	14,40	8,56
		3	-12,47	8,89	15,38	1,96	-969,47	4,07	20,34	9,30
	HRA+SOJ	1	-5,48	11,14	-53,74	3,85	40,12	3,12	-2,90	4,50
		2	-5,83	9,53	-212,16	8,34	-152,68	6,54	-4,78	7,75
		3	-8,78	11,98	-185,12	5,02	-239,02	7,06	-5,34	9,08

Fe - željezo, Ca - kalcij, K - kalij, Na - natrij, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

U tablici 42 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za sadržaj mikroelemenata Mn, Ni i Cu u analiziranim mješavinama biomase.

Tablica 42. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Mn, Ni i Cu u mješavinama biomase

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	Mn		Ni		Cu	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	-2,70	12,78	-0,30	11,86	-0,28	8,31
		2	-3,07	9,69	-0,26	11,72	-0,27	8,82
		3	-4,22	10,02	-0,12	6,65	-0,31	11,69
	HRA+KUK	1	-1,64	8,47	-0,45	14,02	-0,31	8,56
		2	-1,38	4,91	-0,40	11,17	-0,33	8,94
		3	-2,30	6,28	-0,39	9,87	-0,33	9,05
	HRA+SUN	1	-1,54	12,96	-0,32	11,19	-0,50	10,06
		2	-0,58	4,45	-0,30	10,42	-0,40	6,35
		3	-0,60	4,19	-0,27	9,31	-0,41	5,50
	HRA+SOJ	1	-1,21	11,71	-0,34	12,37	-0,26	7,72
		2	-1,57	15,58	-0,34	12,81	-0,36	11,81
		3	-1,13	11,58	-0,33	13,29	-0,31	11,69

Mn - mangan, Ni - nikl, Cu - bakar, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.3.6. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti mješavina biomase

U tablici 43 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za GOV i DOV u mješavinama biomase.

Tablica 43. Ponderirani proračun ΔY i %E za GOV i DOV mješavina biomase

Biomasa mješavina	Vrsta	Omjer	GOV		DOV	
			ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	-0,30	1,59	-0,28	1,61
		2	-0,58	3,11	-0,56	3,29
		3	-0,52	2,84	-0,35	2,09
	HRA+KUK	1	-0,49	2,56	-0,46	2,60
		2	-0,47	2,49	-0,47	2,67
		3	-0,25	1,35	-0,26	1,50
	HRA+SUN	1	0,14	0,73	0,17	0,99
		2	-0,05	0,30	-0,05	0,31
		3	-0,08	0,46	-0,06	0,38
	HRA+SOJ	1	-0,06	0,29	-0,06	0,33
		2	-0,17	0,90	-0,17	0,96
		3	-0,38	2,00	-0,38	2,18

GOV - gornja ogrjevna vrijednost, DOV - donja ogrjevna vrijednost, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.4. Analiza svojstava peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa

Za procjenu energetskog potencijala peleta kao obnovljivog izvora energije potrebno je analizirati njihova energetska svojstva koja utječu na proces izgaranja i mehaničku stabilnost. U okviru istraživanja proizvedeni su peleti od pojedinačne biomase hrasta, soje, kukuruza, suncokreta i pšenice. U ovom dijelu rada prikazani su rezultati analiza njihovih fizikalno-

kemijskih i mehaničkih svojstava, elementarnog, kemijskog i mineralnog sastava te ogrjevne vrijednosti.

4.4.1. Fizikalno-kemijska svojstva peleta od pojedinačnih biomasa

Analiza fizikalno-kemijskih svojstava peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa obuhvatila je određivanje PG, NG te udjela vlage, pepela, koksa, C_{fix} i HT. Prije određivanja gustoće peletima su izmjereni promjer, duljina, masa i volumen (tablica 44).

Tablica 44. Promjer, duljina, masa i volumen peleta od pojedinačnih biomasa

	Vrsta	Promjer (mm)	Duljina (mm)	Masa (g)	Volumen (cm ³)
Pelet	HRA	6,05	23,61	0,85	0,68
	KUK	6,00	24,21	0,87	0,68
	SOJ	6,11	23,57	0,83	0,69
	PŠE	6,10	23,07	0,82	0,67
	SUN	5,98	23,64	0,87	0,66
	Prosječna vrijednost	6,05	23,62	0,85	0,68
	Minimalno	5,98	23,07	0,82	0,66
	Maksimalno	6,11	24,21	0,87	0,69

Analiza fizikalnih svojstava peleta pokazala je relativno ujednačene vrijednosti promjera, duljine, mase i volumena. Promjer peleta imao je uski raspon od 5,98 mm kod peleta SUN do 6,11 mm kod peleta SOJ, uz prosječnu vrijednost od 6,05 mm, što upućuje na dobru kontrolu procesa prešanja. Duljina peleta kretala se od 23,07 mm kod peleta PŠE do 24,21 mm kod peleta KUK, dok je najmanju masu imao pelet PŠE (0,82 g), a najveću peleti KUK i SUN (0,87 g). Volumen peleta također je pokazao mali raspon vrijednosti, od 0,66 cm³ kod peleta SUN do 0,69 cm³ kod peleta SOJ. Uzimajući u obzir srednje vrijednosti analiziranih parametara, svi proizvedeni peleti zadovoljili su osnovne tehničke zahtjeve u pogledu dimenzija i mase, što je važno za ravnomjernu dobavu goriva u sustavima za izgaranje.

U tablici 45 prikazane su vrijednosti PG i NG peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa.

Tablica 45. PG i NG peleta od pojedinačnih biomasa (kg/m³)

Pelet	Vrsta	PG	NG
	HRA	1255,90±22,13 ^b	687,33±1,81 ^{fg}
	KUK	1277,59±15,43 ^b	682,60±1,73 ^f
	SOJ	1210,04±45,04^a	691,90±1,65^g
	PŠE	1223,36±39,44 ^a	672,43±4,32^e
	SUN	1305,56±17,57^c	684,57±3,27 ^h
Prosječna vrijednost		1254,49	683,77
Minimalno		1210,04	672,43
Maksimalno		1305,56	691,90
Statistička značajnost		*	*

PG - pojedinačna gustoća, NG - nasipna gustoća; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analizirane vrijednosti pokazale su statistički značajne razlike za oba svojstva. Najveću PG imao je pelet SUN (1305,56 kg/m³), a najmanju pelet SOJ (1210,04 kg/m³). Iako su peleti KUK i HRA također imali relativno visoku PG (1277,59 i 1255,90 kg/m³), njihove vrijednosti bile su nešto niže u odnosu na pelet SUN. Kod NG najveću vrijednost imao je pelet SOJ (691,90 kg/m³), a najmanju pelet PŠE (672,43 kg/m³).

Udio vlage, pepela, koksa, C_{fix} i HT prikazan je u tablici 46.

Tablica 46. Udio vlage, pepela, C_{fix}, koksa i HT u peletima od pojedinačnih biomasa (%)

Pelet	Vrsta	Vlaga	Pepeo	C _{fix}	Koks	HT
	HRA	8,05±0,05^c	0,22±0,04^a	13,40±0,07^e	14,81±0,08^b	78,33±0,07^e
	KUK	10,59±0,03^f	3,38±0,04 ^{bc}	10,77±0,10 ^d	15,82±0,11 ^b	75,26±0,10 ^c
	SOJ	10,52±0,01 ^f	3,44±0,02 ^c	10,16±0,11 ^d	15,19±0,12 ^b	75,88±0,11 ^{cd}
	PŠE	8,60±0,06 ^d	6,44±0,05 ^e	8,10±0,63 ^c	15,91±0,68 ^b	76,86±0,63 ^d
	SUN	10,22±0,09 ^e	12,29±0,02^g	6,00±0,39^a	20,37±0,44^d	71,49±0,39^b
Prosječna vrijednost		9,60	5,15	9,69	16,42	75,56
Minimalno		8,05	0,22	6,00	14,81	71,49
Maksimalno		10,59	12,29	13,40	20,37	78,33
Statistička značajnost		*	*	*	*	*

C_{fix} - fiksirani ugljik, HT - hlapljive tvari; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza svojstava peleta pokazala je statistički značajne razlike između svih analiziranih vrsta peleta. Pelet HRA imao je najmanji udio vlage (8,05%), dok je najveći zabilježen kod peleta KUK (10,59%). Udio pepela bio je najmanji kod peleta HRA (0,22%), a najveći kod peleta

SUN (12,29%), što može značajno utjecati na kvalitetu izgaranja i količinu ostatka nakon izgaranja. Pelet HRA imao je najveći udio C_{fix} (13,40%), dok je najmanji bio kod peleta SUN (6,00%). Kod udjela koksa pelet HRA imao je najmanju vrijednost (14,81%), a pelet SUN najveću (20,37%). Najveći udio HT imao je pelet HRA (78,33%), dok je najmanji bio kod peleta SUN (71,49%).

4.4.2. Elementarni sastav peleta od pojedinačnih biomasa

Elementarni sastav, posebno udio C, H i O, izravno utječe na energetska svojstva peleta. Veći udio C i H povećava količinu energije oslobođene tijekom izgaranja, dok veći udio O obično smanjuje ogrjevnju vrijednost. Udio N i S važan je zbog mogućeg utjecaja na emisije štetnih plinova tijekom izgaranja. Analizirani udjeli kemijskih elemenata prikazani su u tablici 47.

Tablica 47. Udio C, H, N, O i S u peletima od pojedinačnih biomasa (%)

Pelet	Vrsta	C	H	N	O	S
	HRA	45,53±0,03 ^g	6,23±0,05 ^d	0,10±0,08 ^a	48,04±0,08 ^b	0,10±0,08 ^a
	KUK	42,58±0,21 ^d	6,20±0,02 ^d	0,58±0,01 ^d	50,51±0,19 ^e	0,14±0,04 ^b
	SOJ	42,49±0,03 ^d	6,30±0,02 ^e	0,60±0,06 ^d	50,50±0,01 ^e	0,11±0,01 ^a
	PŠE	41,82±0,02 ^c	6,11±0,02 ^c	0,39±0,02 ^b	51,58±0,03 ^f	0,11±0,03 ^a
	SUN	39,86±0,18 ^b	5,76±0,01 ^a	0,69±0,01 ^e	53,50±0,20 ^g	0,19±0,01 ^d
Prosječna vrijednost		42,42	6,12	0,47	50,83	0,13
Minimalno		39,86	5,76	0,10	48,04	0,10
Maksimalno		45,53	6,30	0,69	53,50	0,19
Statistička značajnost		*	*	*	*	*

C - ugljik, H - vodik, N - dušik, O - kisik, S - sumpor; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Sve razlike u elementarnom sastavu peleta bile su statistički značajne, što potvrđuje važnost odabira sirovine pri proizvodnji peleta. Najveći udio C, koji značajno utječe na energetska svojstva, imao je pelet HRA (45,53%), dok je najmanji imao pelet SUN (39,86%). Iako je udio H bio relativno ujednačen, najveći je imao pelet SOJ (6,30%), a najmanji pelet SUN (5,76%). Najmanji udio N imao je pelet HRA (0,10%), dok je najveći imao pelet SUN (0,69%). Pelet SUN imao je najveći udio O (53,50%), što upućuje na nižu energetska svojstva, dok je najmanji imao pelet HRA (48,04%). Sličan trend zabilježen je i kod udjela S, gdje je najveći imao pelet SUN (0,19%), a najmanji pelet HRA (0,10%).

4.4.3. H/C i O/C omjer peleta od pojedinačnih biomasa

U tablici 48 prikazani su H/C i O/C omjeri peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa.

Tablica 48. H/C i O/C omjeri peleta od pojedinačnih biomasa

Pelet	Vrsta	H/C	O/C
	HRA	1,63	0,79
	KUK	1,74	0,89
	SOJ	1,77	0,89
	PŠE	1,74	0,93
	SUN	1,72	1,01
Prosječna vrijednost		1,72	0,90
Minimalno		1,63	0,79
Maksimalno		1,77	1,01

H/C - omjer vodika i ugljika, O/C - omjer kisika i ugljika

Najmanji H/C omjer imao je pelet HRA (1,63), a najveći pelet SOJ (1,77). Prosječna vrijednost H/C omjera za sve analizirane pelete iznosila je 1,72, što upućuje na relativno visok udio H u peletima. Kod O/C omjera najmanju vrijednost imao je pelet HRA (0,79), dok je najveća utvrđena kod peleta SUN (1,01).

4.4.4. Kemijski sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Kemijski sastav značajno utječe na energetska vrijednost peleta i učinkovitost procesa izgaranja. Analiza udjela celuloze, lignina, hemiceluloze i ET provedena je za pelete proizvedene od pojedinačnih biomasa, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 49.

Tablica 49. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u peletima od pojedinačnih biomasa (%)

Pelet	Vrsta	Celuloza	Lignin	Hemiceluloza	ET
	HRA	49,11±0,25 ^c	24,12±0,18 ^e	16,82±0,43 ^d	9,73±0,16 ^f
	KUK	51,61±0,24 ^e	18,03±0,19 ^a	19,92±0,05 ^e	7,06±0,08 ^{bc}
	SOJ	48,03±0,05 ^b	20,17±0,04 ^c	22,58±0,09 ^g	5,77±0,02 ^a
	PŠE	48,17±0,16 ^{bc}	20,41±0,02 ^c	17,32±0,16 ^d	7,66±0,20 ^d
	SUN	47,85±0,38 ^a	18,83±0,01 ^b	16,54±0,38 ^h	6,93±0,05 ^{bc}
Prosječna vrijednost		48,95	20,31	18,64	7,43
Minimalno		47,85	18,03	16,54	5,77
Maksimalno		51,61	24,12	22,58	9,73
Statistička značajnost		*	*	*	*

ET - ekstraktivne tvari; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Na temelju rezultata analize kemijskog sastava utvrđene su statistički značajne razlike između analiziranih vrsta peleta. Najveći udio celuloze imao je pelet KUK (51,61%), dok je najmanji imao pelet SUN (47,85%). Najveći udio lignina imao je pelet HRA (24,12%), dok je najmanji bio kod peleta KUK (18,03%). Pelet SOJ imao je najveći udio hemiceluloze (22,58%), a pelet

SUN najmanji (16,54%). Udio ET također je varirao, pri čemu je najveći imao pelet HRA (9,73%), a najmanji pelet SOJ (5,77%).

4.4.5. Mineralni sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Mineralni sastav peleta utječe na njihova energetska svojstva i proces izgaranja, pri čemu povećani sadržaj pojedinih elemenata može uzrokovati taloženje, koroziju i povećane emisije štetnih plinova. U okviru istraživanja provedena je analiza sadržaja mikroelemenata i makroelemenata u peletima proizvedenima od pojedinačnih biomasa.

Od makroelemenata analizirani su Fe, Ca, K, Na i Mg. Sadržaj Mg nije utvrđen ni u jednoj skupini peleta jer je bio ispod granice detekcije metode. Vrijednosti utvrđenih makroelemenata prikazane su u tablici 50.

Tablica 50. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u peletima od pojedinačnih biomasa (mg/kg)

Pelet	Vrsta	Fe	Ca	K	Na
	HRA	46,47 ±2,22 ^a	517,21 ±179,89 ^a	258,98 ±118,22 ^c	86,80 ±8,66 ^a
	KUK	433,03 ±235,96 ^b	1489,46 ±42,32 ^{ab}	1558,57 ±808,53 ^a	194,23 ±94,53 ^a
	SOJ	105,27 ±49,97 ^a	4463,76 ±605,01 ^c	3473,71 ±1782,26 ^a	170,55 ±127,20 ^a
	PŠE	129,67 ±1,49 ^a	2728,00 ±1382,87 ^{ab}	8845,79 ±12,07 ^{ab}	200,44 ±114,97 ^a
	SUN	202,18 ±93,54 ^a	1725,63 ±500,53 ^{ab}	22307,50 ±11593,83 ^b	287,89 ±29,61 ^a
Prosječna vrijednost		183,32	2184,81	7288,91	187,98
Minimalno		46,47	517,21	258,98	86,80
Maksimalno		433,03	4463,76	22307,50	287,89
Statistička značajnost		*	*	*	n.s.

Fe - željezo, Ca - kalcij, K - kalij, Na - natrij; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza makroelemenata peleta pokazala je statistički značajne razlike u sadržaju Fe, Ca i K, dok kod Na nije utvrđena statistički značajna razlika. Najveći sadržaj Fe imao je pelet KUK (433,03 mg/kg), a najmanji pelet HRA (46,47 mg/kg). Pelet HRA imao je i najmanji sadržaj Ca (517,21 mg/kg), dok je najveći zabilježen kod peleta SOJ (4463,76 mg/kg). Najmanji sadržaj K imao je pelet HRA (258,98 mg/kg), a najveći pelet SUN (22 307,50 mg/kg). Sličan trend zabilježen je i kod sadržaja Na, gdje je najmanji sadržaj imao pelet HRA (86,80 mg/kg), a najveći pelet SUN (287,89 mg/kg).

Od mikroelemenata analizirani su Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Cu, Pb i Zn. Sadržaj Cd, Co, Cr, Pb i Zn nije utvrđen ni u jednoj skupini peleta jer su njihove vrijednosti bile ispod granice detekcije metode. Vrijednosti utvrđenih mikroelemenata prikazane su u tablici 51.

Tablica 51. Sadržaj Mn, Ni i Cu u peletima od pojedinačnih biomasa (mg/kg)

Pelet	Vrsta	Mn	Ni	Cu
	HRA	14,50±0,92 ^{ab}	1,43±1,18 ^a	3,96±0,21 ^a
	KUK	39,05±19,79 ^{abc}	5,23±0,71 ^c	5,13±0,26 ^a
	SOJ	11,09±5,56 ^{ab}	4,64±1,14 ^{bc}	4,08±0,51 ^a
	PŠE	58,38±0,39 ^c	2,52±0,06 ^a	2,62±0,21 ^a
	SUN	19,14±0,59 ^{ab}	2,93±0,31 ^{ab}	10,64±0,05 ^a
Prosječna vrijednost		28,43	3,35	5,29
Minimalno		11,09	1,43	2,62
Maksimalno		58,38	5,23	10,64
Statistička značajnost		*	*	n.s.

Mn - mangan, Ni - nikl, Cu - bakar; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Kod mikroelemenata analiza je pokazala statistički značajne razlike u sadržaju Mn i Ni, dok kod Cu nije utvrđena statistički značajna razlika. Najveći sadržaj Mn imao je pelet PŠE (58,38 mg/kg), a najmanji pelet SOJ (11,09 mg/kg). Kod Ni, najveći sadržaj imao je pelet KUK (5,23 mg/kg), a najmanji pelet HRA (1,43 mg/kg). Najmanji sadržaj Cu imao je pelet PŠE (2,62 mg/kg), dok je najveći zabilježen kod peleta SUN (10,64 mg/kg).

4.4.6. Ogrjevna vrijednost peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Ogrjevna vrijednost jedan je od najvažnijih pokazatelja energetske iskoristivosti peleta jer određuje količinu energije koja se može osloboditi tijekom izgaranja. Vrijednosti GOV i DOV peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa prikazane su u tablici 52.

Tablica 52. GOV i DOV peleta od pojedinačnih biomasa (MJ kg⁻¹)

Pelet	Vrsta	GOV	DOV
	HRA	19,15±0,01 ^g	17,67±0,01 ^g
	KUK	18,34±0,02 ^c	16,82±0,02 ^c
	SOJ	18,55±0,01 ^d	17,02±0,01 ^d
	PŠE	17,98±0,01 ^c	16,52±0,01 ^c
	SUN	17,08±0,01 ^a	15,67±0,01 ^a
Prosječna vrijednost		18,22	16,74
Minimalno		17,08	15,67
Maksimalno		19,15	17,67
Statistička značajnost		*	*

GOV - gornja ogrjevna vrijednost, DOV - donja ogrjevna vrijednost; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Na temelju analize ogrjevnosti peleta utvrđene su statistički značajne razlike između svih analiziranih skupina. Pelet HRA imao je najveću GOV (19,15 MJ kg⁻¹) i DOV (17,67 MJ kg⁻¹), dok je pelet SUN imao najmanje vrijednosti oba parametra, GOV (17,08 MJ kg⁻¹) i DOV (15,67 MJ kg⁻¹). Peleti SOJ, KUK i PŠE nalazili su se u srednjem rasponu vrijednosti, pri čemu se pelet SOJ blago izdvajao s nešto većim ogrjevnim vrijednostima. Rezultati također pokazuju povezanost između H/C i O/C omjera i ogrjevnosti peleta. Pelet SUN, koji je imao najveći O/C omjer, pokazao je najnižu ogrjevnost, što je u skladu s očekivanjima.

4.4.7. Mehanička svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Mehanička svojstva važna su za procjenu sposobnosti peleta da izdrže rukovanje, transport i skladištenje, odnosno određuju njihovu otpornost na deformacije, lomljenje i raspadanje tijekom primjene. U istraživanju su određeni MI i TČ u radijalnom smjeru, a dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 53.

Tablica 53. MI (%) i TČ (MPa) peleta od pojedinačnih biomasa

Pelet	Vrsta	MI	TČ
	HRA	98,89±0,13 ^b	10,89±1,19 ^c
	KUK	98,25±0,01 ^a	8,25±0,73 ^b
	SOJ	99,46±0,06 ^d	6,15±1,46 ^a
	PŠE	99,12±0,07 ^c	5,63±1,13 ^a
	SUN	99,43±0,01 ^d	7,87±0,81 ^b
Prosječna vrijednost		99,03	7,76
Minimalno		98,25	5,63
Maksimalno		99,46	10,89
Statistička značajnost		*	*

MI - mehanička izdržljivost, TČ - tlačna čvrstoća; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza mehaničkih svojstava peleta pokazala je statistički značajne razlike za oba analizirana svojstva. Najveću MI imao je pelet SOJ (99,46%), dok je najmanju imao pelet KUK (98,25%). Najveću TČ imao je pelet HRA (10,89 MPa), a najmanju pelet PŠE (5,63 MPa). Vrijednosti TČ peleta KUK i SUN bile su u srednjem rasponu u odnosu na ostale analizirane uzorke.

4.5. Analiza svojstava peleta od mješavina biomase

Tijekom istraživanja posebna pažnja posvećena je ispitivanju mogućnosti proizvodnje peleta od mješavina biomase hrasta i poljoprivrednih ostataka stabljika kukuruza i suncokreta te slame soje i pšenice u tri različita masena omjera (75:25, 50:50 i 25:75). Kako bi se procijenila prikladnost proizvedenih peleta za energetske primjene, analizirana su njihova fizikalno-kemijska i mehanička svojstva, elementarni, kemijski i mineralni sastav te ogrjevna vrijednost.

4.5.1. Fizikalno-kemijska svojstva peleta od mješavina biomase

Analiza fizikalno-kemijskih svojstava peleta proizvedenih od mješavina biomase obuhvatila je određivanje PG, NG te udjela vlage, pepela, koksa, C_{fix} i HT. Prije određivanja gustoće peletima su određeni promjer, duljina, masa i volumen (tablica 54).

Tablica 54. Promjer, duljina, masa i volumen peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Promjer (mm)	Duljina (mm)	Masa (g)	Volumen (cm ³)
	HRA+PŠE	1	6,13	23,17	0,86	0,68
		2	6,24	22,65	0,81	0,69
		3	6,19	22,78	0,83	0,68
	HRA+KUK	1	6,07	23,87	0,83	0,69
		2	6,04	23,22	0,82	0,66
		3	6,13	23,68	0,83	0,70
	HRA+SUN	1	6,07	23,29	0,82	0,67
		2	6,14	22,95	0,82	0,70
		3	6,13	23,72	0,87	0,70
	HRA+SOJ	1	6,18	23,52	0,84	0,70
		2	6,22	23,23	0,83	0,71
		3	6,20	23,07	0,81	0,70
	Prosječna vrijednost		6,14	23,26	0,83	0,69
	Minimalno		6,04	22,65	0,81	0,66
	Maksimalno		6,24	23,87	0,87	0,71

Analiza fizikalnih svojstava peleta proizvedenih od mješavina biomase pokazala je da se promjer peleta kretao u uskom rasponu od 6,04 do 6,24 mm, dok je prosječna duljina peleta iznosila 23,26 mm. Masa peleta bila je između 0,81 i 0,87 g, a volumen između 0,66 i 0,71 cm³. Dobiveni rezultati pokazuju da je moguće proizvesti pelete ujednačenih dimenzija i mase,

neovisno o udjelu pojedine biomase u mješavini. U tablici 55 prikazane su vrijednosti PG i NG peleta proizvedenih od mješavina biomase.

Tablica 55. PG i NG peleta od mješavina biomase (kg/m³)

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	PG	NG
	HRA+PŠE	1	1225,58±47,35 ^d	693,38±1,07 ^a
		2	1167,64±36,52 ^a	668,57±2,71 ^d
		3	1211,53±30,94 ^{abcd}	698,90±3,01^{bcd}
	HRA+KUK	1	1202,64±37,31 ^{abc}	668,37±4,22 ^d
		2	1234,06±29,86^{cd}	687,57±0,90 ^d
		3	1194,27±104,36 ^{abc}	679,07±2,43 ^d
	HRA+SUN	1	1211,91±21,39 ^{abcd}	685,13±2,60 ^d
		2	1179,57±34,48 ^{ab}	659,40±2,21 ^d
		3	1218,85±26,59 ^{cd}	672,10±1,53 ^{bcd}
	HRA+SOJ	1	1188,16±37,17 ^{ab}	669,53±1,75 ^d
		2	1171,47±29,74 ^a	675,23±1,46 ^d
		3	1160,50±45,85^a	647,73±1,39^{cd}
Prosječna vrijednost			1197,18	675,42
Minimalno			1160,50	647,73
Maksimalno			1234,06	698,90
Statistička značajnost			*	*

PG - pojedinačna gustoća, NG - nasipna gustoća; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza PG i NG peleta proizvedenih od mješavina biomase pokazala je da je najmanju PG imao pelet HRA+SOJ3 (1160,50 kg/m³), a najveću pelet HRA+KUK2 (1234,06 kg/m³). Najmanju NG imao je pelet HRA+SOJ3 (647,73 kg/m³), dok je najveću imao pelet HRA+PŠE3 (698,90 kg/m³). Statistička analiza potvrdila je značajne razlike u PG i NG između skupina peleta, što upućuje na značajan utjecaj sastava mješavine na fizikalna svojstva peleta, posebno ona važna za skladištenje i transport.

Udio vlage, pepela, koksa, C_{fix} i HT prikazan je u tablici 56.

Tablica 56. Udio vlage, pepela, C_{fix}, koksa i HT (%) u peletima od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Vlaga	Pepeo	C _{fix}	Koks	HT
	HRA+PŠE	1	8,57 ±0,02 ^b	1,67 ±0,07 ^d	12,32 ±0,12 ^a	14,46 ±0,20 ^{bc}	79,62 ±0,10 ^b
		2	8,66 ±0,01 ^b	2,88 ±0,02 ^h	10,60 ±5,09 ^{cdef}	14,77 ±0,69 ^{bcde}	77,86 ±0,64 ^b
		3	8,67 ±0,08 ^b	4,27 ±0,04 ⁱ	9,59 ±0,05 ^{cdefgh}	15,17 ±0,05 ^{bcde}	77,47 ±0,05 ^b
	HRA+KUK	1	9,45 ±0,02 ^b	0,91 ±0,02 ^a	11,88 ±0,17 ^a	14,15 ±0,19 ^b	79,30 ±0,17 ^b
		2	9,69 ±0,03 ^b	1,65 ±0,08 ^c	11,12 ±4,63 ^{abc}	14,44 ±0,57 ^b	78,87 ±0,51 ^b
		3	10,70 ±0,02 ^a	2,24 ±0,03 ^{fg}	10,75 ±0,16 ^{ab}	14,55 ±0,18 ^{abcd}	76,31 ±0,16 ^b
	HRA+SUN	1	9,04 ±0,32 ^b	3,11 ±0,03 ⁱ	10,54 ±0,49 ^{abcd}	15,31 ±5,72 ^a	81,12 ±42,05 ^b
		2	9,12 ±0,47 ^b	5,71 ±0,17 ^k	8,86 ±0,65 ^{cdefg}	16,03 ±0,57 ^{bcdefg}	76,31 ±0,52 ^b
		3	9,39 ±0,05 ^b	8,99 ±0,12 ^m	7,31 ±0,37 ^{bcde}	17,99 ±0,40 ^{defgh}	74,31 ±0,31 ^b
	HRA+SOJ	1	9,01 ±0,04 ^a	1,08 ±0,03 ^b	12,79 ±0,54 ^{efghi}	15,58 ±0,60 ^{bcdef}	75,65 ±0,54 ^b
		2	9,12 ±0,01 ^a	1,73 ±0,02 ^d	11,38 ±0,06 ^{defghi}	14,58 ±0,06 ^{bcd}	76,78 ±0,06 ^b
		3	9,61 ±0,02 ^a	2,37 ±0,03 ^g	10,76 ±5,54 ^{abc}	14,69 ±0,39 ^{bcde}	76,26 ±0,35 ^b
	Prosječna vrijednost		9,25	3,05	10,66	15,14	77,49
	Minimalno		8,57	0,91	7,31	14,15	74,31
	Maksimalno		10,70	8,99	12,79	17,99	81,12
	Statistička značajnost		*	*	*	*	*

C_{fix} - fiksirani ugljik, HT - hlapljive tvari; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Temeljem analize utvrđene su statistički značajne razlike između svih skupina peleta. Najmanji udio vlage zabilježen je kod peleta HRA+PŠE1 (8,57%), a najveći kod peleta HRA+KUK3 (10,70%). Najmanji udio pepela imao je pelet HRA+KUK1 (0,91%), a najveći pelet HRA+SUN3 (8,99%). Pelet HRA+SUN3 imao je najmanji udio C_{fix} (7,31%), dok je najveći bio kod peleta HRA+SOJ1 (12,79%). Najmanji udio koksa imao je pelet HRA+KUK1 (14,15%), a najveći pelet HRA+SUN3 (17,99%). Najmanji udio HT imao je pelet HRA+SUN3 (74,31%), dok je najveći bio kod peleta HRA+SUN1 (81,12%).

4.5.2. Elementarni sastav peleta od mješavina biomase

Kao i kod peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa, elementarni sastav značajno utječe na energetska svojstva peleta od mješavina biomase. Udio C, H, N, O i S važan je za određivanje ogrjevnice vrijednosti i emisijskih svojstava tijekom izgaranja. Analizirane vrijednosti elementarnog sastava prikazane su u tablici 57.

Tablica 57. Udio C, H, N, O i S u peletima od mješavina biomase (%)

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	C	H	N	O	S
	HRA+PŠE	1	44,99 ±0,13 ^{ij}	6,27 ±0,01 ^{ab}	0,16 ±0,03 ^a	48,43 ±0,04 ^c	0,11 ±0,01 ^{ab}
		2	44,28 ±0,02 ^{fg}	6,28 ±0,01 ^{ab}	0,23 ±0,01 ^{bcd}	49,08 ±0,30 ^c	0,11 ±0,02 ^a
		3	43,53 ±0,02 ^{cde}	6,24 ±0,01 ^{ab}	0,29 ±0,03 ^{efg}	49,81 ±0,02 ^c	0,11 ±0,01 ^a
	HRA+KUK	1	44,81 ±0,07 ^{hi}	6,32 ±0,03 ^{ab}	0,21 ±0,02 ^b	48,55 ±0,05 ^c	0,12 ±0,02 ^a
		2	44,52 ±0,01 ^{gh}	6,33 ±0,02 ^{ab}	0,32 ±0,01 ^{cdef}	48,74 ±0,02 ^c	0,13 ±0,02 ^a
		3	43,39 ±0,04 ^{cd}	6,27 ±0,02 ^{ab}	0,44 ±0,02 ^h	49,87 ±0,02 ^c	0,14 ±0,03 ^a
	HRA+SUN	1	43,93 ±0,03 ^{ef}	6,23 ±0,01 ^{ab}	0,23 ±0,01 ^{efg}	49,43 ±0,03 ^c	0,13 ±0,01 ^a
		2	43,06 ±0,05 ^{cde}	6,10 ±0,42 ^{ab}	0,36 ±0,01 ^h	50,35 ±0,09 ^a	0,14 ±0,01 ^a
		3	42,23 ±0,09 ^b	6,10 ±0,04 ^{ab}	0,56 ±0,01 ⁱ	50,96 ±0,06 ^{ab}	0,16 ±0,03 ^{ab}
	HRA+SOJ	1	43,90 ±0,01 ^{ef}	6,15 ±0,02 ^{ab}	0,23 ±0,01 ^{bcd}	49,61 ±0,04 ^c	0,11 ±0,04 ^a
		2	43,37 ±0,02 ^{cd}	6,18 ±0,03 ^{ab}	0,35 ±0,03 ^h	50,00 ±0,08 ^{bc}	0,11 ±0,01 ^{ab}
		3	43,33 ±0,04 ^c	6,37 ±0,01 ^{ab}	0,49 ±0,01 ^{jk}	49,62 ±0,06 ^c	0,11 ±0,02 ^{ab}
	Prosječna vrijednost		43,78	6,24	0,32	49,54	0,12
	Minimalno		42,23	6,10	0,16	48,43	0,11
	Maksimalno		44,99	6,37	0,56	50,96	0,16
	Statistička značajnost		*	n.s.	*	*	*

C - ugljik, H - vodik, N - dušik, O - kisik, S - sumpor; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza elementarnog sastava pokazala je da statistički značajna razlika nije utvrđena samo kod udjela H. Najmanji udio C imao je pelet HRA+SUN3 (42,23%), dok je najveći bio kod peleta HRA+PŠE1 (44,99%). Kod H najmanji udio imao je pelet HRA+SUN3 (6,10%), a najveći pelet HRA+SOJ3 (6,37%). Najmanji udio N utvrđen je kod peleta HRA+PŠE1 (0,16%), dok je najveći imao pelet HRA+SUN3 (0,56%). Najmanji udio O imao je pelet HRA+PŠE1 (48,43%),

a najveći pelet HRA+SUN3 (50,96%). Najmanji udio S (0,11%) utvrđen je kod svih mješavina peleta HRA+PŠE i HRA+SOJ, dok je najveći zabilježen kod pelet HRA+SUN3 (0,16%).

4.5.3. H/C i O/C omjeri peleta od mješavina biomase

U tablici 58 prikazani su H/C i O/C omjeri peleta proizvedenih od mješavina biomase.

Tablica 58. H/C i O/C omjeri peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	H/C	O/C
	HRA+PŠE	1	1,66	0,81
		2	1,69	0,83
		3	1,71	0,86
	HRA+KUK	1	1,68	0,81
		2	1,69	0,82
		3	1,72	0,86
	HRA+SUN	1	1,69	0,84
		2	1,69	0,88
		3	1,72	0,91
	HRA+SOJ	1	1,67	0,85
		2	1,70	0,87
		3	1,75	0,86
	Prosječna vrijednost		1,70	0,85
	Minimalno		1,66	0,81
	Maksimalno		1,75	0,91

H/C - omjer vodika i ugljika, O/C - omjer kisika i ugljika

Najmanji H/C omjer imao je pelet HRA+PŠE1 (1,66), a najveći pelet HRA+SOJ3 (1,75). Peleti HRA+PŠE1 i HRA+KUK1 imali su najmanji O/C omjer (0,81), dok je najveći zabilježen kod peleta HRA+SUN3 (0,91). Prosječne vrijednosti H/C (1,70) i O/C (0,85) omjera bile su slične vrijednostima utvrđenima za pojedinačne skupine peleta, što upućuje na to da miješanje biomase ne uzrokuje veće promjene navedenih omjera.

4.5.4. Kemijski sastav peleta od mješavina biomase

Kemijski sastav peleta izravno utječe na njihova energetska svojstva i proces izgaranja. Analiza je obuhvatila određivanje udjela celuloze, lignina, hemiceluloze i ET, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 59.

Tablica 59. Udio celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u peletima od mješavina biomase (%)

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Celuloza	Lignin	Hemiceluloza	ET
	HRA+PŠE	1	46,38 ±0,22 ^a	25,23 ±0,20 ^d	18,35 ±0,17 ^a	8,28 ±0,35 ^{mn}
		2	44,56 ±0,41 ^a	23,42 ±0,19 ^d	18,82 ±0,32 ^a	7,99 ±0,08 ^{klm}
		3	44,58 ±0,55 ^a	21,38 ±0,76 ^{bc}	19,03 ±0,31 ^a	7,31 ±0,21 ^{ijk}
	HRA+KUK	1	49,45 ±0,24 ^a	22,48 ±0,32 ^{cd}	19,57 ±0,36 ^a	8,18 ±0,50 ^{ikl}
		2	48,29 ±0,36 ^a	20,66 ±0,24 ^a	19,88 ±0,36 ^a	7,78 ±0,29 ^{ij}
		3	47,55 ±0,25 ^a	19,85 ±0,04 ^{cd}	19,72 ±0,21 ^a	8,08 ±0,23 ^{mn}
	HRA+SUN	1	46,28 ±0,34 ^a	23,63 ±0,26 ^{cd}	17,82 ±0,22 ^a	8,04 ±0,23 ⁱ
		2	45,96 ±0,46 ^a	22,05 ±0,29 ^{cd}	17,44 ±15,26 ^a	7,48 ±0,11 ^{gh}
		3	45,55 ±0,25 ^a	20,67 ±0,36 ^a	17,25 ±0,43 ^a	6,72 ±0,04 ^{ij}
	HRA+SOJ	1	48,51 ±0,29 ^a	24,21 ±0,24 ^{cd}	16,94 ±0,37 ^a	9,17 ±0,21 ^o
		2	49,74 ±0,45 ^a	21,91 ±0,09 ^{cd}	18,23 ±0,19 ^a	8,40 ±0,09 ⁿ
		3	49,65 ±0,25 ^a	21,21 ±0,33 ^{cd}	21,56 ±0,17 ^a	7,14 ±0,07 ^{efg}
	Prosječna vrijednost		47,21	22,23	18,72	7,88
	Minimalno		44,56	19,85	16,94	6,72
	Maksimalno		49,74	25,23	21,56	9,17
	Statistička značajnost		n.s.	*	*	*

ET - ekstraktivne tvari; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza kemijskog sastava pokazala je da statistički značajna razlika nije utvrđena samo kod udjela celuloze. Najveći udio celuloze imao je pelet HRA+SOJ2 (49,74%), dok je najmanji bio kod peleta HRA+PŠE2 (44,56%). Najveći udio lignina imao je pelet HRA+PŠE1 (25,23%), a najmanji pelet HRA+KUK3 (19,85%). Kod hemiceluloze najveći udio imao je pelet HRA+SOJ3 (21,56%), dok je najmanji bio kod peleta HRA+SOJ1 (16,94%). Najmanji udio ET imao je pelet HRA+SUN3 (6,72%), a najveći pelet HRA+SOJ1 (9,17%).

4.5.5. Mineralni sastav peleta od mješavina biomase

Energetska svojstva peleta i proces izgaranja izravno su povezani s njihovim mineralnim sastavom, koji može utjecati na pojavu taloženja, korozije i drugih neželjenih procesa u sustavima za izgaranje. U okviru istraživanja provedena je analiza sadržaja mikro- i makroelemenata u peletima proizvedenima od mješavina biomase.

Od makroelemenata analizirani su Fe, Ca, K, Na i Mg. Sadržaj Mg nije utvrđen ni u jednoj skupini peleta jer su njegove vrijednosti bile ispod granice detekcije metode. Vrijednosti analiziranih makroelemenata prikazane su u tablici 60.

Tablica 60. Sadržaj Fe, Ca, K i Na u peletima od mješavina biomase (mg/kg)

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Fe	Ca	K	Na
	HRA+PŠE	1	63,64 ±2,24 ^{abc}	928,02 ±504,99 ^a	2243,79 ±0,29 ^a	102,35 ±82,36 ^a
		2	78,99 ±34,11 ^{abc}	1325,67 ±71,85 ^{ab}	4379,16 ±32,19 ^{abc}	123,18 ±23,87 ^a
		3	99,57 ±5,21 ^{abc}	1811,86 ±43,48 ^{ab}	7098,05 ±49,04 ^a	148,86 ±48,90 ^a
	HRA+KUK	1	125,97 ±4,00 ^{abcd}	706,92 ±307,83 ^a	498,39 ±38,84 ^a	131,58 ±52,96 ^a
		2	198,69 ±7,02 ^{bcd}	810,29 ±427,49 ^a	803,73 ±2,79 ^a	160,68 ±15,35 ^a
		3	286,38 ±9,81 ^d	1087,92 ±620,94 ^a	1079,85 ±1,69 ^a	188,98 ±9,54 ^a
	HRA+SUN	1	94,64 ±2,80 ^{abc}	795,63 ±183,69 ^{bc}	6698,74 ±3344,80 ^{abc}	165,37 ±114,47 ^a
		2	120,34 ±62,54 ^{abc}	1103,28 ±2904,67 ^{ab}	12480,68 ±6485,70 ^{bcd}	220,74 ±199,99 ^a
		3	182,42 ±9,06 ^{cd}	1395,98 ±973,29 ^{ab}	14458,67 ±119,71 ^{de}	283,71 ±120,58 ^a
	HRA+SOJ	1	71,50 ±6,17 ^{abc}	1289,93 ±91,79 ^{ab}	230,93 ±134,40 ^a	123,07 ±75,18 ^a
		2	63,76 ±4,82 ^{abc}	2158,37 ±1079,49 ^{ab}	1839,74 ±14,99 ^{ab}	149,43 ±110,11 ^a
		3	73,82 ±9,37 ^{abc}	2995,63 ±36,21 ^{ab}	2568,02 ±26,73 ^{abc}	177,75 ±15,67 ^a
	Prosječna vrijednost		121,64	1367,46	4598,60	164,64
	Minimalno		63,64	706,92	498,39	102,35
	Maksimalno		286,38	2995,63	14458,67	283,71
	Statistička značajnost		*	*	*	n.s.

Fe - željezo, Ca - kalcij, K - kalij, Na - natrij; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Kod analize makroelemenata utvrđene su statistički značajne razlike za sve analizirane elemente osim Na. Najmanji sadržaj Fe imao je pelet HRA+PŠE1 (63,64 mg/kg), dok je najveći bio u peletu HRA+KUK3 (286,38 mg/kg). Najveći sadržaj Ca imao je pelet HRA+SOJ3 (2995,63 mg/kg), a najmanji pelet HRA+KUK1 (706,92 mg/kg). Pelet HRA+SUN3 imao je najveći sadržaj K (14 458,67 mg/kg), dok je najmanji bio u peletu HRA+KUK1 (498,39 mg/kg). Najmanji sadržaj Na imao je pelet HRA+PŠE1 (102,35 mg/kg), a najveći pelet HRA+SUN3 (283,71 mg/kg).

Od mikroelemenata analizirani su Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb i Zn, pri čemu sadržaj Cd, Co, Cr, Pb i Zn nije utvrđen ni u jednoj skupini peleta jer su njihove vrijednosti bile ispod granice detekcije metode. Vrijednosti analiziranih mikroelemenata prikazane su u tablici 61.

Tablica 61. Sadržaj Mn, Ni i Cu u peletima od mješavina biomase (mg/kg)

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Mn	Ni	Cu
	HRA+PŠE	1	26,42 ±0,51 ^{efghi}	1,55 ±0,04 ^{bcde}	3,13 ±0,63 ^{abcd}
		2	35,25 ±1,06 ^{ij}	1,82 ±0,40 ^{abc}	2,88 ±0,35 ^{abcde}
		3	44,64 ±0,44 ^j	2,07 ±0,68 ^{cdef}	2,53 ±0,24 ^{abcd}
	HRA+KUK	1	19,90 ±10,21 ^{abcd}	2,15 ±1,24 ^g	3,58 ±0,15 ^{abcd}
		2	22,74 ±0,01 ^{cdefgh}	3,03 ±0,52 ^{abcde}	3,95 ±0,18 ^{bcde}
		3	29,34 ±0,21 ^{hi}	3,96 ±0,98 ^{fg}	4,21 ±0,33 ^{def}
	HRA+SUN	1	16,37 ±0,12 ^{bcdef}	1,73 ±0,13 ^{cdef}	4,98 ±0,18 ^{ef}
		2	15,65 ±0,53 ^{bcdef}	2,03 ±0,29 ^{cdef}	6,33 ±0,49 ^f
		3	20,83 ±10,96 ^{ab}	2,45 ±0,52 ^{cdef}	7,82 ±0,34 ^g
	HRA+SOJ	1	13,21 ±0,35 ^{abc}	2,18 ±0,04 ^{bcde}	3,38 ±0,08 ^{abc}
		2	11,16 ±0,01 ^{ab}	3,26 ±0,26 ^{efg}	3,44 ±0,02 ^{bcde}
		3	10,55 ±5,23 ^{ab}	3,78 ±0,76 ^{defg}	3,57 ±0,03 ^{cde}
	Prosječna vrijednost		22,17	2,50	4,15
	Minimalno		10,55	1,55	2,53
	Maksimalno		44,64	3,96	7,82
	Statistička značajnost		*	*	*

Mn - mangan, Ni - nikl, Cu - bakar; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Kod mikroelemenata utvrđene su statistički značajne razlike između svih analiziranih elemenata. Najmanji sadržaj Mn imao je pelet HRA+SOJ3 (10,55 mg/kg), dok je najveći imao pelet HRA+PŠE3 (44,64 mg/kg). Najmanji sadržaj Ni zabilježen je kod peleta HRA+PŠE1 (1,55 mg/kg), a najveći kod peleta HRA+KUK3 (3,96 mg/kg). Najmanji sadržaj Cu imao je pelet HRA+PŠE3 (2,53 mg/kg), dok je najveći bio kod peleta HRA+SUN3 (7,82 mg/kg).

4.5.6. Ogrjevna vrijednost peleta od mješavina biomase

Ogrjevna vrijednost peleta, posebno onih proizvedenih od mješavina biomase, važan je pokazatelj njihove energetske učinkovitosti i prikladnosti za primjenu u sustavima izgaranja. U tablici 62 prikazane su vrijednosti GOV i DOV analiziranih peleta.

Tablica 62. GOV i DOV peleta od mješavina biomase (MJ kg⁻¹)

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	GOV	DOV
	HRA+PŠE	1	18,89±0,06 ^{bcd}	17,39±0,06 ^{hi}
		2	18,63±0,15 ^{bcd}	17,12±0,02 ^{efgh}
		3	18,42±0,01 ^{bcde}	16,93±0,01 ^{cdefg}
	HRA+KUK	1	18,81±0,35 ^{bcde}	17,28±0,04 ^{fgh}
		2	18,84±0,32 ^{cdef}	17,31±0,05 ^{efgh}
		3	18,59±0,01 ^{defg}	17,05±0,01 ^{cd}
	HRA+SUN	1	18,27±0,08 ^{efgh}	16,78±0,08 ^{cd}
		2	17,99±0,01 ^{fgh}	16,53±0,06 ^c
		3	17,43±0,01^{fgh}	15,96±0,01^a
	HRA+SOJ	1	19,08±0,27^{fgh}	17,60±0,06^{ghi}
		2	18,77±0,01 ^{fgh}	17,27±0,01 ^{defg}
		3	18,70±0,01 ^{fgh}	17,15±0,01 ^{cde}
Prosječna vrijednost			18,53	17,03
Minimalno			17,43	15,96
Maksimalno			19,08	17,60
Statistička značajnost			*	*

GOV - gornja ogrjevna vrijednost, DOV - donja ogrjevna vrijednost; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Obje ogrjevnne vrijednosti pokazale su statistički značajne razlike između analiziranih skupina peleta. Najveću GOV imao je pelet HRA+SOJ1 (19,08 MJ kg⁻¹), dok je najmanju imao pelet HRA+SUN3 (17,43 MJ kg⁻¹). Isti trend zabilježen je i kod DOV, pri čemu je najveću vrijednost imao pelet HRA+SOJ1 (17,60 MJ kg⁻¹), a najmanju pelet HRA+SUN3 (15,96 MJ kg⁻¹). H/C i O/C omjeri peleta potvrđuju rezultate ogrjevnih vrijednosti, pri čemu su manji O/C i veći H/C omjeri uglavnom povezani s većim vrijednostima GOV i DOV.

4.5.7. Mehanička svojstva peleta od mješavina biomase

Kao i kod peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa, mehanička svojstva peleta od njihovih mješavina važna su za procjenu otpornosti na fizička oštećenja i vanjske utjecaje tijekom rukovanja i skladištenja. U istraživanju su određene srednje vrijednosti MI i TČ u radijalnom smjeru, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 63.

Tablica 63. MI (%) i TČ (MPa) peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	MI	TČ
	HRA+PŠE	1	98,23±0,03 ^{bcd}	6,59±1,79 ^{bcd}
		2	96,84±0,08 ^b	4,47±0,80 ^a
		3	96,21±0,11^a	4,31±0,58^a
	HRA+KUK	1	98,68±0,04 ^{bcd}	7,73±0,96^f
		2	97,60±0,06 ^{bc}	7,33±1,48 ^{ef}
		3	98,87±0,05 ^{bcd}	7,20±1,72 ^{def}
	HRA+SUN	1	99,28±0,02^{cd}	6,71±0,87 ^{cdef}
		2	98,37±0,05 ^{bcd}	6,38±0,83 ^{bcd}
		3	97,02±0,12 ^{bc}	5,38±0,56 ^{bc}
	HRA+SOJ	1	98,77±1,75 ^e	6,59±1,37 ^{bcd}
		2	99,01±1,46 ^f	5,53±0,95 ^{bc}
		3	97,70±1,39 ^d	5,30±1,42 ^b
	Prosječna vrijednost		98,05	6,13
	Minimalno		96,21	4,31
	Maksimalno		99,28	7,73
	Statistička značajnost		*	*

MI - mehanička izdržljivost, TČ - tlačna čvrstoća; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Analiza mehaničkih svojstava pokazala je statistički značajne razlike kod oba analizirana parametra. Najveću MI imao je pelet HRA+SUN1 (99,28%), dok je najmanja zabilježena kod peleta HRA+PŠE3 (96,21%). Kod TČ najveću vrijednost imao je pelet HRA+KUK1 (7,73 MPa), a najmanju pelet HRA+PŠE3 (4,31 MPa). Dobiveni rezultati upućuju na značajan utjecaj sastava i udjela sirovine u mješavini na mehanička svojstva proizvedenih peleta.

4.6. Ponderirani proračun analiziranih svojstava peleta od mješavina biomase

Zbog ograničene dostupnosti podataka u literaturi o energetske svojstvima peleta proizvedenih od mješavina biomase, teorijske vrijednosti određene su primjenom ponderiranog proračuna temeljenog na masenim udjelima pojedinačnih biomasa. Usporedbom teorijskih i analiziranih vrijednosti izračunate su apsolutne razlike i relativne postotne pogreške. Detaljna analiza dobivenih odstupanja, uključujući moguću pojavu sinergijskih i antagonističkih učinaka, prikazana je u poglavlju Rasprava.

4.6.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava peleta od mješavina biomase

U tablici 64 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za PG, NG, udjele vlage i pepela u peletima proizvedenim od mješavina biomase.

Tablica 64. Ponderirani proračun ΔY i $\%E$ za PG, NG, udjele vlage i pepela u peletima od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	PG		NG		Vlaga		Pepeo	
			ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$
	HRA+PŠE	1	-22,19	1,78	9,77	1,43	0,38	4,67	-0,11	5,92
		2	-71,99	5,81	-11,31	1,66	0,34	4,02	-0,45	13,51
		3	-19,96	1,62	22,75	3,36	0,21	2,45	-0,62	12,59
	HRA+KUK	1	-58,68	4,65	-17,78	2,59	0,76	8,81	-0,10	9,90
		2	-32,68	2,58	2,61	0,38	0,37	3,97	-0,15	8,33
		3	-77,90	6,12	-4,71	0,69	0,74	7,48	-0,35	13,51
	HRA+SUN	1	-56,41	4,45	-1,51	0,22	0,45	5,21	-0,13	3,94
		2	-101,16	7,90	-26,55	3,87	-0,02	0,16	-0,55	8,71
		3	-74,30	5,75	-13,16	1,92	-0,29	2,97	-0,28	3,05
	HRA+SOJ	1	-56,27	4,52	-18,94	2,75	0,34	3,95	0,06	5,37
		2	-61,50	4,99	-14,39	2,09	-0,17	1,78	-0,10	5,46
		3	-61,01	4,99	-43,03	6,23	-0,29	2,95	-0,27	10,06

PG - pojedinačna gustoća, NG - nasipna gustoća, ΔY - apsolutna razlika, $\%E$ - relativna postotna pogreška

U tablici 65 prikazane su vrijednosti ΔY i $\%E$ za udjele C_{fix} , koksa i HT.

Tablica 65. Ponderirani proračun ΔY i $\%E$ za udjele C_{fix} , koksa i HT u peletima od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	C_{fix}		Koks		HT	
			ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$
	HRA+PŠE	1	0,24	2,03	-0,62	4,14	1,66	2,13
		2	-0,15	1,40	-0,59	3,84	0,27	0,34
		3	0,16	1,75	-0,47	2,97	0,24	0,31
	HRA+KUK	1	-0,86	6,77	-0,91	6,06	1,74	2,24
		2	-0,97	7,99	-0,88	5,71	2,08	2,70
		3	-0,68	5,93	-1,02	6,54	0,28	0,37
	HRA+SUN	1	-1,01	8,74	-0,89	5,49	4,50	5,87
		2	-0,84	8,66	-1,56	8,87	1,40	1,87
		3	-0,54	6,88	-0,99	5,22	1,11	1,52
	HRA+SOJ	1	0,20	1,59	0,67	4,53	-2,07	2,66
		2	-0,40	3,40	-0,42	2,80	-0,32	0,42
		3	-0,21	1,91	-0,41	2,68	-0,23	0,30

C_{fix} - fiksirani ugljik, HT - hlapljive tvari, ΔY - apsolutna razlika, $\%E$ - relativna postotna pogreška

4.6.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava peleta od mješavina biomase

U tablici 66 prikazane su vrijednosti ΔY i $\%E$ za udjele C, H i N u peletima proizvedenim od mješavina biomase.

Tablica 66. Ponderirani proračun ΔY i $\%E$ za udjele C, H i N u peletima od mješavina biomase

	Vrsta	Omjer	C		H		N	
			ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$
Pelet mješavina	HRA+PŠE	1	0,39	0,87	0,07	1,13	-0,01	5,88
		2	0,61	1,39	0,11	1,78	-0,01	4,17
		3	0,78	1,83	0,10	1,63	-0,02	6,45
	HRA+KUK	1	0,02	0,04	0,10	1,57	-0,01	4,55
		2	0,47	1,06	0,12	1,85	-0,02	5,88
		3	0,07	0,17	0,06	1,01	-0,02	4,35
	HRA+SUN	1	-0,14	0,31	0,12	1,92	-0,02	7,07
		2	0,45	1,07	0,11	1,77	-0,04	8,86
		3	1,09	2,64	0,22	3,80	0,02	3,23
	HRA+SOJ	1	-0,87	1,94	-0,10	1,56	0,01	2,22
		2	-0,64	1,45	-0,09	1,36	0,00	0,00
		3	0,08	0,18	0,09	1,39	0,02	3,16

C - ugljik, H - vodik, N - dušik, ΔY - apsolutna razlika, $\%E$ - relativna postotna pogreška

U tablici 67 prikazane su vrijednosti ΔY i $\%E$ za udjele O i S u peletima proizvedenim od mješavina biomase.

Tablica 67. Ponderirani proračun ΔY i $\%E$ za udjele O i S u peletima od mješavina biomase

	Vrsta	Omjer	O		S	
			ΔY	$\%E$	ΔY	$\%E$
Pelet mješavina	HRA+PŠE	1	-0,50	1,01	0,01	7,80
		2	-0,73	1,47	0,01	6,76
		3	-0,88	1,75	0,01	5,86
	HRA+KUK	1	-0,11	0,22	0,01	9,09
		2	-0,53	1,09	0,01	8,25
		3	-0,02	0,05	0,01	6,54
	HRA+SUN	1	0,02	0,05	0,01	6,12
		2	-0,42	0,83	0,00	1,52
		3	-1,18	2,25	0,00	2,51
	HRA+SOJ	1	0,95	1,96	0,01	8,49
		2	0,73	1,48	0,01	6,76
		3	-0,27	0,53	0,01	6,70

O - kisik, S - sumpor, ΔY - apsolutna razlika, $\%E$ - relativna postotna pogreška

4.6.3. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera peleta od mješavina biomase

U tablici 68 prikazane su vrijednosti ΔY i $\%E$ za H/C i O/C omjere peleta proizvedenih od mješavina biomase.

Tablica 68. Ponderirani proračun ΔY i %E za H/C i O/C omjere peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	H/C		O/C	
			ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	0,00	0,19	-0,02	2,04
		2	0,00	0,29	-0,03	3,24
		3	0,00	0,26	-0,04	4,02
	HRA+KUK	1	0,02	1,39	0,00	0,20
		2	0,01	0,55	-0,02	2,16
		3	0,01	0,55	0,00	0,25
	HRA+SUN	1	0,04	2,26	0,00	0,03
		2	0,01	0,78	-0,02	2,46
		3	0,02	1,40	-0,05	5,14
	HRA+SOJ	1	0,00	0,26	0,03	4,10
		2	0,00	0,12	0,03	3,04
		3	0,02	0,96	-0,01	0,61

H/C - omjer vodika i ugljika, O/C - omjer kisika i ugljika, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.6.4. Ponderirani proračun kemijskog sastava peleta od mješavina biomase

U tablici 69 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za udjele celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u peletima proizvedenim od mješavina biomase.

Tablica 69. Ponderirani proračun ΔY i %E za udjele celuloze, lignina, hemiceluloze i ET u peletima od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Celuloza		Lignin		Hemiceluloza		ET	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	-2,50	5,10	2,04	8,79	1,41	8,29	-0,93	10,12
		2	-4,08	8,39	1,16	5,19	1,75	10,25	-0,71	8,11
		3	-3,83	7,90	0,04	0,20	1,84	10,67	-0,87	10,61
	HRA+KUK	1	-0,28	0,57	-0,12	0,52	1,98	11,22	-0,88	9,74
		2	-2,07	4,11	-0,42	1,97	1,51	8,22	-0,61	7,33
		3	-3,44	6,74	0,30	1,52	0,57	3,00	0,35	4,56
	HRA+SUN	1	-2,51	5,15	0,83	3,65	1,07	6,39	-0,99	10,96
		2	-2,52	5,20	0,57	2,68	0,76	4,56	-0,85	10,20
		3	-2,62	5,43	0,52	2,57	0,64	3,85	-0,91	11,93
	HRA+SOJ	1	-0,33	0,68	1,08	4,66	-1,32	7,23	0,43	4,92
		2	1,17	2,41	-0,24	1,06	-1,47	7,46	0,65	8,39
		3	1,35	2,80	0,05	0,25	0,42	1,99	0,38	5,62

ET - ekstraktivne tvari, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.6.5. Ponderirani proračun mineralnog sastava peleta od mješavina biomase

U tablici 70 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za sadržaj makroelemenata Fe, Ca, K i Na u peletima proizvedenim od mješavina biomase.

Tablica 70. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Fe, Ca, K i Na u peletima od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Fe		Ca		K		Na	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	-3,63	5,40	-141,89	13,26	-161,89	6,73	-12,86	11,16
		2	-9,08	10,31	-296,94	18,30	-173,23	3,81	-20,44	14,23
		3	-9,30	8,54	-363,44	16,71	398,96	5,96	-23,17	13,47
	HRA+KUK	1	-17,14	11,98	-53,35	7,02	-85,49	14,64	17,92	15,77
		2	-41,06	17,13	-193,05	19,24	-105,05	11,56	20,17	14,35
		3	-50,01	14,87	-158,48	12,71	-153,82	12,47	21,61	12,91
	HRA+SUN	1	9,24	10,82	-23,69	2,89	927,63	16,07	28,30	20,64
		2	-3,99	3,21	-18,14	1,62	1197,44	10,61	33,40	17,83
		3	19,17	11,74	-27,54	1,93	-2336,70	13,91	46,09	19,40
	HRA+SOJ	1	10,33	16,89	-213,92	14,22	-28,31	2,66	35,48	32,93
		2	-12,11	15,96	-332,12	13,34	-26,61	1,43	40,76	31,67
		3	-16,75	18,49	-481,49	13,85	-102,01	3,82	48,14	32,17

Fe - željezo, Ca - kalcij, K - kalij, Na – natrij; ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

U tablici 71 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za sadržaj mikroelemenata Mn, Ni i Cu u peletima od mješavina biomase.

Tablica 71. Ponderirani proračun ΔY i %E za sadržaj Mn, Ni i Cu u peletima od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	Mn		Ni		Cu	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	0,95	3,73	-0,15	8,96	-0,50	13,66
		2	-1,19	3,27	-0,16	7,85	-0,41	12,46
		3	-2,77	5,84	-0,18	7,90	-0,43	14,38
	HRA+KUK	1	-0,74	3,57	-0,23	9,66	-0,67	15,81
		2	-4,04	15,07	-0,30	9,01	-0,60	13,09
		3	-3,57	10,85	-0,32	7,48	-0,63	12,97
	HRA+SUN	1	0,71	4,53	-0,08	4,16	-0,65	11,55
		2	-1,17	6,96	-0,15	6,88	-0,97	13,29
		3	2,85	15,85	-0,11	4,11	-1,15	12,82
	HRA+SOJ	1	-0,44	3,21	-0,05	2,35	-0,61	15,29
		2	-1,64	12,78	0,23	7,41	-0,58	14,43
		3	-1,39	11,66	-0,06	1,50	-0,48	11,85

Mn - mangan, Ni - nikl, Cu - bakar, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.6.6. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti peleta od mješavina biomase

U tablici 72 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za GOV i DOV peleta od mješavina biomase.

Tablica 72. Ponderirani proračun ΔY i %E za GOV i DOV peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	GOV		DOV	
			ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	0,03	0,17	0,01	0,05
		2	0,07	0,37	0,03	0,16
		3	0,14	0,79	0,12	0,71
	HRA+KUK	1	-0,14	0,74	-0,17	1,00
		2	0,09	0,48	0,06	0,36
		3	0,05	0,25	0,02	0,13
	HRA+SUN	1	-0,36	1,94	-0,39	2,29
		2	-0,12	0,69	-0,14	0,86
		3	-0,17	0,97	-0,21	1,31
	HRA+SOJ	1	0,08	0,44	0,09	0,52
		2	-0,08	0,43	-0,08	0,45
		3	0,00	0,02	-0,03	0,19

GOV - gornja ogrjevna vrijednost, DOV - donja ogrjevna vrijednost, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.6.7. Ponderirani proračun mehaničkih svojstava peleta od mješavina biomase

U tablici 73 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za MI i TČ peleta proizvedenih od mješavina biomase.

Tablica 73. Ponderirani proračun ΔY i %E za MI i TČ peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	MI		TČ	
			ΔY	%E	ΔY	%E
	HRA+PŠE	1	-0,72	0,73	-2,99	31,17
		2	-2,16	2,19	-3,79	45,88
		3	-2,85	2,88	-2,64	37,94
	HRA+KUK	1	-0,05	0,05	-2,50	24,44
		2	-0,97	0,98	-2,24	23,41
		3	0,46	0,47	-1,71	19,19
	HRA+SUN	1	0,25	0,26	-3,43	33,79
		2	-0,79	0,80	-3,00	31,98
		3	-2,28	2,29	-3,25	37,62
	HRA+SOJ	1	-0,26	0,27	-3,12	32,10
		2	-0,16	0,17	-2,99	35,09
		3	-1,62	1,63	-2,04	27,74

MI - mehanička izdržljivost, TČ - tlačna čvrstoća, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.7. Emisije dimnih plinova pri izgaranju skupina peleta

Emisije dimnih plinova tijekom izgaranja peleta povezane su s njihovim fizikalno-kemijskim, elementarnim, kemijskim, mineralnim i mehaničkim svojstvima te ogrjevnom vrijednošću,

prikazanima u prethodnim poglavljima. U ovom dijelu rada prikazani su rezultati mjerenja koncentracija plinovitih komponenti dimnih plinova: O₂, CO₂, CO, NO_x, NO, NO₂, SO₂ i H₂S nastalih izgaranjem 17 skupina proizvedenih peleta. Koncentracija H₂S nije utvrđena ni u jednoj skupini peleta.

4.7.1. Koncentracija dimnih plinova pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa

Analizator je koncentracije plinova CO, NO_x, NO, NO₂, SO₂ i H₂S mjerio kao volumne udjele (ppm), a zatim su preračunate u masene koncentracije izražene u mg/m³. Radi usporedbe rezultata s važećim regulatornim okvirom, za pelete proizvedene od pojedinačnih biomasa prikazane su dvije tablice. U tablici 74 prikazane su koncentracije dimnih plinova korigirane na referentni udio O₂ od 10% radi usporedbe s Uredbom Komisije (EU) 2015/1189.

Tablica 74. Masene koncentracije CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ (mg/m³; referentni udio O₂ 10%) pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa

Pelet	Vrsta	CO	NO _x	NO	NO ₂	SO ₂
	HRA	209,41 ±4,98 ^a	158,16 ±0,01 ^a	89,75 ±2,13 ^a	15,16 ±1,61 ^a	57,51 ±1,37 ^a
	KUK	343,77 ±11,33 ^b	483,85 ±18,03 ^b	298,63 ±9,84 ^b	29,03 ±2,34 ^b	170,10 ±5,61 ^b
	SOJ	237,49 ±3,42 ^a	621,72 ±13,77 ^c	390,95 ±7,06 ^c	25,11 ±1,72 ^b	174,78 ±3,16 ^b
	PŠE	347,06 ±12,99 ^b	468,34 ±4,66 ^b	283,36 ±1,66 ^b	31,21 ±3,52 ^b	189,14 ±1,11 ^b
	SUN	387,46 ±29,33 ^b	714,81 ±35,47 ^d	445,07 ±23,84 ^d	30,96 ±0,25 ^b	280,87 ±15,05 ^c
Prosječna vrijednost		305,04	489,38	301,55	26,29	174,48
Minimalno		209,41	158,16	89,75	15,16	57,51
Maksimalno		387,46	714,81	445,07	31,21	280,87
Statistička značajnost		*	*	*	*	*

CO - ugljikov monoksid, NO_x - dušikovi oksidi, NO - dušikov monoksid, NO₂ - dušikov dioksid, SO₂ - sumporov dioksid; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Dobiveni rezultati pokazali su statistički značajne razlike između svih skupina peleta, što upućuje na značajan utjecaj vrste biomase na emisije plinovitih produkata izgaranja. Najniže koncentracije svih analiziranih plinova utvrđene su kod peleta HRA: CO (209,41 mg/m³), NO_x (158,16 mg/m³), NO (89,75 mg/m³), NO₂ (15,16 mg/m³) i SO₂ (57,51 mg/m³). Najveće koncentracije CO (387,46 mg/m³), NO_x (714,81 mg/m³), NO (445,07 mg/m³) i SO₂ (280,87 mg/m³) izmjerene su kod peleta SUN, dok je najveća koncentracija NO₂ utvrđena kod peleta PŠE (31,21 mg/m³).

U tablici 75 prikazane su koncentracije navedenih plinova korigirane na referentni udio O₂ od 11% radi usporedbe s Uredbom o GVE onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 42/21).

Tablica 75. Masene koncentracije CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ (mg/m³; referentni udio O₂ 11%) pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa

Pelet	Vrsta	CO	NO _x	NO	NO ₂	SO ₂
	HRA	190,38 ±4,98 ^a	143,78 ±0,01 ^a	81,59 ±2,13 ^a	13,78 ±1,61 ^a	52,28 ±1,37 ^a
	KUK	312,51 ±11,33 ^b	439,86 ±18,03 ^b	271,48 ±9,84 ^b	26,39 ±2,34 ^b	154,63 ±5,61 ^b
	SOJ	215,90 ±3,42 ^a	565,20 ±13,77 ^c	355,41 ±7,06 ^c	22,83 ±1,72 ^b	158,89 ±3,16 ^b
	PŠE	315,51 ±12,99 ^b	425,77 ±4,66 ^b	257,60 ±1,66 ^b	28,37 ±3,52 ^b	171,95 ±1,11 ^b
	SUN	352,23 ±29,33 ^b	649,83 ±35,47 ^d	404,61 ±23,84 ^d	28,14 ±0,25 ^b	255,34 ±15,05 ^c
Prosječna vrijednost		277,31	444,89	274,14	23,90	158,62
Minimalno		190,38	143,78	81,59	13,78	52,28
Maksimalno		352,23	649,83	404,61	28,37	255,34
Statistička značajnost		*	*	*	*	*

CO - ugljikov monoksid, NO_x - dušikovi oksidi, NO - dušikov monoksid, NO₂ - dušikov dioksid, SO₂ - sumporov dioksid; Različita slova u stupcu predstavljaju statistički značajnu razliku prema Tukeyjevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; * - statistički značajno $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Statistički značajne razlike utvrđene su i između svih skupina peleta kod kojih su koncentracije preračunate na referentni udio kisika od 11% O₂, što potvrđuje značajan utjecaj vrste biomase na emisije plinovitih produkata izgaranja. Najniže vrijednosti svih analiziranih emisijskih parametara utvrđene su kod peleta HRA: CO (190,38 mg/m³), NO_x (143,78 mg/m³), NO (81,59 mg/m³), NO₂ (13,78 mg/m³) i SO₂ (52,28 mg/m³). Najveće koncentracije CO (352,23 mg/m³), NO_x (649,83 mg/m³), NO (404,61 mg/m³) i SO₂ (255,34 mg/m³) zabilježene su kod peleta SUN, dok je najveća koncentracija NO₂ utvrđena kod peleta PŠE (28,37 mg/m³).

Analizator bilježi volumne udjele O₂ i CO₂ (%), bez korekcije na referentni udio kisika, a njihove su vrijednosti prikazane u tablici 76.

Tablica 76. Volumni udjeli O₂ i CO₂ pri izgaranju peleta od pojedinačnih biomasa (%)

Pelet	Vrsta	O ₂	CO ₂
	HRA	19,47±0,04 ^a	1,48±0,03 ^b
	KUK	19,62±0,05 ^b	1,38±0,01 ^a
	SOJ	19,49±0,03 ^a	1,47±0,02 ^b
	PŠE	19,45±0,01^a	1,49±0,01^b
	SUN	19,64±0,08^b	1,35±0,04^a
Prosječna vrijednost		19,53	1,43
Minimalno		19,45	1,35
Maksimalno		19,64	1,49
Statistička značajnost		*	*

O₂ - kisik, CO₂ - ugljični dioksid; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Rezultati mjerenja udjela O₂ i CO₂ u dimnim plinovima pokazali su statistički značajne razlike između skupina peleta. Najniža vrijednost O₂ utvrđena je kod peleta PŠE (19,45%), dok je najveća zabilježena kod peleta SUN (19,64%). Kod CO₂ najmanja vrijednost izmjerena je kod peleta SUN (1,35%), a najveća kod peleta PŠE (1,49%).

4.7.2. Koncentracija dimnih plinova pri izgaranju peleta od mješavina biomase

Metodologija analize emisija dimnih plinova primijenjena pri izgaranju peleta proizvedenih od mješavina biomase bila je identična metodologiji korištenoj za pelete proizvedene od pojedinačnih vrsta biomase. Koncentracije dimnih plinova CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂, korigirane na referentni udio O₂ od 10%, prikazane su u tablici 77.

Tablica 77. Masene koncentracije CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ (mg/m³; referentni udio O₂ 10%) pri izgaranju peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	CO	NO _x	NO	NO ₂	SO ₂
	HRA+PŠE	1	219,88 ±4,11 ^b	266,74 ±7,66 ^{ab}	158,18 ±5,23 ^{ab}	22,56 ±2,01 ^{ab}	88,91 ±2,94 ^{ab}
		2	244,31 ±54,35 ^b	347,49 ±43,97 ^d	211,92 ±23,89 ^d	26,82 ±2,48 ^{abcd}	115,39 ±25,79 ^{bcde}
		3	297,49 ±20,8 ^b	420,93 ±8,08 ^d	251,34 ±3,22 ^d	31,14 ±1,75^{abcde}	144,53 ±1,85 ^{de}
	HRA+KUK	1	218,47 ±3,73 ^a	247,74 ±1,86^a	147,71 ±2,55^a	21,29 ±0,77 ^{ab}	92,56 ±15,27 ^{ab}
		2	255,63 ±11,21 ^a	315,83 ±11,26 ^{ab}	193,84 ±4,15 ^{bc}	23,57 ±2,76 ^a	103,51 ±2,21 ^{abc}
		3	290,12 ±1,69 ^b	387,96 ±5,22 ^c	231,56 ±3,80 ^{cd}	29,15 ±0,67 ^{abc}	123,86 ±18,09 ^{abcde}
	HRA+SUN	1	234,38 ±7,19 ^c	335,58 ±5,42 ^d	203,44 ±3,85 ^{cd}	21,47 ±1,67 ^{ef}	106,63 ±1,76 ^{abcd}
		2	266,58 ±12,93 ^d	482,47 ±10,18 ^e	309,55 ±0,92 ^e	25,55 ±5,42 ^{def}	158,40 ±11,85 ^{cde}
		3	324,46 ±13,88^d	612,62 ±17,94^f	397,14 ±7,69^f	30,44 ±3,43 ^f	237,76 ±4,38^f
	HRA+SOJ	1	203,47 ±5,22^d	303,98 ±6,26 ^{bc}	185,02 ±5,01 ^b	20,18 ±0,21^{cde}	85,10 ±17,65^a
		2	211,30 ±62,79 ^d	432,15 ±52,47 ^d	257,87 ±33,25 ^d	23,24 ±3,07 ^{bcde}	112,22 ±12,91 ^{abc}
		3	219,87 ±6,68 ^{ab}	536,29 ±1,77 ^e	330,90 ±6,17 ^e	25,86 ±2,46 ^{abc}	150,38 ±2,80 ^e
	Prosječna vrijednost		248,83	390,82	239,87	25,11	126,60
	Minimalno		203,47	247,74	147,71	20,18	85,10
	Maksimalno		324,46	612,62	397,14	31,14	237,76
	Statistička značajnost		*	*	*	*	*

CO - ugljikov monoksid, NO_x - dušikovi oksidi, NO - dušikov monoksid, NO₂ - dušikov dioksid, SO₂ - sumporov dioksid; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu (p ≤ 0,05; stat.značajno * p ≤ 0,01; n.s. - nije statistički značajno)

Rezultati izmjerenih koncentracija pokazali su statistički značajne razlike za sve analizirane plinove, što upućuje na značajan utjecaj vrste sirovine i njezina udjela u mješavini na emisije tijekom procesa izgaranja. Sve koncentracije preračunate su na referentni udio O₂ od 10%.

Najniža koncentracija CO utvrđena je kod peleta HRA+SOJ1 (203,47 mg/m³), a najveća kod peleta HRA+SUN3 (324,46 mg/m³). Kod NO_x i NO najniže vrijednosti zabilježene su kod peleta HRA+KUK1 (247,74 mg/m³, odnosno 147,71 mg/m³), dok su najveće bile kod peleta HRA+SUN3 (612,62 mg/m³, odnosno 397,14 mg/m³). Najniža koncentracija NO₂ izmjerena je kod peleta HRA+SOJ1 (20,18 mg/m³), a najveća kod peleta HRA+PŠE3 (31,14 mg/m³). Kod SO₂ najniža je vrijednost utvrđena kod peleta HRA+SOJ1 (85,10 mg/m³), dok je najveća bila kod peleta HRA+SUN3 (237,76 mg/m³).

Koncentracije dimnih plinova CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ korigirane na referentni udio O₂ od 11% prikazane su u tablici 78. Potrebno je napomenuti da koncentracija H₂S nije utvrđena ni u jednoj skupini peleta.

Tablica 78. Masene koncentracije CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ (mg/m³; referentni udio O₂ 11%) pri izgaranju peleta od mješavina biomase

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	CO	NO _x	NO	NO ₂	SO ₂
	HRA+PŠE	1	199,89 ±4,11 ^b	242,49 ±7,66 ^{ab}	143,80 ±5,23 ^{ab}	20,51 ±2,01 ^{ab}	80,83 ±2,94 ^{ab}
		2	222,10 ±54,35 ^b	315,90 ±43,97 ^d	192,65 ±23,89 ^d	24,38 ±2,48 ^{abcd}	104,90 ±25,79 ^{bcde}
		3	270,45 ±20,8 ^b	382,66 ±8,08 ^d	228,49 ±3,22 ^d	28,31 ±1,75^{abcde}	131,39 ±1,85 ^{de}
	HRA+KUK	1	198,61 ±3,73 ^a	225,22 ±1,86^a	134,28 ±2,55^a	19,35 ±0,77 ^{ab}	84,15 ±15,27 ^{ab}
		2	232,39 ±11,21 ^a	287,12 ±11,26 ^{ab}	176,22 ±4,15 ^{bc}	21,43 ±2,76 ^a	94,10 ±2,21 ^{abc}
		3	263,75 ±1,69 ^b	352,69 ±5,22 ^c	210,51 ±3,80 ^{cd}	26,50 ±0,67 ^{abc}	112,60 ±18,09 ^{abcde}
	HRA+SUN	1	213,07 ±7,19 ^c	305,07 ±5,42 ^d	184,95 ±3,85 ^{cd}	19,52 ±1,67 ^{ef}	96,94 ±1,76 ^{abcd}
		2	242,35 ±12,93 ^d	438,61 ±10,18 ^e	281,41 ±0,92 ^e	23,23 ±5,42 ^{def}	144,00 ±11,85 ^{cde}
		3	294,96 ±13,88^d	559,93 ±17,94^f	361,04 ±7,69^f	27,67 ±3,43 ^f	216,15 ±4,38^f
	HRA+SOJ	1	184,97 ±5,22^d	276,35 ±6,26 ^{bc}	168,20 ±5,01 ^b	18,35 ±0,21^{cde}	77,36 ±17,65^a
		2	192,09 ±62,79 ^d	392,86 ±52,47 ^d	234,43 ±33,25 ^d	21,13 ±3,07 ^{bcde}	102,02 ±12,91 ^{abc}
		3	199,88 ±6,68 ^{ab}	487,54 ±1,77 ^e	300,82 ±6,17 ^e	23,51 ±2,46 ^{abc}	136,71 ±2,80 ^e
	Prosječna vrijednost		226,21	355,54	218,07	22,82	115,10
	Minimalno		184,97	225,22	134,28	18,35	77,36
	Maksimalno		294,96	559,93	361,04	28,31	216,15
	Statistička značajnost		*	*	*	*	*

CO - ugljikov monoksid, NO_x - dušikovi oksidi, NO - dušikov monoksid, NO₂ - dušikov dioksid, SO₂ - sumporov dioksid; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu (p ≤ 0,05; stat.značajno * p ≤ 0,01; n.s. - nije statistički značajno)

Volumni udjeli O₂ i CO₂ analizirani su bez korekcije na referentni udio kisika, a njihove su vrijednosti prikazane u tablici 79.

Tablica 79. Volumni udjeli O₂ i CO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase (%)

Pelet mješavina	Vrsta	Omjer	O ₂	CO ₂
	HRA+PŠE	1	19,35±0,06 ^{bcd}	1,60±0,10 ^{abcd}
		2	19,51±0,03 ^{cd}	1,55±0,03 ^{abc}
		3	19,58±0,02^d	1,18±0,04^a
	HRA+KUK	1	19,42±0,03 ^{bcd}	1,53±0,02 ^{abcd}
		2	19,30±0,04 ^{bc}	1,49±0,01 ^{bcde}
		3	19,34±0,03 ^{bc}	1,50±0,03 ^{abcd}
	HRA+SUN	1	19,35±0,03 ^{bcd}	1,59±0,02 ^{abcd}
		2	19,27±0,05 ^{ab}	1,49±0,03 ^{bcde}
		3	19,52±0,03 ^{cd}	1,42±0,03 ^{ab}
	HRA+SOJ	1	19,27±0,05 ^{ab}	1,59±0,04 ^{cde}
		2	19,22±0,25 ^{ab}	1,60±0,25 ^{de}
		3	19,05±0,04^a	1,61±0,04^e
	Prosječna vrijednost		19,35	1,51
	Minimalno		19,05	1,18
	Maksimalno		19,58	1,61
	Statistička značajnost		*	*

O₂ - kisik, CO₂ - ugljični dioksid; Različita slova u stupcu označavaju statistički značajnu razliku prema Tukeyevom post hoc HSD testu ($p \leq 0,05$; stat.značajno * $p \leq 0,01$; n.s. - nije statistički značajno)

Udjeli O₂ i CO₂ pokazali su statistički značajne razlike između svih skupina peleta. Najmanji udio O₂ imao je pelet HRA+SOJ3 (19,05%), dok je najveći utvrđen kod peleta HRA+PŠE3 (19,58%). Kod emisije CO₂ najveći udio imao je pelet HRA+SOJ3 (1,61%), a najmanji pelet HRA+PŠE3 (1,18%). Posebno su se izdvojili peleti s većim udjelom soje, kod kojih je utvrđen manji udio O₂ i veći udio CO₂, što može upućivati na intenzivniji proces izgaranja u usporedbi s ostalim mješavinama.

4.7.3. Ponderirani proračun emisija dimnih plinova pri izgaranju peleta od mješavina biomase
Zbog ograničene dostupnosti literaturnih podataka za emisije dimnih plinova pri izgaranju peleta proizvedenih od mješavina biomase, teorijske vrijednosti koncentracija analiziranih plinova određene su primjenom ponderiranog proračuna na temelju masenih udjela peleta od pojedinačnih biomasa. Usporedbom teorijskih i analiziranih vrijednosti izračunate su apsolutne razlike i relativne postotne pogreške. Rezultati su prikazani u tablicama za vrijednosti korigirane na referentni udio O₂ od 10% i 11%, dok su detaljna analiza i interpretacija odstupanja prikazane u poglavlju Rasprava.

4.7.3.1. Ponderirani proračun koncentracije CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase korigiranih na referentni udio O₂ od 10%

U tablici 80 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za koncentracije dimnih plinova CO, NO_x i NO.

Tablica 80. Ponderirani proračun ΔY i %E za CO, NO_x i NO pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O₂ 10%)

	Vrsta	Omjer	CO		NO _x		NO	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
Pelet mješavina	HRA+PŠE	1	-23,94	9,82	31,04	13,17	20,03	14,50
		2	-33,93	12,19	34,24	10,93	25,37	13,60
		3	-15,16	4,85	30,14	7,71	16,38	6,97
	HRA+KUK	1	-24,53	10,09	8,16	3,40	5,74	4,04
		2	-20,96	7,58	-5,18	1,61	-0,35	0,18
		3	-20,06	6,47	-14,47	3,60	-14,85	6,03
	HRA+SUN	1	-19,54	7,70	38,26	12,87	24,86	13,92
		2	-31,86	10,67	45,99	10,54	42,14	15,76
		3	-18,49	5,39	36,97	6,42	40,90	11,48
	HRA+SOJ	1	-12,96	5,99	29,93	10,92	19,97	12,10
		2	-12,15	5,44	42,21	10,82	17,52	7,29
		3	-10,60	4,60	30,46	6,02	15,25	4,83

CO - ugljikov monoksid, NO_x - dušikovi oksidi, NO - dušikov monoksid, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

U tablici 81 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za koncentracije dimnih plinova NO₂ i SO₂.

Tablica 81. Ponderirani proračun ΔY i %E za NO₂ i SO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O₂ 10%)

Tip	Vrsta	Omjer	NO ₂		SO ₂	
			ΔY	%E	ΔY	%E
Pelet mješavina	HRA+PŠE	1	3,39	17,67	-1,51	1,67
		2	3,64	15,68	-7,93	6,43
		3	3,94	14,50	-11,70	7,49
	HRA+KUK	1	2,66	14,29	6,90	8,06
		2	1,48	6,68	-10,30	9,05
		3	3,59	14,03	-18,09	12,75
	HRA+SUN	1	2,36	12,35	-6,72	5,93
		2	2,49	10,80	-10,79	6,38
		3	3,43	12,70	12,73	5,66
	HRA+SOJ	1	2,53	14,35	-1,73	1,99
		2	3,11	15,42	-3,93	3,38
		3	3,24	14,31	4,92	3,38

NO₂ - dušikov dioksid, SO₂ - sumporov dioksid, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.7.3.2. Ponderirani proračun koncentracije CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase korigiranih na referentni udio O₂ od 11%

U tablici 82 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za koncentracije dimnih plinova CO, NO_x i NO.

Tablica 82. Ponderirani proračun ΔY i %E za CO, NO_x i NO pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O₂ 11%)

Tip	Vrsta	Omjer	CO		NO _x		NO	
			ΔY	%E	ΔY	%E	ΔY	%E
Pelet mješavina	HRA+PŠE	1	-21,77	9,82	28,21	13,17	18,21	14,50
		2	-30,85	12,19	31,13	10,93	23,06	13,59
		3	-13,78	4,85	27,39	7,71	14,89	6,97
	HRA+KUK	1	-22,30	10,10	7,42	3,41	5,22	4,04
		2	-19,06	7,58	-4,70	1,61	-0,32	0,18
		3	-18,23	6,46	-13,15	3,59	-13,50	6,03
	HRA+SUN	1	-17,77	7,70	34,78	12,87	22,61	13,92
		2	-28,96	10,67	41,81	10,54	38,31	15,76
		3	-16,81	5,39	36,61	7,00	37,19	11,48
	HRA+SOJ	1	-11,79	5,99	27,22	10,92	18,16	12,10
		2	-11,05	5,44	38,37	10,82	15,93	7,29
		3	-9,64	4,60	27,70	6,02	13,87	4,83

CO - ugljikov monoksid, NO_x - dušikovi oksidi, NO - dušikov monoksid, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

U tablici 83 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za koncentracije dimnih plinova NO₂ i SO₂.

Tablica 83. Ponderirani proračun ΔY i %E za NO₂ i SO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase (O₂ 11%)

Tip	Vrsta	Omjer	NO ₂		SO ₂	
			ΔY	%E	ΔY	%E
Pelet mješavina	HRA+PŠE	1	3,08	17,69	-1,37	1,66
		2	3,31	15,68	-7,21	6,44
		3	3,59	14,51	-10,64	7,49
	HRA+KUK	1	2,42	14,28	6,28	8,07
		2	1,35	6,70	-9,36	9,04
		3	3,26	14,04	-16,44	12,74
	HRA+SUN	1	2,15	12,38	-6,10	5,92
		2	2,27	10,83	-9,81	6,38
		3	3,12	12,71	11,58	5,66
	HRA+SOJ	1	2,31	14,38	-1,57	1,99
		2	2,83	15,43	-3,57	3,38
		3	2,94	14,31	4,47	3,38

NO₂ - dušikov dioksid, SO₂ - sumporov dioksid, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

4.7.3.3. Ponderirani proračun volumnih udjela O₂ i CO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase

U tablici 84 prikazane su vrijednosti ΔY i %E za volumne udjele O₂ i CO₂ nastalih tijekom izgaranja peleta proizvedenih od mješavina biomase.

Tablica 84. Ponderirani proračun ΔY i %E za O₂ i CO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase

Tip	Vrsta	Omjer	O ₂		CO ₂	
			ΔY	%E	ΔY	%E
Pelet mješavina	HRA+PŠE	1	-0,11	0,59	0,12	7,93
		2	0,05	0,26	0,07	4,38
		3	0,13	0,64	0,07	6,31
	HRA+KUK	1	-0,09	0,45	0,08	5,15
		2	-0,25	1,25	0,06	4,20
		3	-0,24	1,24	0,10	6,76
	HRA+SUN	1	-0,16	0,83	0,14	9,84
		2	-0,29	1,46	0,08	5,30
		3	-0,08	0,40	0,04	2,71
	HRA+SOJ	1	-0,20	1,05	0,11	7,61
		2	-0,26	1,33	0,13	8,47
		3	-0,43	2,23	0,14	9,34

O₂ - kisik, CO₂ - ugljikov dioksid, ΔY - apsolutna razlika, %E - relativna postotna pogreška

5. RASPRAVA

5.1. Analiza svojstava biomase

5.1.1. Granulometrijski sastav biomase

Granulometrijski sastav biomase ima važnu ulogu u provedbi kemijskih analiza i procesa konverzije jer utječe na specifičnu površinu dostupnu za reakcije, brzinu prijenosa mase i topline te učinkovitost kemijske razgradnje. Za većinu termokemijskih i biokemijskih procesa preporučuje se veličina čestica između 0,50 i 1,00 mm (Lisowski i sur., 2020.; Sabitova i sur., 2025.). U analiziranim uzorcima najzastupljenije su frakcije 0,50 mm (19,75%), 0,71 mm (27,50%) i 1,00 mm (37,31%), što potvrđuje da je korištena granulacija bila prikladna za provedbu daljnjih kemijskih analiza biomase.

5.1.2. Fizikalno-kemijska i mehanička svojstva biomase

Fizikalno-kemijska svojstva biomase, poput udjela vlage, pepela, koksa, C_{fix} i HT te NG značajno utječu na njezina energetska svojstva, učinkovitost proizvodnje peleta i ponašanje tijekom izgaranja. Dobivene vrijednosti analiziranih svojstava uspoređene su s podacima iz literature radi procjene kvalitete biomase kao sirovine za proizvodnju biogoriva. Uočena odstupanja mogu se pripisati razlikama u vrsti biomase, kemijskom i strukturnom sastavu, uvjetima uzgoja i skladištenja te primijenjenim analitičkim metodama.

5.1.2.1. Udio vlage u biomasi

Udio vlage jedno je od ključnih svojstava biomase jer značajno utječe na ogrjevnju vrijednost i energetska učinkovitost goriva. Povećani udio vlage smanjuje energetska iskoristivost biomase jer se dio energije tijekom izgaranja troši na isparavanje vode. Optimalan udio vlage za većinu sustava energetske pretvorbe biomase najčešće iznosi između 10 i 20%, ovisno o vrsti biomase i načinu primjene (Ungureanu i sur., 2018.; Abdel Aal i sur., 2023.). Biomasa HRA sadržavala je 8,09% vlage, što je unutar raspona vrijednosti od 4,70 do 17,10% navedenih u literaturi (Núñez-Retana i sur., 2019.; Uzcategui i sur., 2020.; Safarian i sur., 2021.). U biomasi KUK utvrđeno je 7,71% vlage, što je također unutar raspona literaturnih vrijednosti od 5,40 do 11,75% (Kaliyan i Morey, 2009.; Tumuluru i sur., 2011.; Zhang i sur., 2012a.; Probst i sur., 2013.). Biomasa SOJ sadržavala je 7,05% vlage, što je usporedivo s vrijednostima od 6,71 do 8,21% navedenima u literaturi (Zhang i sur., 2012a.; Xu i sur., 2020.; Udakwar i Sarode, 2023.; Banadkoki i sur., 2024.; Phadtare i Kalbande, 2024.). U biomasi PŠE utvrđeno je 7,13% vlage, što je unutar raspona vrijednosti od 5,02 do 9,62% navedenih u literaturi (Zhang i sur., 2012b.; Nath i sur., 2023.). Biomasa SUN sadržavala je 11,96% vlage, što je također unutar raspona literaturnih vrijednosti od 4,00 do 12,00% (Geletukha i sur., 2020.; Kindzera i Kochubei,

2025.). Relativno nizak udio vlage upućuje na odgovarajuću pripremljenost biomase za provedbu daljnjih analiza i primjenu u procesima proizvodnje peleta i energetske uporabe.

5.1.2.2. Udio pepela u biomasi

Udio pepela u peletima i drugim krutim biogorivima važno je svojstvo jer može uzrokovati stvaranje taloga i naslaga u pećima i kotlovima, što negativno utječe na učinkovitost sustava izgaranja. Povećani udio pepela smanjuje kvalitetu goriva jer smanjuje udio gorive tvari i energetske iskoristivost biomase (Jeong i sur., 2019.). U biomasi HRA utvrđen je udio pepela od 0,10%, što je niže od vrijednosti navedenih u literaturi koje se kreću između 0,23 i 0,63% (Donata i sur., 2010.; Šafran i sur., 2014.; Voicea i sur., 2013.; Antonović i sur., 2019.; Núñez-Retana i sur., 2019.; Ghavidel i sur., 2020.). Biomasa KUK sadržavala je 3,21% pepela, što je unutar raspona od 2,76 do 8,40% navedenog u literaturi (Matin i sur., 2016.; Antonović i sur., 2017.; Kontek i sur., 2021.; Hájková i sur., 2023.; Rabi Prasad i sur., 2024.). U biomasi SOJ udio pepela iznosio je 3,73%, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 3,44 do 15,82% (Zabaniotou i sur., 2010.; Marinković i sur., 2011.; Bratishko i sur., 2021.; Udakwar i Sarode, 2023.; Banadkoki i sur., 2024.; Phadtare i Kalbande, 2024.). Biomasa PŠE sadržavala je 7,43% pepela, što je nešto više od većine literaturnih vrijednosti koje se kreću između 4,48 i 7,10% (Vassilev i sur., 2010.; Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Antonović i sur., 2017.; Jóvér i sur., 2018.; Bratishko i sur., 2021.). U biomasi SUN udio pepela iznosio je 12,55%, što je unutar raspona vrijednosti od 7,36 do 14,70% navedenih u literaturi (Zabaniotou i sur., 2010.; Jóvér i sur., 2018.; Geletukha i sur., 2020.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Bratishko i sur., 2021.). Veći udio pepela kod poljoprivrednih biomasa može se povezati s većim sadržajem mineralnih tvari, osobito Si, K i drugih anorganskih elemenata koji zaostaju nakon izgaranja.

5.1.2.3. Udio fiksiranog ugljika u biomasi

Fiksirani ugljik predstavlja udio ugljika u biomasi koji ostaje nakon izdvajanja hlapljivih tvari te se uglavnom sastoji od C, uz manje udjele H, N, O i S. Povećanjem udjela C_{fix} raste i ogrjevna vrijednost biomase, zbog čega je ovaj pokazatelj važan za procjenu energetske kvalitete goriva. U biomasi HRA udio C_{fix} iznosio je 16,93%, što je usporedivo s vrijednostima iz literature od 11,00 do 21,40% (Demirbas, 2004.; Krička, 2010.; Núñez-Retana i sur., 2019.). Biomasa KUK sadržavala je 7,33% C_{fix} , što je unutar raspona od 7,20 do 17,95% navedenih u literaturi (Marinković i sur., 2011.; Matin i sur., 2016.; Kontek i sur., 2021.; Rabi Prasad i sur., 2024.). U biomasi SOJ udio C_{fix} iznosio je 6,35%, što je niže od vrijednosti iz literature od 10,96 do 16,06% (Xi i sur., 2020.; Udakwar i Sarode, 2023.; Phadtare i Kalbande, 2024.). Biomasa PŠE sadržavala je 9,98% C_{fix} , što je unutar raspona od 8,13 do 18,29% navedenih u literaturi (Vassilev i sur., 2010.; Marinković i sur., 2011.; Rathore i sur., 2023.). U biomasi SUN udio C_{fix}

iznosio je 6,16%, što je nešto niže od vrijednosti iz literature od 6,24 do 17,80% (Agnihotri i Mondal, 2024.; Li i sur., 2025.). Niže vrijednosti C_{fix} utvrđene kod biomasa SOJ i SUN mogu se djelomično povezati s razlikama u udjelu lignina, koji značajno utječe na količinu ugljičnog ostatka nakon termičke razgradnje.

5.1.2.4. Udio koksa u biomasi

Koks predstavlja čvrsti ostatak nastao tijekom termokemijske obrade biomase bez prisutnosti kisika, a njegov udio daje uvid u ponašanje biomase tijekom toplinske razgradnje i količinu nastalog krutog ostatka. Veći udio koksa može upućivati na veći ostatak krute faze nakon termokemijske pretvorbe biomase. Biomasa HRA sadržavala je 18,53% koksa, što je više od vrijednosti 11,40 i 14,25% navedenih u literaturi (Krička, 2010.; Matin i sur., 2024.). U biomasi KUK utvrđeno je 11,42% koksa, što je niže od literaturnih vrijednosti između 16,68 i 35,11% (Krička, 2010.; Matin i sur., 2016.; Kontek i sur., 2021.). Biomasa SOJ sadržavala je 10,84% koksa, što je niže od literaturnih vrijednosti od 13,34 do 20,21% (Matin i sur., 2018.; Kontek i sur., 2021.). Biomasa PŠE imala je 18,75% koksa, što je usporedivo s vrijednostima 16,30 i 21,66% navedenima u literaturi (Krička, 2010.; Grubor, 2021.). U biomasi SUN udio koksa iznosio je 21,25%, što je vrlo blisko literaturnoj vrijednosti od 21,66% (Krička, 2010.). Odstupanja udjela koksa kod biomasa HRA, KUK i SOJ mogu se povezati s razlikama u količini krutog ostatka nastalog tijekom termičke razgradnje biomase.

5.1.2.5. Udio hlapljivih tvari u biomasi

Hlapljive tvari su komponente goriva koje pri povišenim temperaturama prelaze u plinovitu fazu, uključujući i vodenu paru. Njihov udio važan je za procjenu ponašanja biomase tijekom zagrijavanja i izgaranja jer utječe na paljenje, oslobađanje plinovitih produkata i tijekom termokemijske pretvorbe. U biomasi HRA udio HT iznosio je 74,88%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 73,00 do 88,60% (Demirbas, 2004.; Krička, 2010.; Núñez-Retana i sur., 2019.; Saletnik i sur., 2022.). Biomasa KUK sadržavala je 81,75% HT, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 72,40 do 85,32% (Marinković i sur., 2011.; Matin i sur., 2016.; Kontek i sur., 2021.; Rabi Prasad i sur., 2024.). U biomasi SOJ udio HT iznosio je 82,87%, što je nešto više od većine literaturnih vrijednosti između 68,15 i 81,40% (Marinković i sur., 2011.; Matin i sur., 2018.; Udakwar i Sarode, 2023.; Phadtare i Kalbande, 2024.). Biomasa PŠE sadržavala je 75,46% HT, što je unutar raspona vrijednosti od 67,20 do 81,00% navedenih u literaturi (Vassilev i sur., 2010.; Marinković i sur., 2011.; Rathore i sur., 2023.). U biomasi SUN udio HT iznosio je 69,32%, što je unutar raspona vrijednosti između 64,41 i 75,90% navedenih u literaturi (Praspaliauskas i sur., 2020.; Zhurka i sur., 2019.; Agnihotri i Mondal, 2024.;

Kindzera i Kochubei, 2025.). Nešto veći udio HT kod biomase SOJ može se povezati s većim udjelom lako hlapljivih organskih sastavnica koje tijekom zagrijavanja prelaze u plinovitu fazu.

5.1.2.6. Nasipna gustoća biomase

Nasipna gustoća predstavlja omjer mase biomase i volumena prostora za pohranu te značajno utječe na transport, skladištenje i rukovanje biomasom. Veća NG omogućuje učinkovitiju logistiku i smanjenje troškova u lancu opskrbe sirovinom. U biomasi HRA izmjerena je NG od 346,77 kg/m³, što je nešto više od literaturnih vrijednosti od 111,00 do 340,00 kg/m³ (Krička i sur., 2017.; Núñez-Retana i sur., 2019.; Trzciński i sur., 2021.). Za biomasu KUK utvrđena je NG od 120,85 kg/m³, što je nešto niže od literaturnih vrijednosti između 127,32 i 160,00 kg/m³ (Mani i sur., 2002.; Zhang i sur., 2012a.; Tumuluru, 2018.). Kod biomase SOJ zabilježena je NG od 209,81 kg/m³, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 200,20 do 242,34 kg/m³ (Zhang i sur., 2012a.; Banadkoki i sur., 2024.; Phadtare i Kalbande, 2024.). Biomasa PŠE sadržavala je NG od 130,64 kg/m³, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 80,00 do 177,23 kg/m³ (Tumuluru i sur., 2011.; Zhang i sur., 2012b.; Tumuluru, 2018.). U biomasi SUN izmjerena je NG od 128,40 kg/m³, što je unutar raspona vrijednosti između 111,78 i 180,00 kg/m³ navedenih u literaturi (Bhagwanrao i Singaravelu, 2014.; Ndahirwa, 2023.). Odstupanja NG kod biomasa HRA i KUK mogu se povezati s razlikama u veličini, obliku i rasporedu čestica unutar volumena biomase.

5.1.3. Elementarni sastav biomase

Elementarni sastav biomase čine udjeli C, H, O, N i S, koji imaju važnu ulogu u procjeni energetskog potencijala biomase jer utječu na toplinsku učinkovitost izgaranja i emisije plinova poput NO_x i SO_x. Ugljik i vodik ključni su elementi koji određuju ogrjevnju vrijednost goriva, dok povećani udio O, N i S mogu nepovoljno utjecati na ogrjevnju vrijednost te povećati emisije štetnih plinova tijekom izgaranja (Adamovics i sur., 2018.). Uočene razlike odražavaju prirodnu varijabilnost kemijskog sastava analiziranih biomasa.

5.1.3.1. Udio ugljika u biomasi

Ugljik je glavni element odgovoran za oslobađanje topline tijekom izgaranja biomase i ima ključnu ulogu u određivanju energetskog potencijala goriva (Adamovics i sur., 2018.). Budući da je udio C u biomasi znatno veći od udjela H, ugljik je osnovni nositelj energetske vrijednosti biomase. U biomasi HRA udio C iznosio je 46,48%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 46,50 do 49,90% (Krička, 2010.; Vasileios i sur., 2018.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Saletnik i sur., 2022.). Biomasa KUK sadržavala je 43,86% C, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 42,91 i 48,27% (Đurić i sur., 2014.; Matin i sur., 2016.;

Samaksaman i sur., 2019.; Kontek i sur., 2021.). U biomasi SOJ udio C iznosio je 43,19%, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 41,34 do 48,24% (Zabaniotou i sur., 2010.; Xu i sur., 2020.; Agnihotri i Mondal, 2024.; Banadkoki i sur., 2024.). Biomasa PŠE sadržavala je 41,57% C, što je neznatno niže od literaturnih vrijednosti između 42,10 i 44,80% (Krička i sur., 2017.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Rathore i sur., 2023.; Said i sur., 2024.). U biomasi SUN udio C iznosio je 39,44%, što odstupa od većine literaturnih vrijednosti koje se kreću između 41,95 i 46,00% (Zabaniotou i sur., 2010.; Geletukha i sur., 2020.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Hubetska i sur., 2021.; Martínez-Cartas i sur., 2024.). Niže vrijednosti udjela C kod biomasa PŠE i SUN mogu upućivati na manji energetski potencijal u odnosu na vrijednosti zabilježene u većini literaturnih izvora.

5.1.3.2. Udio vodika u biomasi

Iako je udio H u biomasi znatno manji od udjela C, njegov doprinos ogrjevnoj vrijednosti goriva vrlo je značajan zbog velike količine energije koja se oslobađa tijekom izgaranja. Udio H stoga ima važnu ulogu u određivanju energetskih svojstava biomase i njezina ponašanja tijekom izgaranja (Adamovics i sur., 2018.). Biomasa HRA sadržavala je 6,22% H, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 5,93 do 6,35% (Demirbas, 2004.; Vasileios i sur., 2018.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Saletnik i sur., 2022.). U biomasi KUK udio H iznosio je 6,30%, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 4,08 i 8,18% (Đurić i sur., 2014.; Matin i sur., 2018.; Samaksaman i sur., 2019.; Kontek i sur., 2021.; Banadkoki i sur., 2024.). Biomasa SOJ sadržavala je 6,38% H, što je vrlo blizu gornje granice literaturnih vrijednosti od 3,92 do 6,36% (Zabaniotou i sur., 2010.; Matin i sur., 2018.; Agnihotri i Mondal, 2024.; Banadkoki i sur., 2024.). U biomasi PŠE udio H iznosio je 6,12%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 5,90 i 6,20% (Vassilev i sur., 2010.; Mijailović i sur., 2014.; Rathore i sur., 2023.; Said i sur., 2024.). Biomasa SUN sadržavala je 5,97% H, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 5,02 do 7,30% (Zabaniotou i sur., 2010.; Geletukha i sur., 2020.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Martínez-Cartas i sur., 2024.; Li i sur., 2025.). Mala odstupanja udjela H u odnosu na literaturne vrijednosti ukazuju na sličan kemijski sastav analiziranih biomasa.

5.1.3.3. Udio dušika u biomasi

Udio dušika u biomasi ne doprinosi izravno ogrjevnoj vrijednosti, dok njegov povećani sadržaj može dovesti do većih emisija NO_x tijekom izgaranja. Stoga se biomasa s nižim udjelom N smatra pogodnijom za energetske primjene (Hansen i sur., 2022.). U biomasi HRA udio N iznosio je 0,09%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,04 do 0,30% (Demirbas, 2004.; Vasileios i sur., 2018.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Saletnik i sur., 2022.). Biomasa KUK

sadržavala je 0,58% N, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 0,27 i 0,91% (Đurić i sur., 2014.; Matin i sur., 2016.; Samaksaman i sur., 2019.; Kontek i sur., 2021.; Banadkoki i sur., 2024.). U biomasi SOJ udio N iznosio je 0,77%, što je unutar navedenih literaturnih vrijednosti koje se kreću od 0,35 do 0,85% (Zabaniotou i sur., 2010.; Matin i sur., 2018.; Rymuza i sur., 2020.; Agnihotri i Mondal, 2024.; Banadkoki i sur., 2024.). Udio N u biomasi PŠE iznosio je 0,45%, što je neznatno manje od literaturnih vrijednosti od 0,50 do 0,99% (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Rathore i sur., 2023.; Said i sur., 2024.). U biomasi SUN udio N iznosio je 0,75%, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 0,19 do 1,43% (Zabaniotou i sur., 2010.; Geletukha i sur., 2020.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Martínez-Cartas i sur., 2024.; Li i sur., 2025.). Niski udjeli N upućuju na povoljne karakteristike biomase s aspekta mogućeg nastanka NO_x emisija tijekom izgaranja.

5.1.3.4. Udio kisika u biomasi

Udio kisika u biomasi značajno utječe na njezina energetska svojstva, osobito na ogrjevnju vrijednost i ponašanje tijekom izgaranja. Veći udio O obično smanjuje energetska iskoristivost goriva, zbog čega biomasa s većim udjelom kisika najčešće ima nižu ogrjevnju vrijednost. Osim toga, kisik utječe na tijek termokemijskih procesa i sastav plinovitih produkata izgaranja (Shevchenko i sur., 2019.). U biomasi HRA udio O iznosio je 47,12%, što je nešto više u odnosu na većinu literaturnih vrijednosti između 42,90 i 47,01% (Demirbas, 2004.; Vasileios i sur., 2018.; Praspaliauskas i sur., 2020.). Biomasa KUK sadržavala je 49,16% O, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 44,74 do 50,41% (Matin i sur., 2016.; Samaksaman i sur., 2019.; Kontek i sur., 2021.; Banadkoki i sur., 2024.). U biomasi SOJ udio O iznosio je 49,57%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 44,51 i 50,46% (Zabaniotou i sur., 2010.; Matin i sur., 2018.; Agnihotri i Mondal, 2024.; Banadkoki i sur., 2024.). Biomasa PŠE sadržavala je 51,75% O, što je više od literaturnih vrijednosti između 41,10 i 46,90% (Vassilev i sur., 2010.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Rathore i sur., 2023.; Kumar i sur., 2024.). U biomasi SUN udio O iznosio je 53,69%, što također premašuje dostupne literaturne vrijednosti od 48,90 do 51,47% (Zabaniotou i sur., 2010.; Hubetska i sur., 2021.). Povećani udjeli O kod biomasa PŠE i SUN mogu se povezati s njihovim nižim udjelom ugljika i posljedično manjim energetskim potencijalom.

5.1.3.5. Udio sumpora u biomasi

Udio sumpora u biomasi utječe na ekološke aspekte i uporabna svojstva goriva. Veći sadržaj sumpora tijekom izgaranja dovodi do nastanka sumpornih spojeva, čime se povećavaju emisije onečišćujućih tvari i mogućnost pojave korozije unutar energetskih postrojenja. Stoga se

biomasa s nižim udjelom S smatra pogodnijom za primjenu u energetske sustavima (Kraszkiewicz i sur., 2020.). U biomasi HRA udio S iznosio je 0,10%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 0,10 do 0,21% (Demirbas, 2004.; Krička i sur., 2017.). Biomasa KUK sadržavala je 0,10% S, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 0,08 i 0,40% (Masia i sur., 2007.; Đurić i sur., 2014.; Matin i sur., 2016.; Kontek i sur., 2021.). Kod biomase SOJ udio S iznosio je 0,10%, što je usporedivo s većinom literaturnih vrijednosti od 0,06 do 0,12%, osim znatno veće vrijednosti od 1,17% koju navode Tahir i sur. (2021.) (Matin i sur., 2018.; Tahir i sur., 2021.). Biomasa PŠE sadržavala je 0,11% S, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 0,02 i 0,18% (Vassilev i sur., 2010.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Cheng i sur., 2020.; Kumar i sur., 2024.). U biomasi SUN sadržaj S iznosio je 0,16%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,06 do 0,33% (Praspaliauskas i sur., 2020.; Geletukha i sur., 2020.; Li i sur., 2025.). Niži udjeli S ukazuju na povoljne karakteristike analiziranih biomasa s aspekta emisija sumpornih spojeva tijekom izgaranja.

5.1.3.6. H/C i O/C omjer biomase

Omjeri H/C i O/C često se koriste za procjenu energetske potencijala biomase jer pružaju uvid u njezina kemijska i energetska svojstva. Veći H/C omjer obično upućuje na povoljnija energetska svojstva biomase, dok veći O/C omjer smanjuje ogrjevnju vrijednost i povećava udio plinovitih produkata tijekom izgaranja. Stoga biomasa s nižim O/C omjerom općenito ima veću energetske gustoću i bolju iskoristivost u termokemijskim procesima (Adamovics i sur., 2018.). Kod lignocelulozne biomase prosječni H/C omjer kreće se između 1,26 i 1,58, dok O/C omjer iznosi između 0,40 i 0,80 (Quan i sur., 2016.). U biomasi HRA H/C omjer iznosio je 1,59, a O/C omjer 0,76, pri čemu je H/C omjer neznatno veći od literaturnih vrijednosti, dok je O/C omjer unutar raspona. Za biomasu KUK utvrđen je H/C omjer od 1,71 i O/C omjer od 0,84, što je više od literaturnih vrijednosti. Kod biomase SOJ zabilježen je H/C omjer od 1,76 te O/C omjer od 0,86, što također premašuje literaturne raspone. U biomasi PŠE H/C omjer iznosio je 1,75, a O/C omjer 0,93, pri čemu su oba omjera veća od vrijednosti navedenih u literaturi. Za biomasu SUN određen je H/C omjer od 1,80 i O/C omjer od 1,02, što su najveće vrijednosti među analiziranim biomasama te značajno odstupaju od literaturnih raspona. Povećani O/C omjeri kod biomasa PŠE i SUN povezani su s većim udjelom kisika i manjim udjelom ugljika, što može nepovoljno utjecati na ogrjevnju vrijednost i ukupna energetska svojstva biomase.

5.1.4. Kemijski sastav biomase

Kemijski sastav biomase, osobito udio celuloze, hemiceluloze, lignina i ET, značajno utječe na njezina energetska svojstva jer pojedine sastavnice imaju različitu ogrjevnju vrijednost i različito

ponašanje tijekom toplinske razgradnje i izgaranja. Biomasa s većim udjelom lignina obično ima veću ogrjevnu vrijednost od biomase bogatije celulozom i hemicelulozom, dok ekstraktivne tvari također mogu pozitivno pridonijeti ogrjevnoj vrijednosti, ovisno o svom kemijskom sastavu (Esteves i sur., 2023.). Uočene razlike odražavaju prirodnu varijabilnost kemijskog sastava analiziranih biomasa.

5.1.4.1. Udio celuloze u biomasi

Celuloza je najzastupljeniji kemijski polisaharid u biomasi te ima važnu ulogu u određivanju njezinih fizikalnih i kemijskih svojstava. Njezin udio značajno utječe na ponašanje biomase tijekom toplinske razgradnje i termokemijske pretvorbe. U biomasi HRA udio celuloze iznosio je 49,51%, što je nešto više od većine literaturnih vrijednosti između 36,70 i 49,20% (Donata i sur., 2010.; Geffert i sur., 2019.; Antonović i sur., 2019.; Dragusanu i sur., 2023.). Za biomasu KUK utvrđen je udio celuloze od 52,26%, što premašuje literaturne vrijednosti od 41,16 do 47,60% (Sarkar i sur., 2012.; Cui i sur., 2021.; Hájková i sur., 2023.). Kod biomase SOJ zabilježeno je 49,06% celuloze, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 34,10 i 51,02% (Antonopoulou i sur., 2015.; Kim, 2018.; Agnihotri i Mondal, 2024.). U biomasi PŠE udio celuloze iznosio je 50,62%, što je više od većine literaturnih vrijednosti između 42,00 i 49,20% (Alemdar i Sain, 2008.; Zhang i sur., 2012a; Plazonić i sur., 2016.; Rathore i sur., 2021.; Nath i sur., 2023.). Za biomasu SUN određen je udio celuloze od 47,74%, što je više od literaturnih vrijednosti od 32,00 do 45,70% (Antonopoulou i sur., 2015.; Fortunati i sur., 2016.; Zhang i sur., 2021.). Veći udjeli celuloze odražavaju povećanu zastupljenost strukturnih ugljikohidrata u analiziranim biomasama.

5.1.4.2. Udio lignina u biomasi

Lignin je složeni aromatski polimer koji čini važan dio strukture biomase te zbog svoje kemijske građe i veće toplinske stabilnosti značajno utječe na energetska svojstva i ponašanje biomase tijekom izgaranja. U biomasi HRA udio lignina iznosio je 23,97%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 20,05 do 28,00% (Donata i sur., 2010.; Antonović i sur., 2019.; Ghavidel i sur., 2020.; Dragusanu i sur., 2023.). Kod biomase KUK udio lignina bio je 18,82%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 17,10 do 21,30% (Kaliyan i Morey, 2009.; Zhang i sur., 2012a.; Cui i sur., 2021.; Hájková i sur., 2023.). U biomasi SOJ zabilježeno je 19,53% lignina, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 12,80 do 24,89% (Kim, 2018.; Cui i sur., 2021.; Agnihotri i Mondal, 2024.; Banadkoki i sur., 2024.). Za biomasu PŠE određena je vrijednost od 21,28% lignina, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 16,14 do 24,66% (Alemdar i Sain, 2008.; Antonović i sur., 2017.; Plazonić i sur., 2016.;

Rathore i sur., 2021.; Kumar i sur., 2024.). U slučaju biomase SUN udio lignina bio je 20,54%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 15,80 do 24,86% (Antonopoulou i sur., 2015.; Antonović i sur., 2017.; Zhurka i sur., 2019.; Kindzera i Kochubei, 2025.). Utvrđeni udjeli lignina bili su usporedivi s literaturnim vrijednostima za analizirane vrste biomase.

5.1.4.3. Udio hemiceluloze u biomasi

Hemiceluloza je strukturni polisaharid biljne stanične stijenke koji, uz celulozu i lignin, čini važan dio organske tvari biomase. Zbog manje toplinske stabilnosti, njezin udio značajno utječe na ponašanje biomase tijekom toplinske razgradnje i termokemijske pretvorbe. Biomasa HRA sadržavala je 17,23% hemiceluloze, što je manje od literaturnih vrijednosti između 21,70 i 25,47% (Szczepkowski i sur., 2007.; Antonović i sur., 2019.; Ghavidel i sur., 2020.; Dragusanu i sur., 2023.). U biomasi KUK utvrđeno je 18,27% hemiceluloze, što je nešto manje u odnosu na literaturne vrijednosti od 19,10 do 25,30% (Kaliyan i Morey, 2009.; Antonović i sur., 2017.; Da Rosa i sur., 2025.). Biomasa SOJ sadržavala je 21,19% hemiceluloze, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 11,00 i 25,53% (Kim, 2018.; Tahir i sur., 2021.; Agnihotri i Mondal, 2024.). U biomasi PŠE udio hemiceluloze iznosio je 18,18%, što je manje od većine literaturnih vrijednosti između 20,00 i 34,10% (del Rio i sur., 2012.; Alemdar i Sain, 2008.; Nath i sur., 2023.). Biomasa SUN sadržavala je 17,97% hemiceluloze, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 6,30 do 33,00% (Antonopoulou i sur., 2015.; Geletukha i sur., 2020.; Kindzera i Kochubei, 2025.). Manji udjeli hemiceluloze kod biomasa HRA, KUK i PŠE povezani su s većom zastupljenošću celuloze u njihovu kemijskom sastavu.

5.1.4.4. Udio ekstraktivnih tvari u biomasi

Ekstraktivne tvari obuhvaćaju spojeve koji nisu sastavni dio strukturnih polisaharida i lignina, a izdvajaju se primjenom odgovarajućih otapala. Njihov udio utječe na kemijska i energetska svojstva biomase te na njezino ponašanje tijekom toplinske razgradnje i izgaranja. U biomasi HRA udio ET iznosio je 8,89%, što je više od većine literaturnih vrijednosti između 2,30 i 8,20% (Donata i sur., 2010.; Geffert i sur., 2019.; Antonović i sur., 2019.; Dragusanu i sur., 2023.). Za biomasu KUK utvrđen je udio ET od 7,89%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 5,67 do 14,90% (Antonović i sur., 2017.; Banadkoki i sur., 2024.; Barbash i sur., 2023.). Kod biomase SOJ zabilježeno je 7,48% ET, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 1,49 i 9,22% (Liu i sur., 2015.; Banadkoki i sur., 2024.). U biomasi PŠE udio ET iznosio je 7,11%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 3,00 do 11,40% (Antonović i sur., 2017.; Plazonić i sur., 2016.; Hagel i Schütt, 2024.). Za biomasu SUN određen je udio ET od 7,28%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 2,29 i 12,33%

(Hashem i sur., 2006.; Antonović i sur., 2017.; Akhtar i sur., 2021.). Veći udio ET u biomasi HRA ukazuje na veću zastupljenost ekstraktivnih spojeva u odnosu na većinu vrijednosti navedenih u literaturi.

5.1.5. Mineralni sastav biomase

Mineralni sastav biomase značajno utječe na njezina energetska svojstva i ponašanje tijekom pretvorbe u energiju. Posebno je važan udio anorganskih elemenata koji nakon izgaranja sudjeluju u stvaranju pepela jer mogu utjecati na taljenje pepela, stvaranje naslaga, pojavu korozije i učinkovitost termokemijskih procesa. Mineralni sastav također određuje prikladnost biomase za pojedine postupke energetske pretvorbe i može utjecati na njihov tijek (Fitria i Yang, 2023.). Uočene razlike u sadržaju pojedinih minerala mogu se povezati s njihovom različitom zastupljenošću u biljnim tkivima i organima biomase (Sultanbawa i Sultanbawa, 2023.).

5.1.5.1. Sadržaj makroelemenata u biomasi

Analizom biomase utvrđena je prisutnost makroelemenata Fe, Ca, K i Na, dok sadržaj Mg nije zabilježen zbog koncentracije niže od granice detekcije primijenjene analitičke metode.

Željezo je važan anorganski element u biomasi jer utječe na sastav pepela i ponašanje goriva tijekom termokemijske pretvorbe. U biomasi HRA sadržaj Fe iznosio je 37,13 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 3,00 do 71,46 mg/kg (Donata i sur., 2010.; Szczepkowski i Nicewicz, 2008.; Konovalova i sur., 2024.). Kod biomase KUK zabilježen je sadržaj Fe od 382,42 mg/kg, što je manje od literaturnih vrijednosti između 517,80 i 523,71 mg/kg (Darwish i sur., 2012.). U biomasi SOJ utvrđen je sadržaj Fe od 85,27 mg/kg, što je više od većine literaturnih vrijednosti od 9,12 do 82,09 mg/kg (Liu i sur., 2015.; Mungunkhuyag i sur., 2021.; Szostak i sur., 2020.; Tamangwa i sur., 2023.). Analizom biomase PŠE određen je sadržaj Fe od 134,55 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 70,00 i 1515,00 mg/kg (Jansen i sur., 1997.; Le i sur., 2014.; Wang i sur., 2016.; Terefe i sur., 2022.). Vrijednost sadržaja Fe u biomasi SUN iznosila je 174,59 mg/kg, što je više od literaturnih vrijednosti od 59,00 do 119,75 mg/kg (Moore, 1974.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Sumon, 2020.). Odstupanja sadržaja Fe kod biomasa KUK, SOJ i SUN mogu se povezati s različitim kapacitetom akumulacije ovog elementa u biljnom tkivu.

Kalcij je jedan od najzastupljenijih mineralnih elemenata u biomasi te može utjecati na sastav pepela i ponašanje biomase tijekom toplinske pretvorbe. U biomasi HRA sadržaj Ca iznosio je 449,95 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 125,10 do 620,00 mg/kg (André i Ponette, 2003.; Symanowicz i sur., 2018.; Puri i sur., 2024.; Jaozandry i sur., 2024.). Kod

biomase KUK zabilježena je vrijednost od 1428,25 mg/kg Ca, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 800,00 do 4100,00 mg/kg (Kocabiyik i sur., 2009.; Darwish i sur., 2012.). Za biomasu SOJ utvrđen je sadržaj Ca od 4835,69 mg/kg, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 2178,00 do 5600,00 mg/kg (Liu i sur., 2015.; Kahraman, 2022.; Tamangwa i sur., 2023.; Pant i sur., 2024.). Analizom biomase PŠE određen je sadržaj Ca od 2438,59 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 1689,00 do 5800,00 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Plazonić i sur., 2016.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Tufail i sur., 2018.; Terefe i sur., 2022.). Sadržaj Ca u biomasi SUN iznosio je 1865,05 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 780,00 do 8100,00 mg/kg (Sumon, 2020.; Geletukha i sur., 2020.; Gerassimova i sur., 2023.). Sadržaj Ca u svim analiziranim biomasama bio je unutar raspona vrijednosti zabilježenih u literaturi.

Kalij je jedan od najzastupljenijih mineralnih elemenata u biomasi te značajno utječe na ponašanje anorganskog dijela goriva tijekom toplinske pretvorbe. U biomasi HRA sadržaj K iznosio je 235,77 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 72,74 do 494,10 mg/kg (André i Ponette, 2003.; Symanowicz i sur., 2018.; Saletnik i sur., 2022.; Puri i sur., 2024.). U biomasi KUK zabilježena je vrijednost od 1459,54 mg/kg K, što je više od literaturnih vrijednosti između 140,88 i 1020,00 mg/kg (Darwish i sur., 2012.; Prasanthi i sur., 2017.). Za biomasu SOJ utvrđen je sadržaj K od 3436,72 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 2200,00 do 7740,04 mg/kg (Liu i sur., 2015.; Mungunkhuyag i sur., 2021.; Tamangwa i sur., 2023.; Adekiya i sur., 2024.). Analizom biomase PŠE određen je sadržaj K od 9778,60 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 4120,00 i 20720,00 mg/kg (Jansen i sur., 1997.; Dedovic i sur., 2012.; Plazonić i sur., 2016.; Tufail i sur., 2018.; Praspaliauskas i sur., 2020.). Vrijednost sadržaja K u biomasi SUN iznosila je 31683,92 mg/kg, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 27500,00 do 37400,00 mg/kg (Heuzé i sur., 2015.; Zhurka i sur., 2019.; Geletukha i sur., 2020.). Veći sadržaj K u biomasi KUK upućuje na veću akumulaciju ovog elementa u odnosu na vrijednosti zabilježene u većini literaturnih izvora.

Natrij je mineralni element koji može utjecati na ponašanje biomase tijekom toplinske pretvorbe, osobito na svojstva pepela i sklonost stvaranju taloga i naslaga. Stoga je njegov sadržaj važan pri procjeni uporabnih svojstava biomase u energetske sustavima. U biomasi HRA sadržaj Na iznosio je 97,26 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 14,50 do 100,00 mg/kg (Vansteenkiste i sur., 2007.; Donata i sur., 2010.; Valantinavičius i Vonžodas, 2014.). Biomasa KUK sadržavala je 174,65 mg/kg Na, što je više od literaturnih

vrijednosti između 30,90 i 96,40 mg/kg (Oktem, 2008.). U biomasi SOJ sadržaj Na iznosio je 185,99 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 16,00 do 690,78 mg/kg (Liu i sur., 2015.; Nti i sur., 2016.; Kahraman, 2022.). Biomasa PŠE sadržavala je 192,80 mg/kg Na, što je nešto više od većine literaturnih vrijednosti između 61,00 i 190,00 mg/kg (Jansen i sur., 1997.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Terefe i sur., 2022.; Said i sur., 2024.). U biomasi SUN sadržaj Na iznosio je 269,00 mg/kg, što je unutar vrlo širokog raspona literaturnih vrijednosti od 99,00 do 2770,00 mg/kg (Canavar i Kaptan, 2014.; Heuzé i sur., 2015.; Zhurka i sur., 2019.). Povećani sadržaj Na u biomasi KUK i PŠE upućuje na veću akumulaciju ovog elementa u odnosu na većinu literaturnih podataka.

5.1.5.2. Sadržaj mikroelemenata u biomasi

Analizom mikroelemenata utvrđena je prisutnost Mn, Ni i Cu, dok sadržaj Cd, Co, Cr, Pb i Zn nije utvrđen jer su njihove koncentracije bile ispod granice detekcije primijenjene analitičke metode.

Mangan može utjecati na sastav pepela i ponašanje biomase tijekom toplinske pretvorbe, a njegov sadržaj ovisi o vrsti biomase, sastavu tla i uvjetima uzgoja. U biomasi HRA sadržaj Mn iznosio je 10,66 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 3,32 do 114,22 mg/kg (Szczepkowski i Nicewicz, 2008.; Donata i sur., 2010.; Saletnik i sur., 2022.; Jaozandry i sur., 2024.). Biomasa KUK sadržavala je 45,37 mg/kg Mn, što je unutar vrlo širokog raspona literaturnih vrijednosti između 3,10 i 462,00 mg/kg (Oktem, 2008.; Darwish i sur., 2012.). U biomasi SOJ sadržaj Mn iznosio je 9,43 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 1,60 do 21,03 mg/kg (Liu i sur., 2015.; Nti i sur., 2016.; Kahraman, 2022.; Szostak i sur., 2020.). Biomasa PŠE sadržavala je 52,59 mg/kg Mn, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 10,00 i 101,00 mg/kg (Le i sur., 2014.; Plazonić i sur., 2016.; Wang i sur., 2016.; Terefe i sur., 2022.). U biomasi SUN sadržaj Mn iznosio je 15,40 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 10,30 do 55,90 mg/kg (Madejón i sur., 2003.; Canavar i Kaptan, 2014.; Sumon, 2020.). Utvrđeni sadržaji Mn bili su usporedivi s literaturnim vrijednostima za analizirane vrste biomase.

Nikal je mikroelement prisutan u biomasi u relativno malim koncentracijama, a njegov sadržaj ovisi o vrsti biomase, sastavu tla i uvjetima uzgoja. U procjeni mineralnog sastava važan je zbog mogućeg utjecaja na sastav pepela i ponašanje biomase tijekom toplinske pretvorbe. U biomasi HRA sadržaj Ni iznosio je 2,84 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 1,92 do 5,70 mg/kg (Konovalova i sur., 2024.; Saletnik i sur., 2022.). Biomasa KUK sadržavala je 4,32 mg/kg Ni, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 0,73 i 77,40

mg/kg (Kacálková i sur., 2014.; Nie i sur., 2015.; Antonkiewicz i sur., 2016.). U biomasi SOJ sadržaj Ni iznosio je 2,39 mg/kg, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 0,90 do 7,02 mg/kg (Sloss, 2010.; dos Reis i sur., 2017.; Mungunkhuyag i sur., 2021.). Biomasa PŠE sadržavala je 1,51 mg/kg Ni, što je neznatno manje od literaturnih vrijednosti između 1,57 i 1,84 mg/kg (Plazonić i sur., 2016.; Badawy i sur., 2023.). U biomasi SUN sadržaj Ni iznosio je 2,92 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,91 do 12,00 mg/kg (Kacálková i sur., 2014.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Zhurka i sur., 2019.). Utvrđeni sadržaji Ni uglavnom su bili u skladu s literaturnim vrijednostima, izuzev nešto niže vrijednosti kod PŠE.

Bakar je prisutan u biomasi u niskim koncentracijama, a njegov sadržaj može utjecati na mineralni sastav pepela i ponašanje biomase tijekom toplinske pretvorbe. U biomasi HRA sadržaj Cu iznosio je 3,67 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 1,18 do 16,02 mg/kg (Szczepkowski i Nicewicz, 2008.; Donata i sur., 2010.; Krutul i sur., 2014.). Biomasa KUK sadržavala je 3,60 mg/kg Cu, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 1,00 i 26,20 mg/kg (Oktem, 2008.; Darwish i sur., 2012.; Prasanthi i sur., 2017.). U biomasi SOJ sadržaj Cu iznosio je 2,34 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 1,40 do 15,08 mg/kg (Liu i sur., 2015.; Nti i sur., 2016.; Szostak i sur., 2020.; Mungunkhuyag i sur., 2021.). Biomasa PŠE sadržavala je 2,34 mg/kg Cu, što je manje od literaturnih vrijednosti od 3,00 do 8,00 mg/kg (Le i sur., 2014.; Plazonić i sur., 2016.; Wang i sur., 2016.; Terefe i sur., 2022.). U biomasi SUN sadržaj Cu iznosio je 8,78 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 2,90 i 47,75 mg/kg (Madejón i sur., 2003.; Heuzé i sur., 2015.; Canavar i Kaptan, 2014.; Sumon, 2020.). Niži sadržaj Cu kod pojedinih biomasa odražava manju akumulaciju ovog elementa u biljnom materijalu u odnosu na literaturne vrijednosti.

5.1.6. Ogrjevna vrijednost biomase

Ogrjevna vrijednost biomase, poznata i kao kalorijska vrijednost ili toplina izgaranja, predstavlja količinu energije koja se oslobađa tijekom potpunog izgaranja određene količine biomase, a najčešće se izražava kao GOV i DOV. Na ogrjevnu vrijednost značajno utječu elementarni i kemijski sastav, ponajprije udio C, H, O, pepela i vlage te udio celuloze, lignina i hemiceluloze. Stoga se među različitim vrstama biomase mogu javiti razlike u energetskeim svojstvima i toplinskoj vrijednosti goriva (Esteves i sur., 2023.).

Gornja i donja ogrjevna vrijednost važni su pokazatelji energetskog potencijala biomase jer određuju količinu topline koja se oslobađa tijekom izgaranja. U biomasi HRA vrijednost GOV iznosila je 19,25 MJ kg⁻¹, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 18,60 do 20,33 MJ kg⁻¹ (Vasileios i sur., 2018.; Šafran i sur., 2018.; Núñez-Retana i sur., 2019.; Dragusanu i sur.,

2023.). Biomasa KUK imala je GOV od $18,52 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između $15,40$ i $18,52 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Boundy i sur., 2011.; Zhang i sur., 2012a.; Matin i sur., 2016.; Kontek i sur., 2021.). U biomasi SOJ vrijednost GOV iznosila je $18,60 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od $17,59$ do $18,74 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Matin i sur., 2018.; Jarunglumert i sur., 2022.; Agnihotri i Mondal, 2024.). Biomasa PŠE imala je GOV od $17,81 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između $16,20$ i $18,94 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Krička, 2010.; Boundy i sur., 2011.; Zhang i sur., 2012a.; Nath i sur., 2023.). U biomasi SUN vrijednost GOV iznosila je $17,74 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od $17,44$ do $18,70 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Geletukha i sur., 2020.; Martínez-Cartas i sur., 2024.; Kindzera i Kochubei, 2025.).

Biomasa HRA imala je DOV od $17,78 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je nešto više od literaturnih vrijednosti između $17,17$ i $17,47 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Krička, 2010.; Matin i sur., 2024.; CFNielsen, 2025.). DOV biomase KUK iznosio je $17,03 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od $16,20$ do $17,69 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Boundy i sur., 2011.; Krička i sur., 2012.; Matin i sur., 2016.; Kontek i sur., 2021.). Biomasa SOJ imala je DOV od $17,11 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između $15,75$ i $17,85 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Krička i sur., 2012.; Matin i sur., 2018.). DOV biomase PŠE iznosio je $16,37 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od $14,63$ do $17,66 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Boundy i sur., 2011.; Krička, 2010.; Said i sur., 2024.). Biomasa SUN imala je DOV od $16,25 \text{ MJ kg}^{-1}$, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između $16,00$ i $17,19 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Ünal i Alibaş, 2006.; Geletukha i sur., 2020.). Utvrđene vrijednosti GOV i DOV bile su uglavnom usporedive s literaturnim podacima te potvrđuju da analizirane biomase imaju dobar energetske potencijal za primjenu kao kruto biogorivo.

5.2. Ponderirani proračun analiziranih svojstava mješavina biomase

Nakon pripreme mješavina biomase hrasta s biomasom poljoprivrednih kultura (soja, kukuruz, suncokret i pšenica) u tri masena omjera ($75:25$, $50:50$ i $25:75$), provedena je usporedba analiziranih i teorijskih vrijednosti pojedinih svojstava mješavina dobivenih metodom ponderiranog proračuna. Analiza je obuhvatila fizikalno-kemijska svojstva, elementarni, kemijski i mineralni sastav te ogrjevnu vrijednost mješavina biomase. Vrijednosti ΔY i $\%E$ korištene su za procjenu odstupanja između analiziranih i teorijskih vrijednosti te ocjenu uspješnosti primijenjenog modela. Rezultati ponderiranog proračuna za pojedina analizirana svojstva prikazani su u nastavku.

5.2.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava mješavina biomase

Kod fizikalno-kemijskih svojstava u ΔY prevladavao je ANU, osobito kod NG i vlage, dok su kod koksa i udjela C_{fix} zabilježeni izraženiji SIU. Kod pepela i udjela HT također je dominantan

bio ANU, uz manji udio SIU. Promatrajući %E, većina analiziranih svojstava pokazivala je ADU ili MO. Kod NG i udjela HT svi uzorci pripadali su kategoriji ADU, dok su kod vlage, pepela i udjela C_{fix} zabilježeni ADU i MO. Ukupno, fizikalno-kemijska svojstva pokazivala su prevladavajući ANU u ΔY , uz visoku zastupljenost ADU prema %E vrijednostima. Dobiveni rezultati potvrđuju uspješnost ponderiranog proračuna u procjeni većine analiziranih fizikalno-kemijskih svojstava.

5.2.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava mješavina biomase

Kod elementarnog sastava u ΔY prevladavao je ANU, osobito kod udjela C i S, dok je kod udjela O dominantan bio SIU. Kod H i N zabilježena je kombinacija SIU i ANU, uz manji udio ADU. Promatrajući %E, većina analiziranih svojstava pokazivala je ADU, dok su kod udjela N i S bila prisutna i MO. Općenito, elementarni sastav karakterizirao je prevladavajući ANU u ΔY , uz visoku zastupljenost ADU prema %E vrijednostima. Navedeni rezultati pokazuju da su, unatoč prisutnim interakcijama između komponenti mješavina, teorijske vrijednosti uglavnom dobro opisivale analizirani elementarni sastav.

5.2.2.1. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera mješavina biomase

Kod H/C i O/C omjera u ΔY prevladavao je SIU, osobito kod H/C omjera, dok je kod O/C omjera zabilježen manji udio ANU i ADU. Promatrajući %E, svi analizirani uzorci pripadali su kategoriji ADU. Potpuna zastupljenost ADU prema %E ukazuje na vrlo dobru uspješnost ponderiranog proračuna u procjeni H/C i O/C omjera mješavina biomase.

5.2.3. Ponderirani proračun kemijskog sastava mješavina biomase

Kod kemijskih svojstava u ΔY celuloze prevladavao je ANU, dok je kod lignina dominantan bio SIU. Hemiceluloza je pokazivala kombinaciju SIU i ANU, dok su kod ET svi uzorci pokazivali ADU. Promatrajući %E, kod celuloze je prevladavao ADU, kod lignina su ADU i MO bili podjednako zastupljeni, dok je kod hemiceluloze i ET dominantan bio MO. Ukupno gledano, strukturna svojstva pokazivala su prevladavajući ANU u ΔY , dok su kod %E prevladavali ADU i MO. Prevladavanje ADU i MO ukazuje na umjerenu uspješnost ponderiranog proračuna u procjeni strukturnih svojstava mješavina biomase.

5.2.4. Ponderirani proračun mineralnog sastava mješavina biomase

Kod makroelemenata u ΔY prevladavao je ANU, osobito kod Fe i Ca, dok su kod K i Na zabilježene kombinacije SIU i ANU. Promatrajući %E, dominantan je bio MO, pri čemu su kod Fe i Na svi uzorci pripadali toj kategoriji. Kod Ca i K zabilježen je manji udio ZO, dok je ADU bio prisutan samo kod manjeg broja uzoraka za K. Općenito, makroelementi su pokazivali prevladavajući ANU u ΔY te dominantan MO prema %E. Prevladavanje MO upućuje na

umjerenu uspješnost ponderiranog proračuna u procjeni sadržaja makroelemenata u mješavinama biomasa.

Sličan trend zabilježen je i kod mikroelemenata, iako su između pojedinih elemenata utvrđene određene razlike u intenzitetu odstupanja. Kod svih analiziranih mikroelemenata u ΔY prevladavao je ANU. Promatrajući %E, kod Ni i Cu svi uzorci pokazivali su MO, dok je kod Mn dominantno bio prisutan MO, uz manji udio ADU i ZO. Ukupno gledano, mikroelementi su pokazivali izražen ANU u ΔY te prevladavajući MO prema %E. Dobivena raspodjela odstupanja pokazuje da je model uspješnije opisivao opće trendove promjena mikroelemenata nego njihove apsolutne vrijednosti.

5.2.5. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti mješavine biomase

Kod parametara GOV i DOV u ΔY prevladavao je ANU, dok je manji dio uzoraka pokazivao SIU. Promatrajući %E, svi analizirani uzorci pripadali su kategoriji ADU. Potpuna zastupljenost ADU pokazuje da je ponderirani proračun vrlo uspješno procijenio ogrjevna svojstva mješavina biomase.

5.3. Analizirana svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Energetska svojstva peleta, uključujući fizikalno-kemijska i mehanička svojstva, elementarni, strukturni i mineralni sastav te ogrjevnju vrijednost, značajno utječu na proces izgaranja određujući zapaljivost goriva, temperaturu plamena, učinkovitost pretvorbe energije i nastanak emisija. Zahvaljujući visokoj gustoći energije i relativno niskim emisijama štetnih plinova, peleti su prikladni za proizvodnju toplinske energije u pećima i kotlovima. Njihova standardizirana svojstva omogućuju stabilnu toplinsku snagu, precizno doziranje goriva i automatizirano loženje, čime se povećavaju učinkovitost i ekonomičnost sustava grijanja. U odnosu na fosilna goriva, peleti se smatraju ekološki prihvatljivijom alternativom zbog nižih emisija CO₂ i drugih onečišćujućih tvari tijekom izgaranja (Ibitoye i sur., 2023.).

5.3.1. Fizikalno-kemijska svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Fizikalno-kemijska svojstva peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa obuhvaćaju udio vlage, pepela, koksa, Cfix, HT te PG i NG peleta. Na njih utječu svojstva sirovine, kemijski sastav i struktura biomase te procesni uvjeti tijekom proizvodnje peleta. Određenu varijabilnost mogu uzrokovati i uvjeti skladištenja i transporta, zbog čega su manja odstupanja u odnosu na literaturne podatke očekivana.

5.3.1.1. Pojedinačna i nasipna gustoća peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Veća PG i NG pridonose povećanju energetske gustoće peleta, čime se poboljšavaju uvjeti skladištenja, transporta i rukovanja. Veća gustoća omogućuje pohranu veće količine energije u istom volumenu, zbog čega su peleti učinkovitije biogorivo u odnosu na rastresitu biomasu (Yang i sur., 2025.). Međutim, izrazito visoka PG može nepovoljno utjecati na proces izgaranja jer smanjena poroznost peleta otežava difuziju kisika i može dovesti do nepotpunog izgaranja. Iako PG nije propisana normama za pelete, u literaturi se najčešće navode vrijednosti između 1000,00 i 1400,00 kg/m³, s prosjekom oko 1200,00 kg/m³ (Tarasov i sur., 2013.). NG peleta definirana je normom HRN EN ISO 17225 te se najčešće kreće između 600,00 i 750,00 kg/m³. Pelet HRA imao je PG od 1255,90 kg/m³, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 1246,00 i 1296,30 kg/m³ (Dragusanu i sur., 2023.; Núñez-Retana i sur., 2020.). Pelet KUK imao je PG od 1277,59 kg/m³, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 1133,00 do 1343,81 kg/m³ (Tumuluru, 2018.; Voicu, 2018.; Gholami Banadkoki i sur., 2025.). U peletu SOJ PG iznosila je 1210,04 kg/m³, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 1200,00 i 1301,00 kg/m³ (Gholami Banadkoki i sur., 2025.; NRCT, 2025.). Pelet PŠE imao je PG od 1223,36 kg/m³, što je više od literaturnih vrijednosti između 892,83 i 1214,00 kg/m³ (Lu i sur., 2013.; Spirchez i sur., 2019.; Agu i sur., 2021.; Lisowski i sur., 2020.; Voicu, 2018.). U peletu SUN PG iznosila je 1305,56 kg/m³, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 879,00 do 1400,00 kg/m³ (Lunguleasa i sur., 2024.; Faricon, 2025.). Neznatno odstupanje kod peleta PŠE vjerojatno je povezano s razlikama u uvjetima prešanja i zbijenosti strukture peleta.

Nasipna gustoća peleta HRA iznosila je 687,33 kg/m³, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 557,00 i 742,50 kg/m³ (Miranda i sur., 2012.; Núñez-Retana i sur., 2020.; Horabik i sur., 2021.). Pelet KUK imao je NG od 682,60 kg/m³, što je više od literaturnih vrijednosti između 469,10 i 645,00 kg/m³ (Theerarattananoon i sur., 2011.; Djatkov i sur., 2018.; Voicu, 2018.; Chen i sur., 2023.). U peletu SOJ NG je iznosila 691,90 kg/m³, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 601,00 do 808,57 kg/m³ (Scatolino i sur., 2018.; NRCT, 2025.; Udakwar i Sarode, 2023.). Pelet PŠE imao je NG od 672,43 kg/m³, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 534,00 i 694,00 kg/m³ (Voicu, 2018.; Gievers i sur., 2024.; Stolarski i sur., 2025.; Pradhan i sur., 2025.). U peletu SUN NG je iznosila 684,57 kg/m³, što je više od većine literaturnih vrijednosti od 550,00 do 650,00 kg/m³ (Pellets.kz, 2022.; Reix i sur., 2021.; Faricon, 2025.). Povećane vrijednosti NG kod peleta KUK i SUN upućuju na učinkovitije zbijanje čestica tijekom procesa prešanja.

5.3.1.2. Udio vlage peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Udio vlage u peletima ima važnu ulogu u određivanju njihove kvalitete i uporabnih svojstava. Tijekom prešanja vlaga pridonosi povezivanju čestica te može pozitivno utjecati na čvrstoću i trajnost peleta do optimalne razine. Međutim, prekomjeren udio vlage u sirovini može otežati proces prešanja, smanjiti PG peleta te nepovoljno utjecati na njihovu mehaničku stabilnost i učinkovitost izgaranja, dok prenizak udio vlage može povećati njihovu krhkost (Scott i sur., 2025.). U peletu HRA udio vlage bio je 8,05%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 5,00 do 11,40% (Pazó i sur., 2010.; Telmo i Lousada, 2011a.; Miranda i sur., 2015.; Stolarski i sur., 2022.; Jiménez-Mendoza i sur., 2025.). Pelet KUK imao je 10,59% vlage, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 8,79 do 12,18% (Xing i sur., 2018.; Jiang i sur., 2020.; Voicu, 2018.; Petlickaitė i sur., 2023.). U peletu SOJ udio vlage iznosio je 10,52%, što je više od literaturnih vrijednosti između 6,43 i 9,03% (Scatolino i sur., 2018.; Zhang i sur., 2020.; Jagtap i Kalbande, 2022.; Udakwar i Sarode, 2023.). Pelet PŠE imao je 8,60% vlage, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 7,58 do 9,57% (Voicu, 2018.; Elbl i sur., 2019.; Stolarski i sur., 2025.; Rupasinghe i sur., 2023.). U peletu SUN udio vlage bio je 10,22%, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 5,10 do 11,23% (Cui i sur., 2019.; Demirel i sur., 2020.; Islamova i sur., 2021.; Lunguleasa i sur., 2024.). Povećani udio vlage kod peleta SOJ može se povezati s većim zadržavanjem vode u materijalu tijekom pripreme i prešanja.

5.3.1.3. Udio pepela peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Udio pepela u peletima jedan je od ključnih pokazatelja njihove kvalitete, osobito pri primjeni u sustavima izgaranja. Povećani udio pepela može nepovoljno utjecati na proces izgaranja, smanjiti uporabnu vrijednost goriva te povećati troškove održavanja sustava zbog stvaranja većih količina ostataka nakon izgaranja, kao i zbog taloženja i začepljenja u ložištima, plamenicima i izmjenjivačima topline (Rupasinghe i sur., 2023.). U peletu HRA udio pepela iznosio je 0,22%, što je manje od literaturnih vrijednosti od 0,32 do 0,69% (Pazó i sur., 2010.; Núñez-Retana i sur., 2020.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Stolarski i sur., 2022.; Dragusanu i sur., 2023.; Matijašević i sur., 2025.). Pelet KUK imao je 3,38% pepela, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 0,70 do 13,00% (Sulaiman i sur., 2019.; Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.; Toscano i sur., 2023.). U peletu SOJ udio pepela iznosio je 3,44%, što je manje od literaturnih vrijednosti od 5,00 do 10,18% (Zhang i sur., 2020.; Udakwar i Sarode, 2023.; Jagtap i Kalbande, 2023.). Pelet PŠE imao je 6,44% pepela, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 4,59 do 8,50% (Elbl i sur., 2019.; Agu i sur., 2021.; Lu i sur., 2013.; Nath i sur., 2023.; Pradhan i sur., 2025.). U peletu SUN udio pepela iznosio je 12,29%, što je više od literaturnih vrijednosti od 4,14 do 6,00% (Verma i sur., 2009.; Zardzewiały i sur., 2023.);

Lunguleasa i sur., 2024.). Veći udio pepela kod peleta SUN upućuje na veću zastupljenost mineralnih tvari u odnosu na vrijednosti zabilježene u literaturi.

5.3.1.4. Udio fiksiranog ugljika peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Fiksirani ugljik predstavlja gorivi kruti ostatak koji izravno doprinosi energetske vrijednosti goriva, osobito tijekom faze žarenja pri izgaranju. Pelet HRA imao je 13,40% C_{fix} , što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 6,65 do 22,83% (Pazó i sur., 2010.; Núñez-Retana i sur., 2020.; Stolarski i sur., 2022.; Jiménez-Mendoza i sur., 2025.). U peletu KUK udio C_{fix} iznosio je 10,77%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 3,59 do 17,80% (Sulaiman i sur., 2019.; Xing i sur., 2018.; Jiang i sur., 2020.; Ronoh i sur., 2025.). Pelet SOJ imao je 10,16% C_{fix} , što je nešto manje od dostupnih literaturnih vrijednosti između 10,81 i 13,34% (Scatolino i sur., 2018.; Jagtap i Kalbande, 2022.; Udakwar i Sarode, 2023.). U peletu PŠE udio C_{fix} iznosio je 8,10%, što je manje od literaturnih vrijednosti od 8,58 do 20,90% (Nath i sur., 2023.; Stolarski i sur., 2025.; Pradhan i sur., 2025.). Pelet SUN imao je 6,00% C_{fix} , što je manje od literaturnih vrijednosti od 12,50 do 19,20% (Islamova i sur., 2021.; Lunguleasa i sur., 2024.). Niži udjeli C_{fix} kod peleta SOJ, PŠE i SUN ukazuju na manju količinu ugljičnog ostatka nakon termičke razgradnje biomase.

5.3.1.5. Udio koksa peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Udio koksa predstavlja ukupni kruti ostatak koji zaostaje nakon izdvajanja hlapivih tvari tijekom zagrijavanja biomase te ima važnu ulogu u fazi žarenja pri izgaranju. Veći udio koksa povezan je s većom energetske stabilnošću goriva i duljim vremenom izgaranja. Budući da udio koksa kod peleta nije izravno naveden u većini dostupnih literaturnih izvora, njegova je vrijednost procijenjena kao zbroj udjela C_{fix} i pepela, čime se određuje ukupni kruti ostatak nakon zagrijavanja biomase bez prisutnosti kisika. U peletu HRA udio koksa iznosio je 14,81%, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 7,16 i 23,40% dobivenih proračunom iz dostupnih podataka (Pazó i sur., 2010.; Núñez-Retana i sur., 2020.; Stolarski i sur., 2022.; Jiménez-Mendoza i sur., 2025.). Pelet KUK imao je 15,82% koksa, što je manje od literaturnih vrijednosti između 18,50 i 23,60% (Sulaiman i sur., 2019.; Jiang i sur., 2020.). Pelet SOJ sadržavao je 15,19% koksa, što je manje od literaturnih vrijednosti od 21,63 do 21,79% (Jagtap i Kalbande, 2022.; Udakwar i Sarode, 2023.). U peletu PŠE udio koksa iznosio je 15,91%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 15,67 i 25,80% (Nath i sur., 2023.; Pradhan i sur., 2025.). Pelet SUN sadržavao je 20,37% koksa, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 15,10 do 23,50% (Islamova i sur., 2021.; Lunguleasa i sur., 2024.).

Niže vrijednosti koksa kod peleta KUK i SOJ odražavaju manji udio ukupnog krutog ostatka nakon izdvajanja hlapivih tvari.

5.3.1.6. Udio hlapljivih tvari peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Udio hlapljivih tvari u peletima značajno utječe na proces izgaranja jer veći udio olakšava paljenje i ubrzava razvoj plamena. Osim toga, udio HT utječe na dinamiku izgaranja i sastav plinovitih produkata. Pelet HRA imao je 78,33% HT, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 73,05 do 90,64% (Pazó i sur., 2010.; Núñez-Retana i sur., 2020.; Stolarski i sur., 2022.; Jiménez-Mendoza i sur., 2025.). U peletu KUK udio HT iznosio je 75,26%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 73,14 do 80,00% (Voicu, 2018.; Sulaiman i sur., 2019.; Zhang i sur., 2023.). Pelet SOJ imao je 75,88% HT, što je više od literaturnih vrijednosti od 62,47 do 71,78% (Scatolino i sur., 2018.; Jagtap i Kalbande, 2022.; Udakwar i Sarode, 2023.). U peletu PŠE udio HT iznosio je 76,86%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 74,20 do 76,92% (Voicu, 2018.; Stolarski i sur., 2025.; Pradhan i sur., 2025.; Nath i sur., 2024.). Pelet SUN imao je 71,49% HT, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 47,00 do 79,80% (Demirbaş, 2003.; Islamova i sur., 2021.; Zardzewiały i sur., 2023.; Gehre i sur., 2024.; Lunguleasa i sur., 2024.). Povećani udio HT kod peleta SOJ upućuje na veću zastupljenost lako hlapljivih organskih komponenti biomase u odnosu na literaturne podatke.

5.3.2. Elementarni sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Elementarni sastav peleta značajno utječe na njihova energetska svojstva jer udjeli C i H izravno pridonose ogrjevnoj vrijednosti goriva. S druge strane, veći udjeli N, O i S mogu smanjiti energetska učinkovitost te utjecati na emisijska svojstva tijekom izgaranja (Harun i Afzal, 2015.). Razlike između analiziranih i literaturnih vrijednosti elementarnog sastava peleta mogu se povezati sa svojstvima sirovine i zastupljenošću pojedinih strukturnih sastavnica biomase. S obzirom na prirodnu varijabilnost biomase, određena odstupanja u odnosu na literaturne podatke smatraju se očekivanim.

5.3.2.1. Udio ugljika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Udio ugljika u elementarnom sastavu peleta važan je pokazatelj njihovih energetskih svojstava jer veći udio C pridonosi većoj ogrjevnoj vrijednosti goriva. Stoga se smatra jednim od ključnih parametara pri procjeni energetskog potencijala peleta. U peletu HRA udio C iznosio je 45,53%, što je manje od literaturnih vrijednosti između 49,72 i 55,89% (Miranda i sur., 2015.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Saletnik i sur., 2021.; Stolarski i sur., 2022.; Saletnik i sur., 2022.). Pelet KUK imao je 42,58% C, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 40,02 do 48,57% (Xing i sur., 2018.; Sulaiman i sur., 2019.; Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.). U peletu

SOJ udio C iznosio je 42,49%, što je više od literaturnih vrijednosti od 38,38 do 40,38% (Santana i sur., 2021.; Udakwar i Sarode, 2023.). Pelet PŠE sadržavao je 41,82% C, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 41,70 i 47,40% (Elbl i sur., 2019.; Nath i sur., 2024.; Stolarski i sur., 2025.; Pradhan i sur., 2025.). U peletu SUN udio C iznosio je 39,86%, što je manje od literaturnih vrijednosti između 44,25 i 49,00% (Islamova i sur., 2021.; Matula i sur., 2023.; Zardzewiały i sur., 2023.; Lunguleasa i sur., 2024.; Zlateva i sur., 2025.). Veći udio C kod peleta SOJ upućuje na veći energetski potencijal, dok niže vrijednosti kod peleta HRA i SUN ukazuju na manji doprinos ugljika ogrjevnoj vrijednosti goriva.

5.3.2.2. Udio vodika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Udio vodika u elementarnom sastavu peleta utječe na njihova energetska svojstva jer veći udio pridonosi povećanju ogrjevnog vrijednosti goriva i važan je parametar pri procjeni energetskog potencijala peleta. Pelet HRA sadržavao je 6,23% H, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 5,77 do 6,72% (Miranda i sur., 2015.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Saletnik i sur., 2021.; Stolarski i sur., 2022.; Saletnik i sur., 2022.). U peletu KUK udio H iznosio je 6,20%, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 5,51 do 6,23% (Xing i sur., 2018.; Sulaiman i sur., 2019.; Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.). Pelet SOJ sadržavao je 6,30% H, što je više od literaturnih vrijednosti od 5,51 do 5,80% (Santana i sur., 2021.; Udakwar i Sarode, 2023.). U peletu PŠE udio H iznosio je 6,11%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 5,41 do 6,30% (Elbl i sur., 2019.; Nath i sur., 2024.; Stolarski i sur., 2025.; Pradhan i sur., 2025.). Pelet SUN imao je 5,76% H, što je manje od literaturnih vrijednosti od 5,92 do 6,50% (Islamova i sur., 2021.; Zardzewiały i sur., 2023.; Lunguleasa i sur., 2024.; Zlateva i sur., 2025.). Iako su kod peleta SOJ i SUN utvrđena odstupanja od literaturnih vrijednosti, udio H u svim analiziranim peletima bio je unutar raspona tipičnog za lignoceluloznu biomasu.

5.3.2.3. Udio dušika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Udio dušika u elementarnom sastavu peleta važan je pokazatelj kvalitete goriva jer veći udio N može pridonijeti povećanim emisijama NO_x tijekom izgaranja. U peletu HRA udio N iznosio je 0,10%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,04 do 0,55% (Saletnik i sur., 2022.; Stolarski i sur., 2022.; Stulpinaite i sur., 2023.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Rashedi i sur., 2022.). Pelet KUK imao je 0,58% N, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 0,26 do 1,12% (Sulaiman i sur., 2019.; Xing i sur., 2018.; Petlickaitė i sur., 2023.; Jiang i sur., 2020.). U peletu SOJ udio N iznosio je 0,60%, što je manje od većine literaturnih vrijednosti između 0,66 i 4,88% (Santana i sur., 2021.; Udakwar i Sarode, 2023.). Pelet PŠE sadržavao je 0,38% N, što je manje od literaturnih vrijednosti od 0,53 do 0,76% (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.;

Elbl i sur., 2019.; Nath i sur., 2024.; Stolarski i sur., 2025.; Pradhan i sur., 2025.). U peletu SUN udio N iznosio je 0,69%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,52 do 1,17% (Cui i sur., 2019.; Islamova i sur., 2021.; Matula i sur., 2023.; Zlateva i sur., 2025.). Niži udjeli N u peletima SOJ i PŠE mogu pridonijeti manjem potencijalu za nastanak NO_x tijekom izgaranja.

5.3.2.4. Udio kisika u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Udio kisika u elementarnom sastavu peleta utječe na njihova energetska svojstva jer veći udio O obično smanjuje ogrjevnost goriva. Pelet HRA imao je 48,04% O, što je više od literaturnih vrijednosti od 31,99 do 44,12% (Jasinskas i sur., 2015.; Praspaliauskas i sur., 2020.; Stolarski i sur., 2022.). U peletu KUK udio O iznosio je 50,51%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 41,53 do 52,86% (Sulaiman i sur., 2019.; Xing i sur., 2018.; Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.). Pelet SOJ sadržavao je 50,50% O, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 24,31 do 53,16% (Santana i sur., 2021.; Udakwar i Sarode, 2023.). U peletu PŠE udio O iznosio je 51,58%, što je više od literaturnih vrijednosti od 45,73 do 50,11% (Nath i sur., 2024.; Stolarski i sur., 2025.; Pradhan i sur., 2025.). Pelet SUN imao je 53,50% O, što je više od literaturnih vrijednosti od 42,33 do 49,10% (Islamova i sur., 2021.; Matula i sur., 2023.; Zlateva i sur., 2025.). Povećani udjeli O kod peleta HRA, PŠE i SUN mogu pridonijeti nižoj ogrjevnoj vrijednosti u odnosu na vrijednosti očekivane prema literaturnim podacima.

5.3.2.5. Udio sumpora u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Udio sumpora u elementarnom sastavu peleta važan je pokazatelj uporabne i okolišne kvalitete goriva jer utječe na koncentraciju SO₂ u dimnim plinovima tijekom izgaranja. Stoga je udio S važan pri procjeni uporabnih i okolišnih svojstava peleta. U peletu HRA udio S iznosio je 0,10%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,01 do 0,10% (Miranda i sur., 2015.; Stolarski i sur., 2022.; Stulpinaite i sur., 2023.; Rashedi i sur., 2022.). Pelet KUK imao je 0,14% S, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,06 do 1,02% (Xing i sur., 2018.; Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.; Suleiman i sur., 2019.). U peletu SOJ udio S iznosio je 0,11%, što je manje od literaturnih vrijednosti od 0,20 do 0,40% (Santana i sur., 2021.; Udakwar i Sarode, 2023.). Pelet PŠE sadržavao je 0,11% S, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,07 do 0,11% (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Elbl i sur., 2019.; Nath i sur., 2024.; Stolarski i sur., 2025.). U peletu SUN udio S iznosio je 0,19%, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 0,09 do 0,20% (Matula i sur., 2023.; Cui i sur., 2019.; Zlateva i sur., 2025.; BTA, 2025.). Niži udio sumpora u peletu SOJ povoljan je s aspekta emisija sumpornih spojeva tijekom izgaranja.

5.3.2.6. H/C i O/C omjer peleta od pojedinačnih vrsta biomase

H/C i O/C omjeri važni su pokazatelji energetske kvalitete peleta jer odražavaju njihov elementarni sastav. Veći H/C omjer povezan je s povoljnijim energetske svojstvima, dok veći O/C omjer najčešće upućuje na nižu ogrjevnu vrijednost goriva (Borges i sur., 2025.). Budući da su literaturni podaci o H/C i O/C omjerima peleta ograničeni, njihove vrijednosti izračunate su na temelju objavljenih podataka o elementarnom sastavu primjenom odgovarajućih jednadžbi. Pelet HRA imao je H/C omjer 1,63 i O/C omjer 0,79, što je više od literaturnih vrijednosti, gdje se H/C kreće između 1,36 i 1,49, a O/C između 0,60 i 0,64 (Miranda i sur., 2015.; Stolarski i sur., 2022.). Kod peleta KUK H/C omjer iznosio je 1,74, a O/C omjer 0,89, što je više od literaturnih vrijednosti, gdje H/C iznosi između 1,44 i 1,66, a O/C između 0,68 i 0,75 (Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.). Pelet SOJ imao je H/C omjer 1,77 i O/C omjer 0,89. H/C omjer bio je viši od literaturnih vrijednosti od 1,72, dok se O/C omjer nalazio unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 0,48 i 0,99 (Santana i sur., 2021.; Udakwar i Sarode, 2023.). Kod peleta PŠE H/C omjer iznosio je 1,74, a O/C omjer 0,93, što je više od literaturnih vrijednosti, gdje H/C iznosi između 1,60 i 1,71, a O/C između 0,79 i 0,80 (Miranda i sur., 2015.; Nath i sur., 2024.). Pelet SUN imao je H/C omjer 1,72 i O/C omjer 1,01. H/C omjer nalazio se unutar raspona literaturnih vrijednosti između 1,64 i 1,82, dok je O/C omjer bio veći od literaturnih vrijednosti od 0,58 do 0,70 (Islamova i sur., 2021.; Kluska i sur., 2024.). Povećani O/C omjeri kod većine analiziranih peleta upućuju na nešto manje povoljan teorijski energetski potencijal u odnosu na vrijednosti zabilježene u literaturi.

5.3.3. Kemijski sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Kemijski sastav peleta, odnosno udio celuloze, hemiceluloze i lignina, značajno utječe na njihova energetska svojstva. Celuloza i hemiceluloza sadrže veći udio kisika te se termički razgrađuju pri nižim temperaturama, dok lignin sadrži veći udio ugljika i izraženiju aromatsku strukturu, zbog čega pridonosi većoj ogrjevnoj vrijednosti i energetske gustoći goriva. Veći udio lignina također može povoljno utjecati na MI peleta i njihovu stabilnost tijekom skladištenja (Wang i sur., 2021.).

5.3.3.1. Udio celuloze u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Celuloza je najzastupljenija strukturna polisaharidna komponenta lignocelulozne biomase i ima važnu ulogu u toplinskom ponašanju peleta tijekom termokemijske pretvorbe. Njezin udio utječe na reaktivnost goriva i odnos prema ostalim strukturnim komponentama. U peletu HRA udio celuloze iznosio je 49,11%, što je više od literaturnih vrijednosti od 40,00 do 46,08% (Karunanithy i sur., 2012.; Dragusanu i sur., 2023.; Kwmach, 2025.). Pelet KUK imao je

51,61% celuloze, što je više od dostupne literaturne vrijednosti od 38,40% (Karunanithy i sur., 2012.), dok u odnosu na izvornu biomasu nisu utvrđene značajnije promjene udjela celuloze nakon prešanja. Pelet SOJ sadržavao je 48,03% celuloze, no zbog nedostatka relevantnih literaturnih podataka usporedba s prethodnim istraživanjima nije bila moguća. U odnosu na izvornu biomasu također nisu utvrđene značajnije promjene udjela celuloze nakon prešanja. U peletu PŠE udio celuloze iznosio je 48,17%, što je više od literaturnih vrijednosti od 41,30 do 42,50% (Lu i sur., 2013.; Nath i sur., 2024.; Pradhan i sur., 2025.). Pelet SUN imao je 47,85% celuloze, što je nešto više od dostupne literaturne vrijednosti od 46,40% (Islamova i sur., 2023.), dok su u odnosu na izvornu biomasu vrijednosti bile gotovo identične. Povećani udjeli celuloze kod većine analiziranih peleta upućuju na veću zastupljenost strukturnih ugljikohidrata u odnosu na literaturne podatke.

5.3.3.2. Udio lignina u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Lignin je važna strukturna komponenta peleta jer zbog većeg udjela C i aromatske građe pridonosi većoj ogrjevnoj vrijednosti goriva. Osim toga, može povećati mehaničku izdržljivost peleta i njihovu stabilnost tijekom skladištenja. U peletu HRA udio lignina iznosio je 24,12%, što je više od literaturnih vrijednosti između 20,00 i 22,10% (Wilson, 2010.; Dragusanu i sur., 2023.; Kwmach, 2025.). Pelet KUK imao je 18,03% lignina, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 16,15 do 21,90% (Karunanithy i sur., 2012.; Chen i sur., 2023.; Gholami Banadkoki i sur., 2025.). U peletu SOJ udio lignina iznosio je 20,17%, što je više od dostupne literaturne vrijednosti od 15,42% (Gholami Banadkoki i sur., 2025.), pri čemu nisu utvrđene izraženije promjene u odnosu na biomasu. Pelet PŠE sadržavao je 20,41% lignina, što je znatno više od literaturnih vrijednosti između 4,70 i 12,26% (Lu i sur., 2013.; Nath i sur., 2024.; Pradhan i sur., 2025.). U peletu SUN udio lignina iznosio je 18,83%, što je nešto više od dostupne literaturne vrijednosti od 17,10% (Islamova i sur., 2023.), dok je nakon prešanja zabilježeno blago smanjenje udjela lignina u odnosu na biomasu. Kod većine analiziranih peleta povećani udjeli lignina mogu pozitivno utjecati na MI te pridonijeti povoljnijim energetskim svojstvima.

5.3.3.3. Udio hemiceluloze u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Hemiceluloza je strukturni polisaharid koji, uz celulozu i lignin, čini važan dio lignocelulozne biomase te utječe na toplinsko ponašanje peleta tijekom termokemijske pretvorbe. Zbog manje toplinske stabilnosti u odnosu na lignin, njezin udio povezan je s reaktivnošću goriva tijekom zagrijavanja. Pelet HRA sadržavao je 16,82% hemiceluloze, što je manje od literaturnih vrijednosti od 25,00 do 25,12% (Dragusanu i sur., 2023.; Kwmach, 2025.). U peletu KUK udio

hemiceluloze iznosio je 19,92%, no zbog nedostatka dostupnih literaturnih podataka usporedba s drugim istraživanjima nije bila moguća. U odnosu na izvornu biomasu nisu utvrđene značajnije promjene udjela hemiceluloze nakon prešanja. Pelet SOJ sadržavao je 22,58% hemiceluloze, no zbog nedostatka relevantnih literaturnih podataka usporedba također nije bila moguća. Dobivene vrijednosti upućuju na vrlo sličan udio hemiceluloze u biomasi i peletu. U peletu PŠE udio hemiceluloze iznosio je 17,32%, što je manje od literaturnih vrijednosti od 22,40 do 31,80% (Lu i sur., 2013.; Nath i sur., 2024.; Pradhan i sur., 2025.). Pelet SUN imao je 16,54% hemiceluloze, što je znatno manje od dostupne literaturne vrijednosti od 31,60% (Islamova i sur., 2023.), dok je u odnosu na izvornu biomasu zabilježeno povećanje udjela hemiceluloze nakon prešanja. Manji udjeli hemiceluloze kod peleta HRA, PŠE i SUN praćeni su relativno većim udjelima celuloze i lignina.

5.3.3.4. Udio ekstraktivnih tvari u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Udio ekstraktivnih tvari važan je pokazatelj svojstava peleta jer može utjecati na proces prešanja i fizikalna svojstva peleta. Njihov učinak ovisi o temperaturi prešanja, sadržaju lignina i prisutnosti hidrofobnih voskova na površini biomase (Stelte i sur., 2011.). U peletu HRA udio ET iznosio je 9,73%, što je više od literaturnih vrijednosti koje se kreću između 3,70 i 8,20% (Wilson, 2010.; Karunanithy i sur., 2012.; Dragusanu i sur., 2023.). Pelet KUK imao je 7,06% ET, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti od 2,75 do 12,90% (Karunanithy i sur., 2012.; Chen i sur., 2023.). U peletu SOJ udio ET iznosio je 5,77%, no zbog nedostatka dostupnih literaturnih podataka usporedba s drugim istraživanjima nije bila moguća. U odnosu na biomasu, zabilježeno je smanjenje udjela ET nakon prešanja. Pelet PŠE sadržavao je 7,66% ET, što je više od literaturnih vrijednosti između 0,70 i 1,80% (Stelte i sur., 2011.; Pradhan i sur., 2025.). U peletu SUN udio ET iznosio je 6,93%, no zbog nedostatka literaturnih podataka usporedba nije bila moguća. Međutim, u odnosu na analiziranu biomasu, zabilježen je manji udio nakon prešanja. Povećani udjeli ET kod peleta HRA i PŠE mogu upućivati na veću zastupljenost nestrukturnih organskih spojeva u odnosu na literaturne podatke.

5.3.4. Mineralni sastav peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Mineralni sastav peleta važan je čimbenik njihovih energetske svojstava jer utječe na proces izgaranja i količinu nastalog pepela. Veći udio mineralnih tvari smanjuje udio organske gorive tvari u peletima. Elementi poput K, Na i S mogu poticati stvaranje troske i taloženje anorganskih ostataka u sustavima za izgaranje, što može smanjiti njihovu učinkovitost (Vassilev i sur., 2017.).

5.3.4.1. Sadržaj makroelemenata u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Analiza sadržaja makroelemenata u peletima pokazala je prisutnost Fe, Ca, K i Na, dok sadržaj Mg nije utvrđen jer je njegova koncentracija bila ispod granice detekcije primijenjene analitičke metode.

Željezo je jedan od elemenata koji sudjeluje u formiranju anorganskog ostatka nakon izgaranja te može utjecati na ponašanje pepela i rad sustava za izgaranje. Pelet HRA sadržavao je 46,47 mg/kg Fe, što je usporedivo s vrijednošću od 41,52 mg/kg koju navode Valantinavičius i Vonžodas (2014.) za pelete hrasta. Za drvene pelete općenito, literatura navodi širi raspon vrijednosti između 31,25 i 571,63 mg/kg (Chandrasekaran i sur., 2012.; Pazalja i sur., 2021.). U odnosu na biomasu, zabilježeno je povećanje sadržaja Fe nakon prešanja. U peletu KUK sadržaj Fe iznosio je 433,03 mg/kg, što je više od literaturnih vrijednosti između 106,00 i 192,83 mg/kg (ADM, 2023.), a i u odnosu na biomasu vidljivo je povećanje sadržaja Fe. Pelet SOJ sadržavao je 105,27 mg/kg Fe, no zbog nedostatka relevantnih podataka za pelete usporedba s literaturom nije bila moguća. Dostupni podaci za sojinu sačmu navode vrijednosti između 75,00 i 307,38 mg/kg (Wang i sur., 2022.; UGA, 2025.), dok je u odnosu na biomasu također utvrđen nešto veći sadržaj Fe u peletu. U peletu PŠE sadržaj Fe iznosio je 129,67 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 37,91 i 2830,00 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Bradna i sur., 2016.; Udakwar i Sarode, 2023.). Pelet SUN imao je 202,18 mg/kg Fe, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 90,60 do 450,00 mg/kg (Gehre i sur., 2024.; Kluska i sur., 2024.). Povećani sadržaj Fe u peletu KUK može utjecati na mineralni sastav i ponašanje pepela tijekom izgaranja.

Kalcij je jedan od dominantnih makroelemenata u mineralnom sastavu peleta te sudjeluje u formiranju pepela i ponašanju anorganskog ostatka tijekom izgaranja. Pelet HRA sadržavao je 517,21 mg/kg Ca, što je manje od vrijednosti 1187,00 mg/kg koju navode Valantinavičius i Vonžodas (2014.) za pelete hrasta. Za drvene pelete općenito literatura navodi raspon između 303,00 i 1600,00 mg/kg (Chandrasekaran i sur., 2012.; Tarasov i sur., 2013.), unutar kojeg se nalazi i analizirani pelet HRA. U peletu KUK sadržaj Ca iznosio je 1489,46 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 300,00 do 2000,00 mg/kg (ADM, 2023.; Equusvitalis, 2025.). U peletu SOJ sadržaj Ca iznosio je 4463,76 mg/kg, što je manje od literaturnih vrijednosti između 5600,00 i 6000,00 mg/kg (MB, 2025.; Agrifeeds, 2025.). Pelet PŠE sadržavao je 2728,00 mg/kg Ca, što je manje od vrijednosti 6180,00 mg/kg koju navode Valantinavičius i Vonžodas (2014.). U peletu SUN sadržaj Ca iznosio je 1725,63 mg/kg, što je unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 1163,32 i 3000,00 mg/kg (Petraru i sur.,

2021.; Gpfeeds, 2025.). Unatoč nižim vrijednostima kod peleta SOJ i PŠE, kalcij je i dalje bio jedan od dominantnih makroelemenata u njihovom mineralnom sastavu.

Kalij je jedan od najzastupljenijih alkalijskih elemenata u peletima te ima važnu ulogu u ponašanju mineralne tvari tijekom izgaranja. Njegov povećani sadržaj može pridonijeti stvaranju taloga i troske te snižavanju temperature taljenja pepela. Pelet HRA sadržavao je 258,98 mg/kg K, no zbog nedostatka specifičnih podataka u literaturi za pelete hrasta izravna usporedba nije bila moguća. Za drvene pelete literatura navodi vrijednosti između 167,00 i 9833,00 mg/kg (Chandrasekaran i sur., 2012.; Pollex i sur., 2018.; Kampiredou, 2022.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA, pri čemu u odnosu na biomasu nisu utvrđene značajnije promjene sadržaja K nakon prešanja. U peletu KUK sadržaj K iznosio je 1558,57 mg/kg, što je manje od literaturnih vrijednosti između 8500,00 i 15400,00 mg/kg (ADM, 2023.; Equusvitalis, 2025.). Pelet SOJ sadržavao je 3473,71 mg/kg K, što je manje od literaturnih vrijednosti od 13000,00 do 15000,00 mg/kg (MB, 2025.; Agrifeeds, 2025.). U peletu PŠE sadržaj K iznosio je 8845,79 mg/kg, što je manje od literaturnih vrijednosti između 10000,00 i 11190,00 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Mason i sur., 2016.). Pelet SUN imao je 22 307,50 mg/kg K, što je više od dostupne literaturne vrijednosti od 12000,00 mg/kg (Gpfeeds, 2025.), dok je u odnosu na biomasu zabilježeno smanjenje sadržaja K nakon prešanja. Veći sadržaj K kod peleta SUN mogao bi biti značajan s aspekta ponašanja pepela tijekom izgaranja.

Natrij je jedan od alkalijskih elemenata koji može utjecati na ponašanje mineralne tvari tijekom izgaranja. Povećani sadržaj Na može pridonijeti stvaranju taloga i troske te snižavanju temperature taljenja pepela. U peletu HRA sadržaj Na iznosio je 86,80 mg/kg, što je usporedivo s vrijednošću od 61,00 mg/kg koju navode Valantinavičius i Vonžodas (2014.) za pelete hrasta. Za drvene pelete literatura navodi vrijednosti između 30,00 i 120,00 mg/kg (Chandrasekaran i sur., 2012.; Tarasov i sur., 2013.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je 194,23 mg/kg Na, što je manje od literaturne vrijednosti od 300,00 mg/kg (Equusvitalis, 2025.). U peletu SOJ sadržaj Na iznosio je 170,55 mg/kg, što je više od dostupne literaturne vrijednosti od 110,00 mg/kg (MB, 2025.). Pelet PŠE sadržavao je 200,44 mg/kg Na, što je manje od literaturne vrijednosti od 270,70 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.). U peletu SUN sadržaj Na iznosio je 287,89 mg/kg, što je manje od dostupne literaturne vrijednosti od 500,00 mg/kg (Gpfeeds, 2025.). U odnosu na izvornu biomasu, nakon prešanja zabilježene su manje promjene sadržaja Na kod svih analiziranih uzoraka.

5.3.4.2. Sadržaj mikroelemenata u peletima od pojedinačnih vrsta biomase

Analiza sadržaja mikroelemenata u peletima od pojedinačnih vrsta biomasa pokazala je prisutnost Mn, Ni i Cu, dok sadržaj Cd, Co, Cr, Pb i Zn nije utvrđen jer su njihove koncentracije bile ispod granice detekcije primijenjene analitičke metode.

Mangan je mikroelement prisutan u mineralnoj frakciji peleta koji nakon izgaranja zaostaje u pepelu te može utjecati na njegova svojstva. Pelet HRA sadržavao je 14,50 mg/kg Mn, što je manje od vrijednosti 29,98 mg/kg koju navode Valantinavičius i Vonžodas (2014.) za pelete hrasta. Za drvene pelete literatura navodi vrijednosti između 19,60 i 110,50 mg/kg (Chandrasekaran i sur., 2012.; Pazalja i sur., 2021.). U peletu KUK sadržaj Mn iznosio je 39,05 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 15,00 do 48,70 mg/kg (ADM, 2023.; Equusvitalis, 2025.). Pelet SOJ sadržavao je 11,09 mg/kg Mn, što je manje od dostupnih literaturnih vrijednosti između 24,00 i 54,53 mg/kg (Wang i sur., 2022.; MB, 2025.; UGA, 2025.). U peletu PŠE sadržaj Mn iznosio je 58,38 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 37,97 i 85,00 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; KWfeeds, 2025.). Pelet SUN imao je 19,14 mg/kg Mn, što je manje od većine literaturnih vrijednosti od 21,00 do 65,73 mg/kg (Petraru i sur., 2021.; Kluska i sur., 2024.). Sadržaj Mn nije pokazao izraženija odstupanja među analiziranim peletima, dok je u odnosu na izvornu biomasu, kod peleta HRA i SOJ zabilježeno blago povećanje sadržaja Mn nakon prešanja.

Nikal je element u tragovima prisutan u mineralnoj frakciji peleta koji može poslužiti kao pokazatelj mineralnog sastava goriva. U peletu HRA sadržaj Ni iznosio je 1,43 mg/kg, što je nešto manje od vrijednosti od 1,54 i 2,09 mg/kg koje navode Civitarese i sur. (2023.) te Valantinavičius i Vonžodas (2014.). Za drvene pelete literatura navodi raspon između 0,63 i 2,63 mg/kg (Pazalja i sur., 2021.), unutar kojeg se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je 5,23 mg/kg Ni, no zbog nedostatka dostupnih literaturnih podataka usporedba s drugim istraživanjima nije bila moguća, a u odnosu na biomasu zabilježeno je tek neznatno povećanje sadržaja Ni nakon prešanja. U peletu SOJ sadržaj Ni iznosio je 4,64 mg/kg, no zbog nedostatka relevantnih podataka za pelete usporedba s literaturom nije bila moguća. Dostupni podaci za sojinu sačmu navode vrijednost od 4,46 mg/kg (EFSA i sur., 2019.), što je gotovo identično analiziranom sadržaju, dok je u odnosu na biomasu utvrđeno povećanje sadržaja Ni nakon prešanja. Pelet PŠE sadržavao je 2,52 mg/kg Ni, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti između 0,70 i 4,11 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Bradna i sur., 2016.; WPP, 2025.). U peletu SUN sadržaj Ni iznosio je 2,93 mg/kg, što je manje od većine literaturnih vrijednosti između 5,00 i 29,38 mg/kg (Petraru i sur., 2021.; Kluska i sur., 2024.). Dobivene vrijednosti

pokazuju da je Ni bio zastupljen u relativno niskim koncentracijama u svim analiziranim peletima.

Bakar je mikroelement prisutan u mineralnoj frakciji peleta te nakon izgaranja prelazi u anorganski ostatak. Pelet HRA sadržavao je 3,96 mg/kg Cu, što je više od literaturnih vrijednosti od 0,48 do 0,61 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; Civitarese i sur., 2023.). Za drvene pelete literatura navodi vrijednosti između 1,25 i 9,95 mg/kg (Chandrasekaran i sur., 2012.; Pazalja i sur., 2021.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. U peletu KUK sadržaj Cu iznosio je 5,13 mg/kg, što je unutar dijela literaturnih vrijednosti od 4,50 do 48,70 mg/kg (ADM, 2023.; Equusvitalis, 2025.). Pelet SOJ sadržavao je 4,08 mg/kg Cu, što je manje od dostupnih literaturnih vrijednosti od 8,00 do 28,00 mg/kg (Wang i sur., 2022.; MB, 2025.; UGA, 2025.). U peletu PŠE sadržaj Cu iznosio je 2,62 mg/kg, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 1,10 do 7,00 mg/kg (Valantinavičius i Vonžodas, 2014.; WPP, 2025.; Kwfeeds, 2025.). Pelet SUN imao je 10,64 mg/kg Cu, što je unutar dijela literaturnih vrijednosti od 10,30 do 71,25 mg/kg (Petraru i sur., 2021.; Matula i sur., 2023.; Kluska i sur., 2024.). U usporedbi s ostalim analiziranim mikroelementima, sadržaj Cu pokazao je relativno dobru podudarnost s literaturnim podacima za većinu analiziranih peleta.

5.3.5. Ogrjevna vrijednost peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Ogrjevna vrijednost peleta jedan je od ključnih pokazatelja njihovih energetske svojstava i najčešće se izražava kao GOV i DOV. Veće ogrjevnje vrijednosti upućuju na veći energetski potencijal goriva i učinkovitije iskorištavanje tijekom izgaranja. Na ogrjevnju vrijednost peleta utječu fizikalno-kemijska svojstva te elementarni i kemijski sastav biomase (Kamperidou, 2022.).

5.3.5.1. Gornja i donja ogrjevna vrijednost peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Gornja i donja ogrjevna vrijednost važni su pokazatelji energetskog potencijala peleta jer određuju količinu toplinske energije koja se oslobađa tijekom izgaranja. Pelet HRA imao je GOV od 19,15 MJ kg⁻¹, što odgovara literaturnim vrijednostima od 18,27 do 20,31 MJ kg⁻¹ (Miranda i sur., 2015.; Saletnik i sur., 2022.; Stolarski i sur., 2022.; Jiménez-Mendoza i sur., 2025.). Kod peleta KUK vrijednost GOV iznosila je 18,34 MJ kg⁻¹, što se nalazi unutar raspona od 17,60 do 19,10 MJ kg⁻¹ navedenog u literaturi (Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.; Gheorghe i Neacsu, 2024.; Yilmaz i sur., 2024.; WPM, 2025.). Pelet SOJ imao je GOV od 18,55 MJ kg⁻¹, što je unutar vrijednosti od 18,10 do 18,81 MJ kg⁻¹ koje navodi literatura (Scatolino i sur., 2018.; Santana i sur., 2021.; Zhang i sur., 2022.; Jagtap i Kalbande, 2023.). Vrijednost GOV kod peleta PŠE iznosila je 17,98 MJ kg⁻¹, što je u skladu s literaturnim vrijednostima od

17,02 do 18,30 MJ kg⁻¹ (Lu i sur., 2013.; Miranda i sur., 2015.; Bradna i sur., 2016.; Nath i sur., 2023.). Pelet SUN imao je GOV od 17,08 MJ kg⁻¹, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 15,75 do 18,83 MJ kg⁻¹ (Kalivodová i sur., 2022.; Gheorghe i Neacsu, 2024.). Dobivene vrijednosti potvrđuju da analizirani peleti imaju energetski potencijal usporediv s onim navedenim za iste biomase u literaturi.

Kod peleta HRA vrijednost DOV iznosila je 17,67 MJ kg⁻¹, što je više od literaturnih vrijednosti od 16,49 do 17,30 MJ kg⁻¹ (Telmo i Lousada, 2011b.; Miranda i sur., 2015.; Stolarski i sur., 2022.). Pelet KUK imao je DOV od 16,82 MJ kg⁻¹, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima od 16,61 do 17,20 MJ kg⁻¹ (Jiang i sur., 2020.; Petlickaitė i sur., 2023.; Gheorghe i Neacsu, 2024.). Kod peleta SOJ vrijednost DOV iznosila je 17,02 MJ kg⁻¹, što odgovara literaturnim vrijednostima od 16,92 do 17,28 MJ kg⁻¹ (Scatolino i sur., 2018.; Santana i sur., 2021.). DOV kod peleta PŠE iznosila je 16,52 MJ kg⁻¹, što se nalazi unutar raspona od 16,23 do 17,10 MJ kg⁻¹ navedenog u literaturi (Bradna i sur., 2016.; Voicu, 2018.; Pradhan i sur., 2025.). Kod peleta SUN vrijednost DOV bila je 15,67 MJ kg⁻¹, što odgovara vrijednostima između 13,90 i 16,30 MJ kg⁻¹ navedenima u literaturi (Lindley i Smith, 1988.; Kalivodová i sur., 2022.). Veća vrijednost DOV peleta HRA potvrđuje njegov povoljan energetski potencijal i veću količinu iskoristive toplinske energije tijekom izgaranja u odnosu na ostale analizirane pelete.

5.3.6. Mehanička svojstva peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Mehanička svojstva peleta imaju važnu ulogu u očuvanju njihove kvalitete tijekom skladištenja, transporta i rukovanja. Veće vrijednosti MI i TČ smanjuju raspadanje peleta i nastanak sitnih frakcija, čime se osigurava stabilnija uporaba goriva. Na mehanička svojstva peleta utječu svojstva sirovine te uvjeti prešanja, uključujući udio vlage, tlak i temperaturu (Artemio i sur., 2018.). Drvena biomasa u pravilu daje homogenije i mehanički stabilnije pelete, dok peleti proizvedeni od poljoprivrednih ostataka često pokazuju veću varijabilnost.

5.3.6.1. Mehanička izdržljivost peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Pelet HRA imao je MI od 98,89%, što je u skladu s literaturnim vrijednostima od 87,88 do 99,12% (Miranda i sur., 2012.; Saletnik i sur., 2022.; Civitarese i sur., 2023.; Jiménez-Mendoza i sur., 2025.). Kod peleta KUK MI je iznosila 98,25%, što odgovara literaturnim vrijednostima između 97,90 i 99,23% (Theerarattananoon i sur., 2011.; Xing i sur., 2018.; Liu i sur., 2023.). Pelet SOJ imao je MI od 99,46%, što je više od literaturnih vrijednosti od 85,48 do 97,57% (Zhang i sur., 2020.; Jagtap i Kalbande, 2022.; Jagtap i Kalbande, 2023.). Kod peleta PŠE MI je iznosila 99,12%, što je više od literaturnih vrijednosti između 97,23 i 98,30%

(Theerarattananoon i sur., 2011.; Azócar i sur., 2019.; Pradhan i sur., 2025.). Pelet SUN imao je MI od 99,43%, što je unutar dijela literaturnih vrijednosti od 93,00 do 99,60% (Williams i sur., 2018.; Cui i sur., 2019.; Pellets.kz, 2022.). Dobivene vrijednosti MI potvrđuju da su svi analizirani peleti imali vrlo visoku mehaničku izdržljivost, usporedivu ili veću od većine literaturnih vrijednosti, što upućuje na njihovu dobru otpornost tijekom skladištenja i transporta.

5.3.6.2. Tlačna čvrstoća peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Tlačna čvrstoća peleta HRA iznosila je 10,89 MPa, no zbog nedostatka specifičnih literaturnih podataka izravna usporedba nije bila moguća. Za drvene pelete literatura navodi vrijednosti između 8,63 i 26,98 MPa (Šafran i sur., 2018.), dok se za pelete s udjelom hrasta od 60% navode vrijednosti od 10,03 do 22,03 MPa, unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je TČ od 8,25 MPa, što je unutar raspona od 5,00 do 11,50 MPa navedenog u literaturi (Karamchandani i sur., 2013.; Karamchandani i sur., 2014.; Liu i sur., 2023.). Kod peleta SOJ TČ je iznosila 6,15 MPa, no zbog ograničenog broja literaturnih podataka usporedba nije bila moguća. Jedina dostupna vrijednost od 39,86 MPa (Jagtap i Kalbande, 2023.) vjerojatno se odnosi na aksijalni smjer ispitivanja, što bi moglo objasniti veliko odstupanje u odnosu na očekivane vrijednosti za pelete od poljoprivrednih ostataka. Pelet PŠE imao je TČ od 5,63 MPa, što je usporedivo s literaturnim vrijednostima između 3,77 i 7,66 MPa (Kubík i Adamovský, 2016.; Matkowski i sur., 2020.). Kod peleta SUN TČ je iznosila 7,87 MPa, što je nešto više od literaturnih vrijednosti od 6,50 do 7,48 MPa (Williams i sur., 2018.; Szentesi i sur., 2022.). Dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće potvrđuju da analizirani peleti imaju mehaničku otpornost usporedivu s vrijednostima navedenima u literaturi te zadovoljavaju zahtjeve za sigurno rukovanje i skladištenje.

5.4. Ponderirani proračun analiziranih svojstava peleta od mješavina biomase

Za pelete proizvedene od mješavina biomasa provedena je usporedba analiziranih i teorijskih vrijednosti dobivenih metodom ponderiranog proračuna, temeljenom na svojstvima peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa. Dobivene vrijednosti ΔY omogućile su procjenu odstupanja između analiziranih i teorijskih vrijednosti te ocjenu uspješnosti primijenjenog modela. Za interpretaciju odstupanja primijenjena je klasifikacija %E prema veličini odstupanja, prethodno korištena pri analizi energetske svojstava mješavina drvene i poljoprivredne biomase.

5.4.1. Ponderirani proračun fizikalno-kemijskih svojstava peleta od mješavina biomase

Kod PG, NG, udjela pepela, Cfix i koksa u ΔY prevladavao je ANU, dok je kod udjela vlage i HT dominantno bio zastupljen SIU. Promatrajući %E, kod PG, NG, vlage i HT prevladavao je ADU, dok je kod udjela pepela dominantan bio MO. Kod Cfix i koksa podjednako su bili zastupljeni ADU i MO. Ukupno gledano, analizirana fizikalno-kemijska svojstva karakterizirao je prevladavajući ANU u ΔY te dominantan ADU prema %E, uz manju zastupljenost MO i zanemarivu prisutnost ZO. Dobivena raspodjela potvrđuje dobru podudarnost analiziranih i teorijskih vrijednosti te zadovoljavajuću uspješnost primijenjenog modela u procjeni fizikalno-kemijskih svojstava peleta od mješavina biomase.

5.4.2. Ponderirani proračun elementarnog sastava peleta od mješavina biomase

Kod C, H i S u ΔY prevladavao je SIU, dok je kod O dominantan bio ANU. Kod N su, uz SIU i ANU, zabilježeni i pojedinačni slučajevi ADU. Promatrajući %E, kod C, H i O svi uzorci pripadali su kategoriji ADU, dok je kod N bila prisutna kombinacija ADU i MO. Kod S je prevladavao MO, uz manju zastupljenost ADU. U cjelini, elementarni sastav karakterizirao je dominantan SIU u ΔY te prevladavajući ADU prema %E, uz manju zastupljenost MO. Dobiveni rezultati pokazuju da je ponderirani proračun uspješno procijenio elementarni sastav peleta od mješavina biomase, pri čemu su odstupanja između analiziranih i teorijskih vrijednosti uglavnom bila mala.

5.4.2.1. Ponderirani proračun H/C i O/C omjera peleta od mješavina biomase

Kod H/C omjera u ΔY prevladavao je SIU, dok je kod O/C omjera dominantan bio ANU. Promatrajući %E, kod H/C omjera svi su uzorci pripadali kategoriji ADU, dok je kod O/C omjera također prevladavao ADU, uz manju zastupljenost MO. Promatrajući oba omjera zajedno, u ΔY su SIU i ANU bili podjednako zastupljeni, dok je kod %E izrazito prevladavao ADU. Prevladavanje ADU potvrđuje vrlo dobru primjenjivost ponderiranog proračuna za procjenu H/C i O/C omjera peleta od mješavina biomase.

5.4.3. Ponderirani proračun kemijskog sastava peleta od mješavina biomase

Kod lignina i hemiceluloze u ΔY prevladavao je SIU, dok je kod celuloze i ET dominantan bio ANU. Promatrajući %E, kod lignina je prevladavao ADU, dok su kod celuloze, hemiceluloze i AT dominantno bili prisutni MO. Uzimajući u obzir sva strukturna svojstva, u ΔY su SIU i ANU bili gotovo podjednako zastupljeni, dok je kod %E blago prevladavao MO u odnosu na ADU. Dobivena raspodjela pokazuje da je ponderirani proračun umjereno uspješno opisao kemijski sastav peleta od mješavina biomase, pri čemu su najveća odstupanja utvrđena kod strukturnih sastavnica biomase.

5.4.4. Ponderirani proračun mineralnog sastava peleta od mješavina biomase

5.4.4.1. Ponderirani proračun sadržaja makroelemenata u peletima od mješavina biomase

Kod Fe, Ca i K u ΔY prevladavao je ANU, dok je kod Na dominantno bio prisutan SIU. Promatrajući %E, kod Fe, Ca i K prevladavao je MO, uz manji udio ADU i ZO. Kod Na su, uz MO, bili izraženiji i ZO te VO, što upućuje na veća odstupanja između analiziranih i teorijskih vrijednosti. Promatrajući makroelemente zajedno, u ΔY je dominantan bio ANU, dok je kod %E prevladavao MO, uz prisutnost ZO i manjeg udjela VO. Prevladavanje MO prema %E vrijednostima pokazuje da je model bio manje uspješan u procjeni sadržaja makroelemenata nego kod većine prethodno analiziranih svojstava.

5.4.4.2. Ponderirani proračun sadržaja mikroelemenata u peletima od mješavina biomase

Kod Mn i Ni u ΔY prevladavao je ANU, dok je kod Cu ANU bio prisutan u svim uzorcima. Promatrajući %E, kod Mn su podjednako bili zastupljeni ADU i MO, uz manji udio ZO. Kod Ni i Cu prevladavao je MO, pri čemu je kod Cu zabilježen i manji udio ZO. Promatrajući mikroelemente u cjelini, prema vrijednostima ΔY prevladavao je ANU, dok je kod %E dominantan bio MO. Dobiveni rezultati pokazuju da ponderirani proračun bolje opisuje opće trendove promjena mikroelemenata nego njihove apsolutne vrijednosti.

5.4.5. Ponderirani proračun ogrjevnih vrijednosti peleta od mješavina biomase

Kod GOV u ΔY prevladavao je ANU, dok su kod DOV SIU i ANU bili podjednako zastupljeni. Promatrajući %E, kod oba parametra svi uzorci pripadali su kategoriji ADU. Uzimajući GOV i DOV zajedno, u ΔY su SIU i ANU bili gotovo podjednako zastupljeni, dok je kod %E potpuno prevladavao ADU. Potpuna zastupljenost ADU prema %E potvrđuje vrlo visoku uspješnost ponderiranog proračuna u procjeni ogrjevnih vrijednosti peleta od mješavina biomase.

5.4.6. Ponderirani proračun mehaničkih svojstava peleta od mješavina biomase

Kod MI u ΔY prevladavao je ANU, dok su kod %E svi uzorci pripadali kategoriji ADU. Kod TČ u ΔY također je u potpunosti prevladavao ANU, dok su kod %E dominantno bili prisutni VO, uz manji udio ZO. Promatrajući oba mehanička svojstva zajedno, u ΔY je izrazito prevladavao ANU, dok su kod %E bili prisutni ADU, ZO i VO, pri čemu je bio izraženiji udio većih odstupanja. Dobiveni rezultati pokazuju da je model bio znatno uspješniji u procjeni MI nego TČ, što upućuje na složeniju prirodu tlačne čvrstoće i veći utjecaj strukturnih svojstava biomase na njezino formiranje.

Kako bi se navedena odstupanja kod mehaničkih svojstava bolje objasnila, potrebno je razmotriti i stvarne vrijednosti MI i TČ dobivene analizom peleta od mješavina biomase. Iz rezultata je vidljivo da su vrijednosti MI bile visoke kod svih istraživanih mješavina, što

upućuje na dobru otpornost peleta na mehanička oštećenja tijekom rukovanja, transporta i skladištenja. Iako su utvrđene statistički značajne razlike, one su bile relativno male u praktičnom smislu te se mogu povezati s udjelom vezivnih komponenti, zbijenošću peleta i homogenošću mješavine tijekom prešanja.

S druge strane, rezultati ne pokazuju jednoznačnu povezanost između sadržaja lignina i TČ. Naime, mješavine s pšenicom sadržavale su veći udio lignina, ali su ostvarile niže vrijednosti TČ u odnosu na mješavine s kukuruzom. To pokazuje da TČ ne ovisi isključivo o udjelu lignina, već i o međudjelovanju strukturnih komponenti biomase te stupnju zbijenosti postignutom tijekom prešanja. Veće vrijednosti TČ kod mješavina s kukuruzom mogu se povezati s povoljnijim međudjelovanjem strukturnih komponenti biomase i stvaranjem stabilnije unutarnje strukture peleta tijekom procesa prešanja.

Kod pojedinih peleta zabilježena je visoka MI uz relativno nižu TČ, što potvrđuje da ta svojstva ne opisuju iste mehanizme mehaničke otpornosti. Takav odnos može biti posljedica poroznosti peleta, kemijskog sastava sirovine, mikrostrukture materijala te uvjeta prešanja, uključujući tlak, temperaturu i udio vlage (Stelte i sur., 2011.). Rezultati potvrđuju da je za procjenu mehaničkih svojstava peleta, osobito tlačne čvrstoće, potrebno uzeti u obzir međudjelovanje fizikalnih, kemijskih i strukturnih svojstava biomase, zbog čega jednostavni linearni ponderirani model ne može u potpunosti opisati njihovo ponašanje.

5.5. Emisije dimnih plinova pri izgaranju peleta

Emisije dimnih plinova tijekom izgaranja peleta određene su međudjelovanjem fizikalno-kemijskih, elementarnih, kemijskih i mineralnih svojstava goriva te uvjeta procesa izgaranja. Najvažniji čimbenici uključuju udio vlage, pepela, hlapljivih tvari te sadržaj C, H, O, N i S, koji utječu na učinkovitost izgaranja i nastanak pojedinih emisijskih spojeva. Mineralni sastav peleta također može utjecati na tijek izgaranja, sastav pepela i emisijske značajke dimnih plinova.

5.5.1. Emisije dimnih plinova pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

U ovom dijelu istraživanja analizirane su emisije dimnih plinova nastale potpunim izgaranjem peleta proizvedenih od pojedinačnih biomasa. Poseban naglasak stavljen je na određivanje koncentracija CO, NO_x, NO, NO₂, SO₂, H₂S, O₂ i CO₂. Navedeni parametri omogućuju procjenu učinkovitosti procesa izgaranja i usporedbu emisijskih značajki analiziranih peleta. Koncentracija H₂S nije zabilježena ni u jednom analiziranom uzorku dimnog plina, pa ti rezultati nisu uključeni u raspravu.

5.5.1.1. Koncentracija CO pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Ugljikov monoksid jedan je od ključnih pokazatelja potpunosti izgaranja peleta, jer njegova povećana koncentracija upućuje na manje učinkovito izgaranje goriva. Na emisiju CO utječu sastav peleta, udio vlage i pepela te uvjeti izgaranja. Kod peleta HRA koncentracija CO iznosila je 209,41 mg/m³, što je unutar raspona od 198,00 do 377,40 mg/m³ za pelete hrasta (Jasinskas i sur., 2020.; Mack i sur., 2024.). Za drvene pelete općenito literatura navodi vrijednosti između 44,50 i 370,00 mg/m³ (Juszczak, 2011.; Petrocelli i Lezzi, 2014.; Ciupek i sur., 2019.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Pełka i sur., 2023.; Polonini i sur., 2023.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je CO od 343,77 mg/m³, što je unutar vrijednosti od 123,00 do 1280,00 mg/m³ navedenih u literaturi (Nikolaisen i sur., 2002.; Kažimírová i Opáth, 2016.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.; He i sur., 2022.; Petlickaitė i sur., 2023.). U peletu SOJ koncentracija CO iznosila je 237,49 mg/m³, što se uklapa u raspon literaturnih vrijednosti između 76,80 i 6044,00 mg/m³ (Mladenović i sur., 2016.; Botić i sur., 2022.). Kod peleta PŠE zabilježena je koncentracija CO od 347,06 mg/m³, što odgovara dijelu vrijednosti od 117,00 do 2092,00 mg/m³ navedenih u literaturi (Nikolaisen i sur., 2002.; Slivoski i sur., 2017.; Elbl i sur., 2019.; Matijašević i Ogrizović, 2025.; Matijašević i sur., 2025.). Pelet SUN imao je CO od 387,46 mg/m³, što je u skladu s literaturnim vrijednostima između 148,70 i 1098,10 mg/m³ (Nikolaisen i sur., 2002.; Szyszlak-Barglowicz i sur., 2017.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.; Mileva i sur., 2025.). Relativno niske koncentracije CO upućuju na učinkovito i gotovo potpuno izgaranje svih analiziranih peleta, bez znakova izraženog nedostatka kisika ili nepotpunog izgaranja. Niže emisije CO kod peleta HRA mogu se povezati s manjim udjelom pepela i povoljnijim uvjetima izgaranja, dok su nešto više vrijednosti kod poljoprivrednih biomasa vjerojatno posljedica njihovog većeg udjela mineralne tvari i drugačijeg kemijskog sastava.

5.5.1.2. Koncentracija NO_x pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Dušikovi oksidi čine značajnu skupinu emisijskih spojeva koji nastaju tijekom izgaranja goriva, a njihov sadržaj ovisi o udjelu N u gorivu i uvjetima izgaranja. Oko 90% koncentracije NO_x čini NO, dok preostali dio otpada na NO₂. (Kraszkiewicz i sur., 2022.). Kod peleta HRA koncentracija NO_x iznosila je 158,16 mg/m³, što je unutar raspona od 133,00 do 286,00 mg/m³ za pelete hrasta (Miranda i sur., 2012.; Jasinskas i sur., 2020.; Mack i sur., 2024.). Za drvene pelete općenito, literatura navodi vrijednosti između 36,00 i 364,38 mg/m³ (Juszczak, 2011.; Ciupek i sur., 2019.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Pełka i sur., 2023.; Polonini i sur., 2023.; Ciupek i Gołoś, 2020.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je NO_x od 483,85 mg/m³, što je unutar šireg raspona literaturnih vrijednosti od 50,16 do 748,90 mg/m³

(Kažimírová i Opáth, 2016.; Ozturk i sur., 2019.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; He i sur., 2022.; Zhang i sur., 2025.). U peletu SOJ koncentracija NO_x iznosila je 621,72 mg/m^3 , što je više od literaturnih vrijednosti od 175,70 do 448,00 mg/m^3 (Mladenović i sur., 2016.; Botić i sur., 2022.). Kod peleta PŠE zabilježena je koncentracija NO_x od 468,34 mg/m^3 , što se uklapa u dio literaturnih vrijednosti između 153,40 i 729,00 mg/m^3 (Nikolaisen i sur., 2002.; Slivoski i sur., 2017.; Elbl i sur., 2019.; Matijašević i Ogrizović, 2025.; Matijašević i sur., 2025.; Zhang i sur., 2025.). Pelet SUN imao je NO_x od 714,81 mg/m^3 , što je više od većine literaturnih vrijednosti između 201,80 i 679,30 mg/m^3 (Nikolaisen i sur., 2002.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Mileva i sur., 2025.). Povećani NO_x kod peleta SOJ i SUN u skladu je s njihovim relativno većim udjelom N u odnosu na ostale analizirane pelete. To potvrđuje da sadržaj N u gorivu predstavlja jedan od glavnih čimbenika koji određuje emisije NO_x tijekom izgaranja analiziranih peleta.

5.5.1.3. Koncentracija NO pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Dušikov monoksid čini dominantan udio emisije NO_x tijekom izgaranja peleta i obično predstavlja glavni doprinos njenoj ukupnoj koncentraciji. Emisija NO ovisi o sadržaju N u gorivu i uvjetima izgaranja. Kod peleta HRA koncentracija NO iznosila je 89,75 mg/m^3 . Zbog nedostatka literaturnih podataka za NO, za usporedbu su korištene vrijednosti NO_x koje navode Mack i sur. (2024.) i Jasinskis i sur. (2020.), pri čemu preračunate vrijednosti NO iznose između 119,70 i 183,00 mg/m^3 . Za drvene pelete literatura navodi vrijednosti od 23,00 do 582,00 mg/m^3 (Juszczak, 2011.; Vicente i sur., 2014.; Polonini i sur., 2023.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je NO od 298,63 mg/m^3 , što se uklapa u raspon literaturnih vrijednosti između 30,98 i 503,00 mg/m^3 (Kažimírová i Opáth, 2016.; Mladenović i sur., 2016.; Ozturk i sur., 2019.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.; Zhang i sur., 2025.). U peletu SOJ koncentracija NO iznosila je 390,95 mg/m^3 , što je unutar dijela literaturnih vrijednosti od 172,20 do 403,20 mg/m^3 (Mladenović i sur., 2016.; Botić i sur., 2022.). Kod peleta PŠE zabilježena je koncentracija NO od 283,36 mg/m^3 , što odgovara rasponu literaturnih vrijednosti između 153,40 i 420,00 mg/m^3 (Slivoski i sur., 2017.; Kraszkiewicz i sur., 2022.; Zhang i sur., 2025.). Pelet SUN imao je NO od 445,07 mg/m^3 , što je unutar dijela literaturnih vrijednosti između 58,62 i 658,00 mg/m^3 (Szyszlak-Barglowicz i sur., 2017.; Petlickaitė i sur., 2023.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.). U odnosu na ostale analizirane pelete, najveće koncentracije NO zabilježene su kod peleta SOJ i SUN, što je u skladu s njihovim povećanim udjelom N. Dobiveni rezultati potvrđuju da NO predstavlja dominantnu komponentu ukupnih emisija NO_x pri izgaranju analiziranih peleta.

5.5.1.4. Koncentracija NO₂ pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Dušikov dioksid jedan je od produkata emisije NO_x tijekom izgaranja peleta, a njegova koncentracija ovisi o udjelu N u gorivu te uvjetima izgaranja i oksidacije dimnih plinova. Kod peleta HRA koncentracija NO₂ iznosila je 15,16 mg/m³, što je manje od vrijednosti između 69,40 i 83,50 mg/m³ koje navode Jelonek i sur. (2021.). Zbog ograničene dostupnosti literaturnih podataka za NO₂, za usporedbu su korištene i vrijednosti NO_x koje navode Mack i sur. (2024.) i Jasinskis i sur. (2020.), pri čemu preračunate vrijednosti NO₂ iznose između 13,30 i 20,00 mg/m³. Za drvene pelete literatura navodi vrijednosti od 0,19 do 64,00 mg/m³ (Juszczak, 2011.; Vicente i sur., 2014.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je NO₂ od 29,03 mg/m³, što se nalazi unutar širokog raspona literaturnih vrijednosti između 9,60 i 748,20 mg/m³ (Mladenović i sur., 2016.; Ozturk i sur., 2019.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.; Zhang i sur., 2025.; Matijašević i Ogrizović, 2025.). U peletu SOJ koncentracija NO₂ iznosila je 25,11 mg/m³, što je unutar raspona literaturnih vrijednosti od 13,40 do 44,80 mg/m³ (Mladenović i sur., 2016.; Botić i sur., 2022.). Kod peleta PŠE zabilježena je koncentracija NO₂ od 31,21 mg/m³, što je manje od literaturnih vrijednosti od 87,80 i 360,00 mg/m³ koje navode Zhang i sur. (2025.) te Matijašević i Ogrizović (2025.). Pelet SUN imao je NO₂ od 30,96 mg/m³, što je manje od literaturnih vrijednosti između 38,95 i 680,00 mg/m³ (Petlickaitė i sur., 2023.; Matijašević i Ogrizović, 2025.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.). Relativno niske koncentracije NO₂ potvrđuju da je najveći dio ukupnih emisija NO_x bio prisutan u obliku NO.

5.5.1.5. Koncentracija SO₂ pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Sumporov dioksid jedan je od glavnih produkata oksidacije S tijekom izgaranja peleta, a njegova emisija prvenstveno ovisi o udjelu S u gorivu. Povećane koncentracije SO₂ mogu nepovoljno utjecati na kvalitetu zraka i pridonijeti nastanku kiselih kiša. Kod peleta HRA koncentracija SO₂ iznosila je 57,51 mg/m³, što je više od vrijednosti između 5,00 i 38,15 mg/m³ za pelete hrasta (Tucki i sur., 2020.; Rabbat i sur., 2023.). Za drvene pelete općenito literatura navodi vrijednosti od 18,90 do 132,00 mg/m³ (Nikolaisen i sur., 2002.; Vicente i sur., 2014.; Zhang i sur., 2019.), unutar kojih se nalazi i analizirani pelet HRA. Pelet KUK imao je koncentraciju SO₂ od 170,10 mg/m³, što je više od literaturnih vrijednosti od 0,70 do 95,00 mg/m³ za slamu kukuruza (Morissette i sur., 2013.) te od vrijednosti od 10,90 mg/m³ koju navode Ozturk i sur. (2019.). U peletu SOJ koncentracija SO₂ iznosila je 174,78 mg/m³, no zbog nedostatka prethodnih istraživanja usporedba s literaturom nije bila moguća. Kod peleta PŠE zabilježena je emisija SO₂ od 189,14 mg/m³, što se nalazi unutar raspona literaturnih vrijednosti između 38,90 i 300,00 mg/m³ (Nikolaisen i sur., 2002.; Kraszkiewicz i sur., 2020.;

Kraszkiewicz i sur., 2022.; Matijašević i Ogrizović, 2025.; Matijašević i sur., 2025.). Pelet SUN imao je koncentraciju SO_2 od $280,87 \text{ mg/m}^3$, što je više od dijela literaturnih vrijednosti između $10,00$ i $174,00 \text{ mg/m}^3$ (Nikolaisen i sur., 2002.; Matijašević i Ogrizović, 2025.), ali usporedivo s vrijednošću od $292,00 \text{ mg/m}^3$ koju navode Jomantas i sur. (2025.). Najveća koncentracija SO_2 zabilježena je kod peleta SUN, što je u skladu s njegovim najvećim udjelom S među analiziranim peletima. Dobiveni rezultati potvrđuju jasnu povezanost između sadržaja S u peletima i emisije SO_2 tijekom izgaranja.

5.5.1.6. Koncentracija O_2 pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Udio kisika u dimnom plinu važan je pokazatelj uvjeta izgaranja jer veći udio O_2 upućuje na višak zraka u procesu izgaranja i potencijalno smanjenu energetska učinkovitost sustava. Kod peleta HRA udio O_2 iznosio je $19,47\%$, što je više od vrijednosti između $18,10$ i $18,80\%$ za pelete hrasta koje navode Miranda i sur. (2012.). Za drvene pelete općenito literatura navodi vrijednosti od $5,99$ do $18,10\%$ (Juszczak, 2011.; Petrocelli i Lezzi, 2014.; Holubcik i sur., 2017.; Slivoski i sur., 2017.; Ciupek i Gołoś, 2020.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Pełka i sur., 2023.), pri čemu je analizirani pelet HRA imao nešto viši udio O_2 . Pelet KUK imao je udio O_2 od $19,62\%$, što je više od literaturnih vrijednosti između $11,50$ i $16,10\%$ (Ozturk i sur., 2019.; Jach-Nocoń i sur., 2021.). Za usporedbu, Morissette i sur. (2013.) za izgaranje malih bala slame kukuruza navode vrijednosti između $15,40$ i $18,50\%$. U peletu SOJ udio O_2 iznosio je $19,49\%$, no zbog nedostatka prethodnih istraživanja usporedba s literaturom nije bila moguća. Kod peleta PŠE zabilježen je udio O_2 od $19,45\%$, što je više od literaturnih vrijednosti između $14,15$ i $18,60\%$ (Slivoski i sur., 2017.; Matijašević i sur., 2025.). Pelet SUN imao je udio O_2 od $19,64\%$, što je više od vrijednosti između $9,34$ i $11,70\%$ navedenih u literaturi (Jach-Nocoń i sur., 2021.; Mileva i sur., 2025.). Vrlo slični udjeli O_2 kod svih analiziranih peleta upućuju na ujednačene uvjete izgaranja tijekom mjerenja te pokazuju da su razlike u emisijama ostalih dimnih plinova prvenstveno posljedica svojstava goriva, a ne razlika u dovodu zraka.

5.5.1.7. Koncentracija CO_2 pri izgaranju peleta od pojedinačnih vrsta biomase

Ugljikov dioksid jedan je od glavnih produkata potpunog izgaranja C tijekom procesa izgaranja peleta. Kod peleta HRA udio CO_2 iznosio je $1,48\%$, što je manje od vrijednosti između $2,90$ i $6,10\%$ za pelete hrasta koje navode Jelonek i sur. (2021.) i Jasinskas i sur. (2020.). Za drvene pelete općenito literatura navodi vrijednosti od $1,99$ do $14,30\%$ (Nikolaisen i sur., 2002.; Slivoski i sur., 2017.; Holubcik i sur., 2017.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Pełka i sur., 2023.), pri čemu je analizirani pelet HRA imao niži udio CO_2 od većine navedenih vrijednosti. Pelet KUK imao je udio CO_2 od $1,38\%$, što je manje od većine literaturnih vrijednosti između $1,41$ i

10,43% (Kažimírová i Opáth, 2016.; Ozturk i sur., 2019.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.; Petlickaitė i sur., 2023.). U peletu SOJ udio CO₂ iznosio je 1,47%, no zbog nedostatka prethodnih istraživanja usporedba s literaturom nije bila moguća. Kod peleta PŠE zabilježen je udio CO₂ od 1,49%, što se nalazi unutar dijela literaturnih vrijednosti između 0,76 i 13,90% (Nikolaisen i sur., 2002.; Slivoski i sur., 2017.; Petlickaitė i sur., 2023.; Matijašević i sur., 2025.). Pelet SUN imao je udio CO₂ od 1,35%, što je manje od literaturnih vrijednosti između 6,60 i 13,10% (Nikolaisen i sur., 2002.; Jach-Nocoń i sur., 2021.; Bala-Litwiniak i Musiał, 2022.; Petlickaitė i sur., 2023.; Mileva i sur., 2025.). Za usporedbu, Mileva i sur. (2025.) za mješavinu drva i suncokreta u omjeru 70:30 navode vrijednost od 8,10%. Vrlo slični udjeli CO₂ kod svih analiziranih peleta, zajedno s gotovo jednakim udjelima O₂, upućuju na stabilne i usporedive uvjete izgaranja tijekom svih pokusa.

5.5.2. Ponderirani proračun emisije dimnih plinova pri izgaranju peleta od mješavina biomase
U ovom dijelu istraživanja provedena je usporedba analiziranih i teorijskih vrijednosti emisijskih komponenti dimnih plinova (CO, NO_x, NO, NO₂, SO₂, H₂S, O₂ i CO₂) pri izgaranju peleta proizvedenih od mješavina biomasa. Koncentracije CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ izražene su pri referentnom udjelu O₂ od 10 ili 11%, ovisno o vrsti analizirane biomase i korištenim kriterijima usporedbe. Teorijske vrijednosti dobivene su metodom ponderiranog proračuna na temelju emisijskih svojstava peleta proizvedenih iz pojedinačnih biomasa uključenih u mješavinu. Vrijednosti ΔY korištene su za procjenu odstupanja između analiziranih i teorijskih vrijednosti te ocjenu uspješnosti primijenjenog modela. Za interpretaciju odstupanja primijenjena je klasifikacija %E prema veličini odstupanja, sukladno pristupu korištenom pri analizi ostalih svojstava mješavina biomasa. Koncentracija H₂S nije zabilježena ni u jednom analiziranom uzorku dimnog plina, zbog čega ti rezultati nisu uključeni u raspravu.

5.5.2.1. Ponderirani proračun koncentracija CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ pri izgaranju peleta od mješavina biomase

Kod CO i SO₂ u ΔY prevladavao je ANU, dok je kod NO_x i NO dominantno bio prisutan SIU. Kod NO₂ svi uzorci pokazivali su SIU. Promatrajući %E, kod CO, NO_x, NO, NO₂ i SO₂ prevladavao je MO, uz manji udio ADU, dok je kod NO i NO₂ zabilježen i manji udio ZO. Uzimajući u obzir sve analizirane plinove zajedno, u ΔY je prevladavao SIU, dok je kod %E dominantan bio MO, uz manji udio ADU i ZO. Prevladavanje MO prema %E upućuje na ograničenu uspješnost ponderiranog proračuna u procjeni emisija dimnih plinova pri izgaranju peleta proizvedenih od mješavina biomase. Dobiveni rezultati pokazuju da emisijska svojstva

nisu određena isključivo udjelima pojedinačnih komponenti, već i njihovim međudjelovanjem tijekom procesa izgaranja.

5.5.2.2. Ponderirani proračun udjela plinova O_2 i CO_2 pri izgaranju peleta od mješavina biomase

Kod udjela O_2 u ΔY prevladavao je ANU, dok su kod %E svi uzorci pokazivali ADU, što upućuje na stabilnu relativnu pogrešku modela. Kod udjela CO_2 u ΔY svi uzorci pokazivali su SIU, dok je kod %E prevladavao MO, uz manji udio ADU. Promatrajući oba plina zajedno, u ΔY je dominantno bio prisutan SIU, dok je kod %E prevladavao ADU, uz manji udio MO. Ovi rezultati pokazuju da je ponderirani proračun uspješnije procijenio udio O_2 nego CO_2 . Prevladavanje ADU prema %E potvrđuje zadovoljavajuću uspješnost modela u procjeni volumnih udjela ovih plinova.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je utvrditi optimalne udjele poljoprivredne biomase u mješavinama sa šumskom biomasom, prateći kvalitetu peleta i emisije pri izgaranju. U istraživanju je korištena drvena biomasa hrasta lužnjaka, dok su od poljoprivrednih biomasa korištene stabljika kukuruza i suncokreta te slama soje i pšenice. Peleti su proizvedeni iz pojedinačnih vrsta biomase i njihovih mješavina u tri masena omjera (75:25, 50:50 i 25:75). Usporedbom dobivenih rezultata s propisanim standardima kvalitete peleta i graničnim vrijednostima emisija procijenjena je prikladnost pojedinih vrsta i udjela poljoprivredne biomase za proizvodnju peleta. Dobiveni rezultati omogućili su ostvarenje postavljenih ciljeva istraživanja te se na temelju njih mogu donijeti sljedeći zaključci:

1. Rezultati analize kvalitete peleta proizvedenih od mješavina drvne i poljoprivredne biomase pokazuju da vrsta poljoprivredne biomase značajno utječe na fizikalno-kemijska, energetska i mehanička svojstva peleta. Usporedba rezultata pokazala je da je mješavina biomase hrasta i soje u omjeru 75:25 ostvarila najveći broj analiziranih svojstava koja zadovoljavaju kriterije najviše kvalitativne klase (A1) prema standardu EN ISO 17225. Dobiveni rezultati potvrđuju da biomasa soje, u usporedbi s ostalim analiziranim poljoprivrednim biomasama, ima najpovoljniji utjecaj na kvalitetu peleta, čime se potvrđuje postavljena hipoteza **H1**.

2. Istraživanje je utvrdilo da povećanje udjela poljoprivredne biomase u mješavinama smanjuje broj parametara koji zadovoljavaju kriterije najviše kvalitativne klase A1 prema standardu EN ISO 17225. Kod mješavina s većim udjelom poljoprivredne biomase (50:50 i 25:75) uočeno je postupno smanjenje kvalitete peleta u odnosu na najstrože kriterije standarda. Ipak, rezultati pokazuju da se peleti proizvedeni od mješavina s više od 50% poljoprivredne biomase i dalje mogu svrstati u određene klase kvalitete prema navedenom standardu, pa se ne mogu smatrati nesukladnima propisanim normama. Na temelju dobivenih rezultata hipoteza H2 nije potvrđena te se odbacuje.

3. Analiza sastava dimnih plinova tijekom izgaranja peleta proizvedenih iz pojedinačnih biomasa i njihovih mješavina pokazala je da koncentracije CO u svim analiziranim uzorcima zadovoljavaju granične vrijednosti propisane nacionalnim i europskim regulatornim okvirom. Međutim, koncentracije NO_x u peletima proizvedenima od poljoprivrednih biomasa i njihovih mješavina prelaze granične vrijednosti propisane Uredbom Komisije (EU) 2015/1189. Najpovoljnije emisijske karakteristike imali su peleti proizvedeni iz biomase hrasta te mješavine s manjim udjelom poljoprivredne biomase, osobito mješavina biomase hrasta i

kukuruzu u omjeru 75:25. Najveće koncentracije NO_x i SO₂ zabilježene su kod peleta proizvedenih od biomase suncokreta te kod mješavina s većim udjelom suncokretove biomase, što je povezano s njihovim većim sadržajem dušika i sumpora. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da vrsta i udio poljoprivredne biomase značajno utječu na sastav dimnih plinova, zbog čega se hipoteza **H3** djelomično odbacuje.

4. U znanstvenoj literaturi dostupan je mali broj istraživanja koja se bave svojstvima i mogućnostima primjene peleta proizvedenih od mješavina drvene i poljoprivredne biomase, zbog čega rezultati ovog istraživanja predstavljaju vrijedan doprinos razumijevanju njihova potencijala u proizvodnji biogoriva. Dobiveni rezultati pružaju nova saznanja o utjecaju vrste i udjela poljoprivredne biomase na kvalitetu peleta i sastav dimnih plinova tijekom izgaranja te predstavljaju znanstvenu osnovu za optimizaciju sastava mješavina biomase. Rezultati istraživanja pokazuju da se odgovarajućim odabirom vrste i udjela poljoprivredne biomase mogu oblikovati mješavine koje omogućuju postizanje zadovoljavajuće kvalitete peleta uz povoljnija emisijska svojstva pri izgaranju. Također upućuju na potrebu daljnjih istraživanja usmjerenih na poboljšanje kvalitete peleta i smanjenje koncentracija onečišćujućih tvari tijekom izgaranja. Time se doprinosi učinkovitijem korištenju dostupne poljoprivredne i šumske biomase kao obnovljivog izvora energije te razvoju održivih energetske sustava u kontekstu zelene tranzicije.

7. LITERATURA

1. Abdel Aal, A. M., Ibrahim, O. H., Al-Farga, A., El Saeidy, E. A. (2023). Impact of biomass moisture content on the physical properties of briquettes produced from recycled *Ficus nitida* pruning residuals. *Sustainability*, 15(15), 11762.
2. Abdollahi, M. R., Ravindran, V., Svihus, B. (2013). Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. *Animal Feed Science and Technology*, 179(1–4), 1–23.
3. Abifarin, J. K., Oparanti, S. O., Abifarin, F. B., Obebe, E. O. (2025). Inhibitor additives to mitigate fossil fuel emissions and its potential role in promoting the energy transition in global cities. *Energy, Ecology and Environment*, 1–26.
4. Abioye, K. J., Harun, N. Y., Saeed, A. A. (2023). A brief review of solving biomass ash deposition with aluminum-silicate based additives and future perspective of kaolin. *Chemical Engineering Transactions*, 98, 27–32.
5. Abrar, I., Arora, T., Khandelwal, R. (2023). Bioalcohols as an alternative fuel for transportation: Cradle to grave analysis. *Fuel Processing Technology*, 242, 107646.
6. Adamovics, A., Platace, R., Gulbe, I., Ivanovs, S. (2018). The content of carbon and hydrogen in grass biomass and its influence on heating value. *Engineering for Rural Development*, 17, 1277–1281.
7. Adapa, P., Tabil, L., Schoenau, G. (2011). Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 549–561.
8. Adekiya, A. O., Adedokun, O. D., Adebisi, O. T. (2024). Soil characteristics, growth, yield, mineral composition and proximate content of soybeans under various tillage techniques. *International Journal of Agronomy*, 2024(1), 2006392.
9. Agnihotri, N., Mondal, M. K. (2024). Thermal analysis, kinetic behavior, reaction modeling, and comprehensive pyrolysis index of soybean stalk pyrolysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(13), 14977–14992.
10. Agu, O. S., Tabil, L. G., Mupondwa, E., Emadi, B. (2021). Torrefaction and pelleting of wheat and barley straw for biofuel and energy applications. *Frontiers in Energy Research*, 9, 699657.
11. Ahamer, G. (2024). How to compute whether biomass fuels are carbon neutral. *C*, 10(2), 48.
12. Ajorloo, M., Ghodrat, M., Scott, J., Strezov, V. (2025). Evaluating the role of feedstock composition and component interactions on biomass gasification. *Fuel*, 381, 133528.

13. Akhtar, J., Imran, M., Ali, A. M., Nawaz, Z., Muhammad, A., Butt, R. K., Jillani, M. S., Naeem, H. A. (2021). Torrefaction and thermochemical properties of agriculture residues. *Energies*, 14(14), 4218.
14. Alakangas, E. (2011). European standards for fuel specification and classes of solid biofuels. In *Solid biofuels for energy: A lower greenhouse gas alternative* (pp. 21–41). Springer.
15. Alakangas, E., Paju, P. (2002). Wood pellets in Finland: Technology, economy and market.
16. Alavi, M. (2019). Modifications of microcrystalline cellulose (MCC), nanofibrillated cellulose (NFC), and nanocrystalline cellulose (NCC) for antimicrobial and wound healing applications. *e-Polymers*, 19(1), 103–119.
17. Alemdar, A., Sain, M. (2008). Biocomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 68(2), 557–565.
18. André, F., Ponette, Q. (2003). Comparison of biomass and nutrient content between oak (*Quercus petraea*) and hornbeam (*Carpinus betulus*) trees in a coppice-with-standards stand in Chimay (Belgium). *Annals of Forest Science*, 60(6), 489–502.
19. Antonkiewicz, J., Jasiewicz, C., Koncewicz-Baran, M., Sendor, R. (2016). Nickel bioaccumulation by the chosen plant species. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, 1-11.
20. Antonopoulou, G., Dimitrellos, G., Beobide, A. S., Vayenas, D., Lyberatos, G. (2015). Chemical pretreatment of sunflower straw biomass: The effect on chemical composition and structural changes. *Waste and Biomass Valorization*, 6(5), 733–746.
21. Antonović, A., Ištvanic, J., Medved, S., Antolović, S., Stanešić, J., Kukuruzović, J., Đurović, A., Španić, N. (2019). Influence of different wood species chemical composition on the liquefaction properties. In *30th International Conference on Wood Science and Technology - ICWST 2019 “Implementation of wood science in woodworking sector”* (pp. 25–34). Zagreb, 12–13 December 2019.
22. Antonović, A., Krička, T., Matin, A., Voća, N., Jurišić, V., Bilandžija, N., Grubor, M., Stanešić, J. (2017). Lignocellulosic composition of some important oilseeds and grains biomass in the Republic of Croatia. In *52nd Croatian and 12th International Symposium on Agriculture* (pp. 623–627). Dubrovnik, Croatia, 12–17 February 2017.
23. Anukam, A., Berghel, J., Henrikson, G., Frodeson, S., Ståhl, M. (2021). A review of the mechanism of bonding in densified biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111249.
24. Artemio, C. P., Maginot, N. H., Serafin, C. U., Rahim, F. P., Guadalupe, R. Q. J., Fermín, C. M. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *PeerJ*, 6, e5504.

25. Avitabile, V., Baldoni, E., Baruth, B., Bausano, G., Boysen-Urban, K., Caldeira, C., Camia, A., Cazzaniga, N., Ceccherini, G., De, L. V., Doerner, H. (2023). Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. Publications Office of the European Union.
26. Azócar, L., Hermosilla, N., Gay, A., Rocha, S., Díaz, J., Jara, P. (2019). Brown pellet production using wheat straw from southern cities in Chile. *Fuel*, 237, 823–832.
27. Badawy, S. H., El-Motaium, R. A., Hossain, M. F., Abdel-Lattif, H. M., Ghorab, H. M., El-Sayed, M. A. (2023). Health risk assessment and nickel content in soils, rice (*Oryza sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in Damietta Governorate, Egypt. *Environment and Pollution*, 11(2), 1.
28. Båfver, L. S., Leckner, B., Tullin, C., Berntsen, M. (2011). Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3648–3655.
29. Bagagiolo, G., Laurendi, V., Cavallo, E. (2017). Safety improvements on wood chippers currently in use: A study on feasibility in the Italian context. *Agriculture*, 7(12), 98.
30. Baker, A. J. (1982). Wood fuel properties and fuel products from woods. In *Proceedings of the Fuel Wood Management and Utilization Seminar* (pp. 14–25).
31. Bala-Litwiniak, A., Musiał, D. (2022). Computational and experimental studies of selected types of biomass combustion in a domestic boiler. *Materials*, 15(14), 4826.
32. Banadkoki, O. G., Sokhansanj, S., Lau, A., Lee, J. S., Arunachalam, S., Smith, D. (2024). The study of post-harvest processing and handling of residues from plants grown primarily for agronomics: Soybean stalk, corn stover, tomato vine, cucumber, eggplant, and summer squash. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*, 6(5), 44–53.
33. Barbash, V. A., Yashchenko, O. V., Yakymenko, O. S., Myshak, V. D. (2023). Extraction, properties and use of nanocellulose from corn crop residues. *Applied Nanoscience*, 13(12), 7455–7468.
34. Barot, S. (2022). Biomass and bioenergy: Resources, conversion and application. In *Renewable Energy for Sustainable Growth Assessment* (pp. 243–262).
35. Ben, Z., Jibril, A. N., Sun, X., Bai, Y., Yang, D., Chen, K., Dong, Y. (2023). Compression characteristics and fracture simulation of gluten pellet. *Foods*, 12(8), 1598.
36. Bhagwanrao, S.V., Singaravelu, M. (2014). Bulk density of biomass and particle density of their briquettes. *International Journal of Agricultural Engineering*, 7, 221–224.
37. Bianchini, L., Colantoni, A., Venanzi, R., Cozzolino, L., Picchio, R. (2025). Physicochemical properties of forest wood biomass for bioenergy application: A review. *Forests*, 16(4), 702.

38. Bilandžija, N., Voca, N., Jelcic, B., Jurisic, V., Matin, A., Grubor, M., Kricka, T. (2018). Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 225–230.
39. Bilandžija, N. (2015). Potencijal vrste *Miscanthus x giganteus* kao energetske kulture u različitim tehnološkim i agroekološkim uvjetima [Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet].
40. Bilandžija, N., Jurišić, V., Voća, N., Leto, J., Matin, A., Grubor, M., Krička, T. (2017). Energy valorization of *Miscanthus x giganteus* biomass: A case study in Croatia. *Journal of Processing and Energy in Agriculture*, 21(1), 32–36.
41. Biswas, D. P. (2018). Physicochemical property and heating value analyses of charcoal briquettes from agricultural wastes: An alternative renewable energy source. In 2018 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2), 1–5.
42. Borges, A. D., Matos, P., Oliveira, M. (2025). Valorization of cork residues for biomass pellet production: Meeting ENplus® standards through strategic blending. *Clean Technologies*, 7(2), 43.
43. Botić, T., Gvero, P., Drljača, D., Borković, A., Dragić, D., Rakulj, S. (2022). Testing of small household biomass boilers from the aspect of waste gas emissions. *STED Journal*, 4(2), 12–20.
44. Boundy, R. G., Diegel, S. W., Wright, L. L., Davis, S. C. (2011). Biomass energy data book (4th ed.). Oak Ridge National Laboratory.
45. Bradna, J., Malat'ák, J., Hájek, D. (2016). The properties of wheat straw combustion and use of fly ash as a soil amendment. *Agronomy Research*, 14(4).
46. Braga, R. R., Ribeiro, V. M., Padial, A. A., Thomaz, S. M., Affonso, I. D. P., Wojciechowski, J., dos Santos Ribas, L. G., Cunha, E. R., Tiburcio, V. G., Vitule, J. R. S. (2020). Invasional meltdown: An experimental test and a framework to distinguish synergistic, additive, and antagonistic effects. *Hydrobiologia*, 847(7), 1603–1618.
47. Bratishko, V., Tkachenko, T., Shulha, S., Tigunova, O. (2021). Results of composition analysis of non-grain part of major field crops in Ukraine. *Engineering for Rural Development*, 20, 584–588.
48. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94.
49. Brown, R. C. (Ed.). (2019). Thermochemical processing of biomass: Conversion into fuels, chemicals and power. John Wiley & Sons.

50. Brunner, T., Kanzian, W., Obernberger, I., Theissl, A. (2011). Combustion properties of maize cobs: Results from lab and pilot-scale tests. In 19th European Biomass Conference and Exhibition (pp. 944–951).
51. Canavar, Ö., Kaptan, M. A. (2014). Changes in macro and micro plant nutrients of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 136–139.
52. Canbaş, A., Erten, H., Özşahin, F. (2001). The effects of storage temperature on the chemical composition of hop pellets. *Process Biochemistry*, 36(11), 1053–1058.
53. Carroll, J. P., Finnan, J. (2012). Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. *Biosystems Engineering*, 112(2), 151–159.
54. Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J. (2017). Chorological maps for the main European woody species. *Data in Brief*, 12, 662–666.
55. CEN/TS 17405:2020 – Stationary source emissions – Determination of the volume concentration of carbon dioxide – Reference method: infrared spectrometry
56. Chandrasekaran, S. R., Hopke, P. K., Rector, L., Allen, G., Lin, L. (2012). Chemical composition of wood chips and wood pellets. *Energy and Fuels*, 26(8), 4932–4937.
57. Chen, D., Cen, K., Gan, Z., Zhuang, X., Ba, Y. (2022). Comparative study of electric-heating torrefaction and solar-driven torrefaction of biomass: Characterization of property variation and energy usage with torrefaction severity. *Applications in Energy and Combustion Science*, 9, 100051.
58. Chen, X., Dos Santos, A. C. F., Gutierrez, D. M. R., Song, P., Aston, J. E., Thompson, D. N., Dooley, J. H., Ladisch, M. R., Mosier, N. S. (2023). Effect of pelleting on the enzymatic digestibility of corn stover. *Bioresource Technology*, 384, 129338.
59. Cheng, G., Zhao, Y., Pan, S., Wang, X., Dong, C. (2020). A comparative life cycle analysis of wheat straw utilization modes in China. *Energy*, 194, 116914.
60. Chowdhury, P., Mahi, N. A., Yeassin, R., Chowdhury, N. U. R., Farrok, O. (2025). Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges. *Energy Conversion and Management: X*, 25, 100889.
61. Ciupek, B., Gołoś, K. (2020). Concentration of nitrogen oxides when burning wood pellets of various origins. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 229–233.
62. Ciupek, B., Judt, W., Urbaniak, R., Kłosowiak, R. (2019). The emission of carbon monoxide and nitrogen oxides from boilers supplied by a pellet under the influence of changes in the air-fuel equivalence ratio. *Journal of Ecological Engineering*, 20(10), 34–38.

63. Civitarese, V., Acampora, A., Sperandio, G., Bassotti, B., Latterini, F., Picchio, R. (2023). A comparison of the qualitative characteristics of pellets made from different types of raw materials. *Forests*, 14(10), 2025.
64. Clarke, S., Preto, F. (2011). Biomass densification for energy production. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
65. Cui, X., Yang, J., Shi, X., Lei, W., Huang, T., Bai, C. (2019). Pelletization of sunflower seed husks: Evaluating and optimizing energy consumption and physical properties by response surface methodology (RSM). *Processes*, 7(9), 591.
66. Cui, X., Yang, J., Wang, Z., Shi, X. (2021). Better use of bioenergy: A critical review of co-pelletizing for biofuel manufacturing. *Carbon Capture Science and Technology*, 1, 100005.
67. Da Rosa, R. G., Castro, L. E. N., Barroso, T. L. C. T., Ferreira, V. C., Bittencourt, P. R. S., Rostagno, M. A., Forster-Carneiro, T. (2025). Valorizing corn stover waste into valuable bioproducts using subcritical water hydrolysis. *Biofuel Research Journal*, 12(1), 2283–2305.
68. da Silva, S. B., Arantes, M. D. C., de Andrade, J. K. B., Andrade, C. R., Carneiro, A. D. C. O., de Paula Protásio, T. (2020). Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. *Renewable Energy*, 147, 1870–1879.
69. Darvell, L. I., Brindley, C., Baxter, X. C., Jones, J. M., Williams, A. (2012). Nitrogen in biomass char and its fate during combustion: A model compound approach. *Energy and Fuels*, 26(11), 6482–6491.
70. Darwish, G. A., Bakr, A. A., Abdallah, M. M. F. (2012). Nutritional value upgrading of maize stalk by using *Pleurotus ostreatus* and *Saccharomyces cerevisiae* in solid state fermentation. *Annals of Agricultural Sciences*, 57(1), 47–51.
71. Dedovic, N., Igetic, S., Janic, T., Matic-Kekic, S., Ponjican, O., Tomic, M., Savin, L. (2012). Efficiency of small scale manually fed boilers—Mathematical models. *Energies*, 5(5), 1470–1489.
72. Del Río, J. C., Rencoret, J., Prinsen, P., Martínez, Á. T., Ralph, J., Gutiérrez, A. (2012). Structural characterization of wheat straw lignin as revealed by analytical pyrolysis, 2D-NMR, and reductive cleavage methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(23), 5922–5935.
73. Demirbaş, A. (2003). Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products. *Energy Sources*, 25(7), 629–635.
74. Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230.

75. Demirbas, A. (2007). Effects of moisture and hydrogen content on the heating value of fuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(7), 649–655.
76. Demirbas, A. (2017). Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(6), 592–598.
77. Demirel, C., Gürdil, G. A. K., Kabutey, A., Herak, D. (2020). Effects of forces, particle sizes, and moisture contents on mechanical behaviour of densified briquettes from ground sunflower stalks and hazelnut husks. *Energies*, 13(10), 2542.
78. Diaz-Montaño, D. M. (2022). Valorization of biomass as a raw material to obtain products of industrial interest. In *Biomass, Biorefineries and Bioeconomy*. IntechOpen.
79. Djatkov, D., Martinov, M., Kaltschmitt, M. (2018). Influencing parameters on mechanical–physical properties of pellet fuel made from corn harvest residues. *Biomass and Bioenergy*, 119, 418–428.
80. Donata, K., Andrzej, R., Janusz, Z., Zielenkiewicz, T., Antczak, A. (2010). Comparison of the chemical composition of the fossil and recent oak wood. *Wood Research*, 55, 113–120.
81. dos Reis, A. R., de Queiroz Barcelos, J. P., de Souza Osório, C. R. W., Santos, E. F., Lisboa, L. A. M., Santini, J. M. K., dos Santos, M. J. D., Junior, E. F., Campos, M., de Figueiredo, P. A. M., Lavres, J. (2017). A glimpse into the physiological, biochemical and nutritional status of soybean plants under Ni-stress conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 144, 76–87.
82. Dragusanu, V., Lunguleasa, A., Spirchez, C., Scriba, C. (2023). Some properties of briquettes and pellets obtained from the biomass of energetic willow (*Salix viminalis* L.) in comparison with those from oak (*Quercus robur*). *Forests*, 14(6), 1134.
83. Dubravac, T., Gradečki-Poštenjak, M., Indir, K., Krajter Ostoić, S., Licht, R., Liović, B., Medak, J., Novak-Agbaba, S., Pladinić, E., Pernek, M., Pilaš, I., Vuletić, D. (2020). Povijest i značaj Posebnog rezervata šumske vegetacije „Lože“. *Hrvatski šumarski institut, Jastrebarsko*.
84. Duca, D., Toscano, G., Riva, G., Mengarelli, C., Rossini, G., Pizzi, A., Del Gatto, A., Pedretti, E. F. (2015). Quality of residues of the biodiesel chain in the energy field. *Industrial Crops and Products*, 75, 91–97.
85. Đurić, S. N., Brankov, S. D., Kosanić, T. R., Čeranić, M. B., Nakomčić-Smaragdakis, B. B. (2014). The composition of gaseous products from corn stalk pyrolysis process. *Thermal Science*, 18(2), 533–542.

86. Eaton, E. G. S. D. J., Caudullo, G., Oliveira, S., De Rigo, D. (2016). *Quercus robur* and *Quercus petraea* in Europe: Distribution, habitat, usage and threats. In *European atlas of forest tree species* (pp. 160–163).
87. Elbaz, A. M., Wang, S., Guiberti, T. F., Roberts, W. L. (2022). Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications. *Fuel Communications*, 10, 100053.
88. Elbl, P., Baláš, M., Vavříková, P., Lisý, M., Milčák, P. (2019). Gaseous emissions and solid particles from the combustion of biomass pellets in 25 kW automatic boiler. In *Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal* (pp. 27–30).
89. El-Soaly, I. S., El-Bessoumy, R. R., Fodah, A. E. M. (2017). Possibility of using corn stalks as a source of energy. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 34(4), 1837–1856.
90. Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: Trends and R&D implications. *Food Security*, 14(5), 1295–1319.
91. Esteves, B., Sen, U., Pereira, H. (2023). Influence of chemical composition on heating value of biomass: A review and bibliometric analysis. *Energies*, 16(10), 4226.
92. Farid, M. U., Ullah, A., Ghafoor, A., Khan, S. N., Iqbal, M., Muhayodin, F., Shabbir, A., Arslan, C., Nasir, A. (2023). Air pollution and clean energy: Latest trends and future perspectives. In *Air pollution: Latest status and current developments*. IntechOpen.
93. Fitria, Liu, J., Yang, B. (2023). Roles of mineral matter in biomass processing to biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(3), 696–717.
94. Fortunati, E., Luzi, F., Jiménez, A., Gopakumar, D. A., Puglia, D., Thomas, S., Kenny, J. M., Chiralt, A., Torre, L. (2016). Revalorization of sunflower stalks as novel sources of cellulose nanofibrils and nanocrystals and their effect on wheat gluten bionanocomposite properties. *Carbohydrate Polymers*, 149, 357–368.
95. Frodeson, S., Lindén, P., Henriksson, G., Berghel, J. (2019). Compression of biomass substances—A study on springback effects and color formation in pellet manufacture. *Applied Sciences*, 9(20), 4302.
96. Ganewatta, M. S., Lokupitiya, H. N., Tang, C. (2019). Lignin biopolymers in the age of controlled polymerization. *Polymers*, 11(7), 1176.
97. García-Lara, S., Serna-Saldivar, S. O. (2019). Corn history and culture. *Corn*, 1-18.
98. Garcia-Maraver, A., Carpio, M. (2015). Biomass pelletization process. *Biomass pelletization: Standards and production*, 53-66.

99. Gasperini, T., Pizzi, A., Olivi, L., Toscano, G., Ilari, A., Duca, D. (2024). Image processing technique for enhanced combustion efficiency of wood pellets. *Energies*, 17(23), 6144.
100. Geffert, A., Výbohová, E., Geffertová, J. (2019). Changes in the chemical composition of oak wood due to steaming. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen Res Publica Slovaca*, 61(1), 19–29.
101. Gehre, P., Kitze, A., Guhl, S., Gräbner, M., Aneziris, C. G. (2024). Carbonized wood and sunflower seed hull pellets as a substitution for carbon black for the production of MgO–C refractories. *Open Ceramics*, 17, 100550.
102. Geletukha, G., Drahniev, S., Zheliezna, T., Bashtovyi, A. (2020). Prospects of sunflower residues use for energy. Position paper. Bioenergy Association of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 1–33.
103. Geletukha, G., Drahniev, S., Zheliezna, T., Karampinis, M. (2022). Maize residues to energy. Bioenergy Association of Ukraine, 48.
104. Gerassimova, I., Katsarova, A., Benkova, M., Nenova, L., Petkova, Z. (2023). Influence of fertilization on uptake of macroelements with sunflower biomass. *Journal of Central European Agriculture*, 24(1), 236–244.
105. Ghanney, P., Kugbe, J. X., Anning, D. K. (2021). Role of microbial biomechanics in composting with special reference to lignocellulose biomass digestion. *Asian Journal of Biotechnology and Bioresource Technology*, 7(1), 30–46.
106. Ghavidel, A., Hofmann, T., Bak, M., Sandu, I., Vasilache, V. (2020). Comparative archaeometric characterization of recent and historical oak (*Quercus* spp.) wood. *Wood Science and Technology*, 54(5), 1121–1137.
107. Gheorghe, D., Neacsu, A. (2024). The influence of additives upon the energetic parameters and physicochemical properties of environmentally friendly biomass pellets. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 68(3), 438–454.
108. Gholami Banadkoki, O., Sokhansanj, S., Lau, A., Arunachalam, S., Smith, D. (2025). The physiochemical properties of pellets made from the foliage of vegetable crops. *Energies*, 18(8), 1969.
109. Gievers, F., Walz, M., Loewe, K., Loewen, A. (2024). Pelletized straw for biogas production—Substrate characterization and methane formation potential. *Processes*, 12, 1549.
110. González, J. F., Ledesma, B., Alkassir, A., González, J. (2011). Study of the influence of the composition of several biomass pellets on the drying process. *Biomass and Bioenergy*, 35(10), 4399–4406.

111. Greene, J. P. (2021). Microstructures of polymers. In *Automotive plastics and composites* (pp. 27–37).
112. Grubor, M. (2021). Utjecaj sastava i mehaničke pripreme biomase na kakvoću bioulja i biougljena dobivenog pirolizom (Doctoral dissertation, Sveučilište u Zagrebu, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet).
113. Grubor, M., Krička, T., Bilandžija, N., Jurišić, V., Voća, N., Antonović, A., Matin, A. (2018). Kukuruzovina kao energent za proizvodnju krutog goriva. In 53. Hrvatski i 13. međunarodni simpozij agronoma, 18.–23. veljače 2018., Vodice, Hrvatska: Zbornik radova (p. 275).
114. Gu, J., Fan, H., Wang, Y., Zhang, Y., Yuan, H., Chen, Y. (2020). Co-pyrolysis of xylan and high-density polyethylene: Product distribution and synergistic effects. *Fuel*, 267, 116896.
115. Hagel, S., Schütt, F. (2024). Reinforcement fiber production from wheat straw for wastepaper-based packaging using steam refining with sodium carbonate. *Clean Technologies*, 6(1), 322–338.
116. Hájková, K., Jurczykova, T., Filipi, M., Bouček, J. (2023). Chemical pulp from corn stalks. *Biotechnology Reports*, 37, e00786.
117. Halba, A., Vidyarthi, P. K., Arora, P. (2022). Gasification as a potential solution for forest fires in the Indian Himalayan Region: A review. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101162.
118. Hansen, L. J., Fendt, S., Spliethoff, H. (2022). Impact of hydrothermal carbonization on combustion properties of residual biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(7), 2541–2552.
119. Hashem, A., Abou-Okeil, A., El-Shafie, A., El-Sakhawy, M. (2006). Grafting of high α -cellulose pulp extracted from sunflower stalks for removal of Hg (II) from aqueous solution. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 45(1), 135–141.
120. Havlík, J., Dlouhý, T., Pitel', J. (2022). Drying biomass with a high water content—The influence of the final degree of drying on the sizing of indirect dryers. *Processes*, 10(4), 739.
121. Havrysh, V., Kalinichenko, A., Pysarenko, P., Samojlik, M. (2023). Sunflower residues-based biorefinery: Circular economy indicators. *Processes*, 11(2), 630.
122. He, Z., Liu, S., Wang, S., Liu, W., Li, Y., Feng, X. (2022). Reduced pollutant emissions and slagging rate of biomass pellet combustion by optimizing the multilayer distribution of secondary air. *ACS Omega*, 7(33), 28962–28973.
123. Hemati, A., Nazari, M., Asgari Lajayer, B., Smith, D. L., Astatkie, T. (2022). Lignocellulosics in plant cell wall and their potential biological degradation. *Folia Microbiologica*, 67(5), 671–681.

124. Heuzé, V., Tran, G., Hassoun, P., Lebas, F. (2015). Feedipedia. Sunflower forage and crop residues. A programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO.
125. Hiegl, W., Janssen, R., Pichler, W. (2009). Advancement of pellets-related European standards. WIP Renewable Energies.
126. Holubcik, M., Jandacka, J., Palacka, M., Kantova, N., Jachniak, E., Pavlik, P. (2017). The impact of bark content in wood pellets on emission production during combustion in small heat source. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, 19(2A), 94–100.
127. Holubcik, M., Nosek, R., Jandacka, J. (2012). Optimization of the production process of wood pellets by adding additives. International Journal of Energy Optimization and Engineering, 1(2), 20–40.
128. Horabik, J., Bańda, M., Józefaciuk, G., Adamczuk, A., Polakowski, C., Stasiak, M., Parafiniuk, P., Wiącek, J., Kobylka, R., Molenda, M. (2021). Breakage strength of wood sawdust pellets: Measurements and modelling. Materials, 14(12), 3273.
129. HRN EN 12390-3:2019. Ispitivanje očvrsluloga betona -- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka (EN 12390-3:2019).
130. HRN EN 14789:2017. Emisije iz nepokretnih izvora -- Određivanje volumne koncentracije kisika -- Standardna referentna metoda: Paramagnetizam (EN 14789:2017). Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
131. HRN EN 14791:2017. Emisije iz nepokretnih izvora -- Određivanje masene koncentracije sumpornih oksida -- Standardna referentna metoda (EN 14791:2017). Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
132. HRN EN 14792:2017. Emisije iz nepokretnih izvora -- Određivanje masene koncentracije dušikovih oksida -- Standardna referentna metoda: Kemiluminescencija (EN 14792:2017).
133. HRN EN 14793:2017 Emisije iz nepokretnih izvora - Dokazivanje ekvivalencije alternativne metode s referentnom metodom (EN 14793:2017)
134. HRN EN 15058:2017. Emisije iz nepokretnih izvora -- Određivanje masene koncentracije ugljikova monoksida -- Standardna referentna metoda: Nedisperzivna infracrvena spektrometrija (EN 15058:2017). Hrvatski zavod za norme, Zagreb, Hrvatska.
135. HRN EN 15234-1:2011. Čvrsta biogoriva -- Jamstvo kvalitete goriva -- 1. dio: Opći zahtjevi (EN 15234-1:2011).
136. HRN EN 15259:2008. Kvaliteta zraka -- Mjerenje emisija iz stacionarnih izvora -- Zahtjevi za mjerne presjeke i mjesta te za mjerni cilj, plan i izvještaj (EN 15259:2007).
137. HRN EN ISO 14780:2017. Čvrsta biogoriva -- Priprema uzoraka (ISO 14780:2017; EN ISO 14780:2017).

138. HRN EN ISO 16559:2022. Čvrsta biogoriva -- Terminološki rječnik (ISO 16559:2022; EN ISO 16559:2022).
139. HRN EN ISO 16948:2015. Čvrsta biogoriva -- Određivanje ukupnog udjela ugljika, vodika i dušika (ISO 16948:2015; EN ISO 16948:2015).
140. HRN EN ISO 16967:2015. Čvrsta biogoriva -- Određivanje makroelemenata -- Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na i Ti (ISO 16967:2015; EN ISO 16967:2015).
141. HRN EN ISO 16968:2015. Čvrsta biogoriva -- Određivanje mikroelemenata -- As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V i Zn (ISO 16968:2015; EN ISO 16968:2015).
142. HRN EN ISO 16994:2016. Čvrsta biogoriva -- Utvrđivanje ukupnog udjela sumpora i klora (ISO 16994:2016; EN ISO 16994:2016).
143. HRN EN ISO 17225-2:2021. Čvrsta biogoriva -- Specifikacije goriva i razredi -- 2. dio: Klasifikacija drvnih peleta (ISO 17225-2:2021; EN ISO 17225-2:2021).
144. HRN EN ISO 17225-6:2021. Čvrsta biogoriva -- Specifikacije goriva i razredi -- 6. dio: Klasifikacija nedravnih peleta (ISO 17225-6:2021; EN ISO 17225-6:2021).
145. HRN EN ISO 17827-2:2024. Čvrsta biogoriva -- Određivanje granulometrijskog sastava nekomprimiranoga goriva -- 2. dio: Metoda vibracijskog prosijavanja sitom promjera 3,15 mm i manjeg (ISO 17827-2:2024; EN ISO 17827-2:2024).
146. HRN EN ISO 17828:2025. Čvrsta biogoriva -- Određivanje nasipne gustoće (ISO 17828:2025; EN ISO 17828:2025).
147. HRN EN ISO 17829:2025. Čvrsta biogoriva -- Određivanje duljine i promjera peleta (ISO 17829:2015; EN ISO 17829:2015).
148. HRN EN ISO 17831-1:2025. Čvrsta biogoriva -- Određivanje mehaničke izdržljivosti peleta i briketa -- 1. dio: Peleti (ISO 17831-1:2015; EN ISO 17831-1:2015).
149. HRN EN ISO 18122:2022. Čvrsta biogoriva -- Određivanje udjela pepela (ISO 18122:2022; EN ISO 18122:2022).
150. HRN EN ISO 18123:2023. Čvrsta biogoriva -- Određivanje hlapljivih tvari (ISO 18123:2023; EN ISO 18123:2023).
151. HRN EN ISO 18125:2017. Čvrsta biogoriva -- Određivanje ogrjevnog vrijednosti (ISO 18125:2017; EN ISO 18125:2017).
152. HRN EN ISO 18134-1:2022. Čvrsta biogoriva -- Određivanje udjela vlage -- 1. dio: Referentna metoda (ISO 18134-1:2022; EN ISO 18134-1:2022).
153. HRN EN ISO 18135:2017. Čvrsta biogoriva -- Uzorkovanje (ISO 18135:2017; EN ISO 18135:2017).

154. HRN EN ISO 18847:2024. Čvrsta biogoriva -- Određivanje gustoće čestica peleta i briketa (ISO 18847:2024; EN ISO 18847:2024).
155. HRN ISO 3310-1:2016. Ispitna sita -- Tehnički zahtjevi i ispitivanja -- 1. dio: Ispitna sita izrađena od metalne žičane mreže (ISO 3310-1:2016).
156. HRN ISO 7935:2024 Emisije iz nepokretnih izvora -- Određivanje masene koncentracije sumporovog dioksida u otpadnim plinovima -- Radne značajke automatskih mjernih sustava (ISO 7935:2024)
157. <http://www.faricon.com/sunflower-pellets.htm> (Pristupljeno 17.03.2026.).
158. https://admadvantage.com/wp-content/uploads/2024/10/COE.QAL_.CQ_.SPC_.213.014414-18-Corn-Protein-Feed-Pellets-Specification.pdf (Pristupljeno 24.09.2025.).
159. <https://agrifeeds.co.nz/products/dry-feeds/soy-hull-pellet> (Pristupljeno 24.09.2025.).
160. <https://bioenergyeurope.org/pellet-report/> (BEE, 2025; Pristupljeno 05.12.2025.).
161. <https://bioenergyeurope.org/wp-content/uploads/2026/02/Booklet-Single-Page-Website.pdf> (Pristupljeno 20.05.2026.)
162. <https://blogs.testoaus.com.au/gas-analysis/the-importance-of-regular-flue-gas-analysis/> (Pristupljeno 17.02.2025.).
163. <https://cfnielsen.com/faq/what-is-the-calorific-value-of-wood/> (Pristupljeno 02.08.2025.).
164. <https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch4/index.php> (Pristupljeno 14.03.2025.).
165. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Forests,_forestry_and_logging (Pristupljeno 12.02.2025.).
166. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20251218-2> (EC, 2025 b; Pristupljeno 18.11.2025.).
167. https://eihp.hr/wp-content/uploads/2023/01/Energija%20u%20HR%202021_WEB_LR.pdf (Pristupljeno 03.07.2025.).
168. https://eihp.hr/wp-content/uploads/2024/01/Energija-u-HR-22_WEB-novo.pdf (Pristupljeno 03.07.2025.).
169. https://eihp.hr/wp-content/uploads/2024/12/Energija-u-HR-2023_WEB_novo.pdf (Pristupljeno 03.07.2025.).
170. https://eihp.hr/wp-content/uploads/2026/01/Energija-u-HR-2024_web.pdf (Pristupljeno 04.03.2026.).
171. https://elibrary.tsri.or.th/fullP/RDG5750049/RDG5750049V01/RDG5750049V01_full.pdf (NRCT; Pristupljeno 06.10.2025.).

172. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (EC, 2025a; Pristupljeno 02.12.2025.).
173. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2015/1189/oj/eng> (Pristupljeno 12.03.2026.).
174. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105> (Pristupljeno 02.02.2026.).
175. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1115> (Pristupljeno 05.12.2025.).
176. <https://lpcazure1.laspositascollege.edu/physics/assets/docs/UnderstandingExperimentalError.pdf> (Pristupljeno 25.08.2025.).
177. <https://madbarn.ca/feeds/soybean-hulls-brazil-pellets> (MB, 2025; Pristupljeno 24. 09. 2025.).
178. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_12_127_2553.html (Pristupljeno 01. 02.2025.).
179. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_06_72_1410.html (Pristupljeno 01. 02. 2025.).
180. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_04_42_827.html (Pristupljeno 01.02. 2025.).
181. https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_05_47_962.html (Pristupljeno 01.02. 2025.).
182. <https://pellerger.com/learn-more/pricing-info/> (Pristupljeno 28.01.2025.).
183. https://pellets.kz/sunflower_pellets (Pristupljeno 17.03.2026.).
184. <https://podaci.dzs.hr/2023/hr/58457> (Pristupljeno 02.03.2026.).
185. <https://podaci.dzs.hr/2025/hr/97333> (Pristupljeno 25.02.2026.).
186. <https://podaci.dzs.hr/2025/hr/97383> (Pristupljeno 02.03.2026.).
187. <https://poultry.caes.uga.edu/extension/poultry-nutrition/soybeans/nutritional-composition.html> (Pristupljeno 30.09.2025.).
188. <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/horizon-magazine/wheat-straw-waste-could-be-basis-greener-chemicals> (EC, 2017; Pristupljeno 05.01.2025.).
189. <https://woodpelletplant.com/media-reports/biomass-pellet-chemical-element-analysis.html> (WPP, 2025; Pristupljeno 01.10.2025.).
190. <https://www.angi.com/articles/pellet-stove-parts.htm> (Pristupljeno 28.01.2025.).
191. <https://www.biofuel-trade-agency.com/biofuels/sunflower-husk-pellets-44/sunflower-husk-pellets> (Pristupljeno 19.01.2025.).

192. <https://www.clrn.org/how-to-calculate-percent-error-in-chemistry> (Pristupljeno 20.08.2025.).
193. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from> (Pristupljeno 19.11.2025.).
194. <https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/pelletstovefs08-04-11.pdf> (Pristupljeno 28.01.2025.).
195. https://www.epa.ie/publications/compliance--enforcement/air/air-guidance-notes/AG2_Emissions-Monitoring-Guidance-Note_May2021_v7.pdf (EPA, 2021; Pristupljeno 29.01.2025.).
196. <https://www.equusvitalis.com/agrobs/corn-pellets> (Pristupljeno 24.09.2025.).
197. <https://www.fas.usda.gov/data/production/0410000> (USDA, 2025c; Pristupljeno 15.02.2026.).
198. <https://www.fas.usda.gov/data/production/0440000> (USDA, 2025b; Pristupljeno 15.02.2026.).
199. <https://www.fas.usda.gov/data/production/2222000> (USDA, 2025a; Pristupljeno 15.02.2026.).
200. <https://www.fas.usda.gov/data/production/2224000> (USDA, 2025d; Pristupljeno 15.02.2026.).
201. <https://www.gpfeeds.co.uk/products/sunflower> (Pristupljeno 26.09.2025.).
202. <https://www.hrsume.hr/sume/sume-u-hrvatskoj/> (Pristupljeno 03.10.2024.).
203. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025> (Pristupljeno 02.12.2025.).
204. <https://www.kwmach.com/blog/hardwood-biomass-pellets-materials-properties-and-uses> (Pristupljeno 11.09.2025.).
205. <https://www.renkeer.com/different-units-in-gas-detection> (Pristupljeno 24.06.2025.).
206. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/251118%20GBSR.pdf> (Pristupljeno 02.02.2026.).
207. <https://www.xos.com/petroleum/auto-matrix-correction-sulfur-analysis> (XOS; Pristupljeno 28.07.2025.).
208. Hubetska, T. S., Kobylinska, N. G., García, J. R. (2021). Sunflower biomass power plant by-products: Properties and its potential for water purification of organic pollutants. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 157, 105237.
209. Ibitoye, S. E., Mahamood, R. M., Jen, T. C., Loha, C., Akinlabi, E. T. (2023). An overview of biomass solid fuels: Biomass sources, processing methods, and morphological and microstructural properties. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 8(4), 333-360.

210. Ievinsh, G. (2023). Water content of plant tissues: So simple that almost forgotten? *Plants*, 12(6), 1238.
211. Imwinkelried, G., Fermanelli, C. S., Teruel, M. A., Saux, C., Blanco, M. B. (2024). Comprehensive analysis of soybean residues pyrolysis products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106367.
212. Islamova, S., Karaeva, J., Timofeeva, S., Kadyirov, A. (2021). An experimental study of sunflower husk pellets combustion. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 37, p. 00070). EDP Sciences.
213. Jach-Nocoń, M., Pełka, G., Luboń, W., Mirowski, T., Nocoń, A., Pachytel, P. (2021). An assessment of the efficiency and emissions of a pellet boiler combusting multiple pellet types. *Energies*, 14(15), 4465.
214. Jaén, R. L., Pupo, L. P., Lora, E. E. S., Eras, J. J. C., Gutiérrez, A. S. (2025). Assessing biomass production and electricity generation potential in current and future decarbonization scenarios in Cuba until 2050. *Energy Conversion and Management*, 332, 119698.
215. Jagtap, A., Kalbande, S. (2023). Multiparametric optimization and statistical modelling of pelletization process: Effect of independent variables on physicochemical properties of soybean straw pellets. *Bioresource Technology Reports*, 23, 101527.
216. Jagtap, A., Kalbande, S. R. (2022). Field efficacy of selected insecticides against shoot and fruit borer [*Earias vittella* (Fabricius)] of okra [*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench]. *International Journal of Agricultural Sciences*, 18(1), 18–23.
217. Jaozandry, C. C., Leban, J. M., Legout, A., van der Heijden, G., Santenoise, P., Nourrisson, G., Saint-André, L. (2024). Advances in assessing Ca, K, and Mn translocation in oak tree stems (*Quercus* spp.). *Heliyon*, 10(13).
218. Jarunglumert, T., Bampenrat, A., Sukkathanyawat, H., Pavasant, P., Prommuak, C. (2022). Enhancing the potential of sugarcane bagasse for the production of ENplus quality fuel pellets by torrefaction: An economic feasibility study. *Biofuel Research Journal*, 9(4), 1707–1720.
219. Jasinskas, A., Domeika, R., Sarauskis, E., Mioldazys, R., Kucinskas, V., Annuk, A. (2015). Research in oak waste preparation and utilization for burning. 210-215.
220. Jasinskas, A., Mioldazys, R., Jotautienė, E., Domeika, R., Vaiciukevičius, E., Marks, M. (2020). Technical, environmental, and qualitative assessment of the oak waste processing and its usage for energy conversion. *Sustainability*, 12(19), 8113.
221. Jelonek, Z., Drobniak, A., Mastalerz, M., Jelonek, I. (2021). Emissions during grilling with wood pellets and chips. *Atmospheric Environment: X*, 12, 100140.

222. Jenkins, B., Baxter, L. L., Miles Jr, T. R., Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54(1–3), 17–46.
223. Jensen, C. U., Rodriguez Guerrero, J. K., Karatzos, S., Olofsson, G., Iversen, S. B. (2017). Fundamentals of Hydrofaction™: Renewable crude oil from woody biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7(4), 495–509.
224. Jensen, P. A., Stenholm, M., Hald, P. (1997). Deposition investigation in straw-fired boilers. *Energy and Fuels*, 11(5), 1048–1055.
225. Jeong, T. Y., Sh, L., Kim, J. H., Lee, B. H., Jeon, C. H. (2019). Experimental investigation of ash deposit behavior during co-combustion of bituminous coal with wood pellets and empty fruit bunches. *Energies*, 12(11), 2087.
226. Jiang, X., Cheng, W., Liu, J., Zhang, D., Zheng, Y., Cai, H. (2020). Effect of moisture content during preparation on the physicochemical properties of pellets made from different biomass materials. *BioResources*, 15(1), 557.
227. Jiménez-Mendoza, M. E., Ruiz-Aquino, F., Rutiaga-Quñones, J. G., Feria-Reyes, R., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., Puc-Kauil, R., Gabriel-Parra, R. (2025). Chemical and energetic evaluation of densified biomass of *Quercus laurina* and *Quercus rugosa* for bioenergy production. *Forests*, 16(5), 856.
228. John, N., Fathima, P. S., Harsha, V. S., Paul, N. M., Nisha, P. (2024). Physical conversion of biomass: Dewatering, drying, size reduction, densification, and separation. In *Handbook of Biomass* (pp. 987–1013). Springer Nature Singapore.
229. Jomantas, G., Buinevičius, K., Šereika, J. (2025). Sulfur emission dependence on various factors during biomass combustion. *Energies*, 18(7), 1701.
230. Joshi, N. C., Gururani, P., Talniya, N. C. (2024). An updated review on biomass-based hydrogen production. *Biointerface Res. Appl. Chem*, 14(4), 98.
231. Jóvér, J., Antal, K., Zsembeli, J., Blaskó, L., Tamás, J. (2018). Assessment of gross calorific value of crop and bio-energy residues.
232. Juszczak, M. (2011). Experimental study of pollutant concentrations from a heat station supplied with wood pellets. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20(6).
233. Kabay, N., Aköz, F. (2020). Investigation of factors affecting core compressive strength and non-destructive testing of concrete. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(1), 171–182.
234. Kabir, I. I., Wang, C., Yuen, A. C. Y., Yeoh, G. H. (2022). Cellulose-based flame retardants for polymeric materials. In *Bio-Based Flame-Retardant Technology for Polymeric Materials* (pp. 97–131). Elsevier.

235. Kacálková, L., Tlustoš, P., Száková, J. (2014). Chromium, nickel, cadmium, and lead accumulation in maize, sunflower, willow, and poplar. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(3).
236. Kahraman, A. (2022). Changes in the mineral composition in soybeans (*Glycine max* L.) depending on cultivation factors. *Journal of Elementology*, 27(3), 727–738.
237. Kaliyan, N., Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359.
238. Kaliyan, N., Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101(3), 1082–1090.
239. Kamperidou, V. (2022). Quality analysis of commercially available wood pellets and correlations between pellets characteristics. *Energies*, 15(8), 2865.
240. Kanageswari, S. V., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (2022). Dust and particulate matter generated during handling and pelletization of herbaceous biomass: A review. *Energies*, 15(7), 2634.
241. Kang, Q., Appels, L., Tan, T., Dewil, R. (2014). Bioethanol from lignocellulosic biomass: Current findings determine research priorities. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 298153.
242. Karamarkovic, R., Karamarković, V., Nikolić, M., Marjanović, M. (2015). Design and experimental investigation of a top-fed pellet burner. In *V Regional Conference Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern Europe*, Zlatibor, Serbia, June 24–27, 2015.
243. Karamchandani, A., Yi, H., Puri, V. M. (2014). Measurement and comparison of mechanical properties of ground corn stover, switchgrass, and willow and their pellet qualities. In *2014 Montreal, Quebec, Canada, July 13–16, 2014 (p. 1)*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
244. Karunanithy, C., Wang, Y., Muthukumarappan, K., Pugalandhi, S. (2012). Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks. *Biotechnology Research International*, 2012(1), 165202.
245. Kažimírová, V., Opáth, R. (2016). Biomass combustion emissions. *Research in Agricultural Engineering*, 62(Special Issue), 61–65.
246. Khalil, M., Ruggieri, S., Uva, G. (2022). Assessment of structural behavior, vulnerability, and risk of industrial silos: State-of-the-art and recent research trends. *Applied Sciences*, 12(6), 3006.

247. Kim, S. (2018). Evaluation of alkali-pretreated soybean straw for lignocellulosic bioethanol production. *International Journal of Polymer Science*, 2018(1), 5241748.
248. Kindzera, D., Kochubei, V. (2025). Comparison of the energy properties of sunflower stalk fibers for solid biofuel production. *Journal of Chemistry*, 2025(1), 7990012.
249. Kluska, J., Matej-Lukowicz, K., Nawrot, N. (2024). Characterization of sunflower waste carbonization: Energy balance and water holding properties. *Sustainability*, 16(24), 11234.
250. Kocabiyik, H., Polat, R., Oktem, A. (2009). Determination of cutting properties, protein and mineral content of silage corn stalk. *Asian Journal of Chemistry*, 21(7), 5580.
251. Kofman, P. D. (2016). Review of worldwide standards for solid biofuels. *Council for Forest Research and Development, Processing/Products*, 39, 1–12.
252. Konovalova, O., Omelkovets, T., Hurtovetko, I., Kalista, M., Shcherbakova, O., Sydora, N. (2024). Study of the mineral element content of red oak (*Quercus rubra* L.) in comparison with soil. *Journal of Faculty of Pharmacy of Ankara University*, 48(2), 608–620.
253. Kontek, M., Brezinščak, L., Jurišić, V. (2021). Mogućnost proizvodnje energije iz kukuruzovine uzgojene u različitim sustavima obrade tla na Pokušalištu Šašinovec. In *Proceedings of 56. Croatian and 16. International Symposium on Agriculture* (pp. 774–778). Fakultet agrobiotehničkih znanosti Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.
254. Koppejan, J., Van Loo, S. (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.
255. Kovačić, Đ., Kralik, D., Rupčić, S., Jovičić, D., Spajić, R., Tišma, M. (2017). Soybean straw, corn stover and sunflower stalk as possible substrates for biogas production in Croatia: A review. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 31(3), 187–198.
256. Kożuch, A., Cywicka, D., Adamowicz, K., Wieruszewski, M., Wysocka-Fijorek, E., Kielbasa, P. (2023). The use of forest biomass for energy purposes in selected European countries. *Energies*, 16(15), 5776.
257. Kraszkiewicz, A., Przywara, A., Parafiniuk, S. (2022). Emission of nitric oxide during the combustion of various forms of solid biofuels in a low-power heating device. *Energies*, 15(16), 5960.
258. Kraszkiewicz, A., Santoro, F., Pascuzzi, S. (2020). Emission of sulphur oxides from agricultural solid biofuels combustion. *Agricultural Engineering*, 24.
259. Krička, T. (2010). Potencijal proizvodnje energije iz biljnih ostataka u poljoprivredi i šumarstvu. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb, 25.
260. Krička, T., Bilandžija, N., Jurisic, V., Voca, N., Matin, A. (2012). Energy analysis of main residual biomass in Croatia. *African Journal of Agricultural Research*, 7(48), 6383–6388.

261. Krička, T., Leto, J., Bilandžija, N., Grubor, M., Jurišić, V., Matin, A., Voća, N., Dović, D., Horvat, I. (2017). Tehnologija uzgoja, dorade i skladištenja energetske kulture *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb.
262. Krička, T., Zjalić, S., Bischof, S., Vican, D., Luketić, D., Kos, T., L., J., Zgorelec, Ž., Bilandžija, N., Bilandžija, D., Matin, A., Jurišić, V., Grubor, M., Galić, M., Peter, A., Vujasinović, E., Kovačević, Z., Pavunc Samaržija, M., Zdunić, Z. (2023). Proizvodnja hrane, biokompozita i biogoriva iz žitarica u kružnom gospodarstvu. Sveučilište u Zadru, Zadar.
263. Krutul, D., Zielenkiewicz, T., Zawadzki, J., Radomski, A., Antczak, A., Drozddek, M. (2014). Influence of urban environment originated heavy metal pollution on the extractives and mineral substances content in bark and wood of oak (*Quercus robur* L.). *Wood Research*, 59(1), 177–190.
264. Kubík, L., Adamovský, F. (2016). Mechanical properties of biomass pellets.
265. Kubik, L., Kažimírová, V. (2015). Mechanical properties of pellets in compression. *Research in Agricultural Engineering*, 61(Special Issue), 1–8.
266. Kumar, A., Kumar, N., Baredar, P., Shukla, A. (2015). A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 530–539.
267. Kumar, A., Swarnalatha, A. P., Shwetha, J., Saravanan, P., Hatamleh, A. A., Al-Dosary, M. A., Mani, R. R., Chung, W. J., Chang, S. W., Ravindran, B. (2024). Pyrolysis behaviour and synergistic effect in co-pyrolysis of wheat straw and polyethylene terephthalate: A study on product distribution and oil characterization. *Heliyon*, 10(17).
268. Kumar, P., Subbarao, P. M. V., Kala, L., Vijay, V. K. (2022). Influence of physical, mechanical, and thermal properties of biomass pellets from agriculture residue: Pearl millet cob and mix. *Bioresource Technology Reports*, 20, 101278.
269. Kundu, K., Chatterjee, A., Bhattacharyya, T., Roy, M., Kaur, A. (2018). Thermochemical conversion of biomass to bioenergy: A review. In *Prospects of alternative transportation fuels* (pp. 235–268).
270. Larki, I., Zahedi, A., Asadi, M., Forootan, M. M., Farajollahi, M., Ahmadi, R., Ahmadi, A. (2023). Mitigation approaches and techniques for combustion power plants flue gas emissions: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 166108.
271. Larsson, S. H., Rudolfsson, M., Thyrel, M., Örberg, H., Kalén, G., Wallin, M., Lestander, T. A. (2012). Temperature controlled feed layer formation in biofuel pellet production. *Fuel*, 94, 81–85.

272. Le, D. M., Sørensen, H. R., Knudsen, N. O., Schjoerring, J. K., Meyer, A. S. (2014). Biorefining of wheat straw: Accounting for the distribution of mineral elements in pretreated biomass by an extended pretreatment-severity equation. *Biotechnology for Biofuels*, 7(1), 141.
273. Lee, Y. W., Ryu, C., Lee, W. J., Park, Y. K. (2011). Assessment of wood pellet combustion in a domestic stove. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 13(3), 165–172.
274. Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351–360.
275. Li, Z., Huang, J., Zhang, W., Yu, H., Wang, Y. (2025). Simultaneous decontamination for ammonia nitrogen and phosphate efficiently by crystal morphology MgO-coated functional biochar derived from sludge and sunflower stalk. *Toxics*, 13(7), 577.
276. Lieskovsky, M., Ferencík, M., Gochev, Z., Marinov, K. (2013). Evaluation of energy potential of wood pellets. *Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design*, 2(1), 173–182.
277. Lindley, J. A., Smith, G. M. (1988). Heat energy from sunflower residue. *Transactions of the ASAE*, 31(4), 1197–1202.
278. Lisowski, A., Matkowski, P., Dąbrowska, M., Piątek, M., Świętochowski, A., Klonowski, J., Mieszkalski, L., Reshetiuk, V. (2020). Particle size distribution and physicochemical properties of pellets made of straw, hay, and their blends. *Waste and Biomass Valorization*, 11(1), 63–75.
279. Liu, D., Teng, D., Zhu, Y., Wang, X., Wang, H. (2023). Optimization of process parameters for pellet production from corn stalk rinds using Box–Behnken design. *Energies*, 16(12), 4796.
280. Liu, Z., Cao, Y., Wang, Z., Ren, H., Lai, Y. (2015). The utilization of soybean straw. I. Fiber morphology and chemical characteristics. *BioResources*, 10(2).
281. Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G. (2013). Manufacturing wheat straw pellet with wood waste and binders. *CSBE Paper No. CSBE13-55*.
282. Lunguleasa, A., Olarescu, A., Spirchez, C. (2024). Pellets obtained from the husks of sunflower seeds and beech sawdust for comparison. *Forests*, 15(6), 902.
283. Machmudah, S., Kanda, H., Goto, M. (2017). Hydrolysis of biopolymers in near-critical and subcritical water. In *Water extraction of bioactive compounds* (pp. 69–107). Elsevier.
284. Mack, R., Schön, C., Kuptz, D., Hartmann, H., Brunner, T., Obernberger, I., Behr, H. M. (2024). Influence of wood species and additives on emission behavior of wood pellets in a residential pellet stove and a boiler. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(17), 20241–20260.

285. Madejón, P., Murillo, J. M., Marañón, T., Cabrera, F., Soriano, M. A. (2003). Trace element and nutrient accumulation in sunflower plants two years after the Aznalcóllar mine spill. *Science of the Total Environment*, 307(1–3), 239–257.
286. Mamvura, T. A., Danha, G. (2020). Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, 6(3).
287. Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (2002). Grinding performance and physical properties of selected biomass. In 2002 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
288. Marinescu, M. V., Volpé, S., Desrochers, L., Röser, D. (2015). Basic procedures for sampling and analyzing woody biomass. *Advantage Report*, 15(5). FPInnovations, Vancouver, British Columbia.
289. Marinković, A., Repić, B., Dakić, D., Mladenović, M., Nemoda, S. (2011). Experimental determination of the effects of additives on agricultural biomass ash characteristics. *Savremena Poljoprivredna Tehnika*, 37(2), 175–184.
290. Marrot, L., Candelier, K., Valette, J., Lanvin, C., Horvat, B., Legan, L., DeVallance, D. B. (2022). Valorization of hemp stalk waste through thermochemical conversion for energy and electrical applications. *Waste and Biomass Valorization*, 13(4), 2267–2285.
291. Martelli-Tosi, M., Torricillas, M. D. S., Martins, M. A., Assis, O. B. G. D., Tapia-Blácido, D. R. (2016). Using commercial enzymes to produce cellulose nanofibers from soybean straw. *Journal of Nanomaterials*, 2016(1), 8106814.
292. Martínez-Cartas, M. L., Cuevas-Aranda, M., Sánchez, S. (2024). Harnessing of sunflower stalks by hydrolysis and fermentation with *Hansenula polymorpha* to produce biofuels. *Polymers*, 16(24), 3548.
293. Masche, M., Puig-Arnau, M., Jensen, P. A., Holm, J. K., Clausen, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. (2019). From wood chips to pellets to milled pellets: The mechanical processing pathway of Austrian pine and European beech. *Powder Technology*, 350, 134–145.
294. Masiá, A. T., Buhre, B. J. P., Gupta, R. P., Wall, T. F. (2007). Characterising ash of biomass and waste. *Fuel Processing Technology*, 88(11–12), 1071–1081.
295. Mason, P. E., Darvell, L. I., Jones, J. M., Williams, A. (2016). Observations on the release of gas-phase potassium during the combustion of single particles of biomass. *Fuel*, 182, 110–117.
296. Matijašević, V., Ogrizović, Đ. (2025). Transformacija poljoprivrednog otpada u pelet za zagrevanje domaćinstava. In 54. Konferencija otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad: Zbornik radova, 2.–4. april 2025., Sokobanja, Srbija (pp. 175–180).

297. Matijašević, V., Tekáč, V., Beňo, Z. (2025). Assessing the emissions and suitability of agro-based pellets for small-scale residential heating appliances in Serbia. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(2).
298. Matin, A., Krička, T., Bilandžija, N., Jurišić, V., Grubor, M., Antonović, A., Lakić, J., Voća, N. (2018). Utjecaj sortimenta na goriva i negoriva svojstva biomase stabljike soje. In V. Rozman, Z. Antunović (Eds.), *Proceedings SA* (pp. 319–322).
299. Matin, A., Krička, T., Grubor, M., Leto, J., Bilandžija, N., Voća, N., Jurišić, V., Zmaić, K., Kiš, D., Kopilović, I. (2019). Iskoristivost posliježetvenih ostataka za proizvodnju zelene energije. *Osijek*.
300. Matin, A., Krička, T., Jurišić, V., Voća, N., Antonović, A., Bilandžija, N., Grubor, M., Miličević, I. (2016). Iskoristivost biomase kukuruza za proizvodnju toplinske energije. In 51st Croatian and 11th International Symposium on Agriculture. *Proceedings* (pp. 489–492).
301. Matin, B., Brandić, I., Matin, A., Ištvančić, J., Antonović, A. (2024). Possibilities of liquefied spruce (*Picea abies*) and oak (*Quercus robur*) biomass as an environmentally friendly additive in conventional phenol–formaldehyde resin wood adhesives. *Energies*, 17(17), 4456.
302. Matin, B., Jovičić, N., Krička, T., Jurišić, V., Matin, A., Grubor, M., Bilandžija, N., Đurović, A., Antonović, A. (2024). Comparison of the physico-chemical properties of liquefied biomass from oak (*Quercus robur* L.) and walnut shell (*Juglans regia* L.) for the production of biocomposites. In 59. hrvatski i 19. međunarodni Simpozij agronoma (pp. 489–493).
303. Matkowski, P., Lisowski, A., Świątochowski, A. (2020). Characterisation of wheat straw pellets individually and in combination with cassava starch or calcium carbonate under various compaction conditions: Determination of pellet strength and water absorption capacity. *Materials*, 13(19), 4375.
304. Matula, T., Labaj, J., Vadasz, P., Plešingerová, B., Smalcerz, A., Blacha, L. (2023). Application of sunflower husk pellet as a reducer in metallurgical processes. *Materials*, 16(20), 6790.
305. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46.
306. Metakovsky, E., Melnik, V. A., Pascual, L., Wrigley, C. W. (2024). How important are genetic diversity and cultivar uniformity in wheat? The case of gliadins. *Genes*, 15(7), 927.
307. Miao, M., Deng, B., Kong, H., Yang, H., Lyu, J., Jiang, X., Zhang, M. (2021). Effects of volatile matter and oxygen concentration on combustion characteristics of coal in an oxygen-enriched fluidized bed. *Energy*, 220, 119778.

308. Mijailovic, I., Radojicic, V., Ecim-Djuric, O., Stefanovic, G., Kulic, G. (2014). Energy potential of tobacco stalks in briquettes and pellets production. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 15(3), 1034-1041.
309. Mileva, N., Zlateva, P., Ivanov, M., Krumov, K., Terziev, A., Comarla, A. (2025). Numerical and experimental analyses of flue gas emissions from biomass pellet combustion in a domestic boiler. *Eng*, 6(10), 257.
310. Miranda, T., Arranz, J. I., Montero, I., Román, S., Rojas, C. V., Nogales, S. (2012). Characterization and combustion of olive pomace and forest residue pellets. *Fuel Processing Technology*, 103, 91–96.
311. Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F. J., Arranz, J. I., Rojas, C. V., Nogales, S. (2015). A review of pellets from different sources. *Materials*, 8(4), 1413–1427.
312. Miroshnichenko, I. V., Miroshnichenko, D. V., Shulga, I. V., Balaeva, Y. S., Pereima, V. V. (2019). Calorific value of coke. 1. Prediction. *Coke and Chemistry*, 62, 143–149.
313. Miyawaki, N., Fukushima, T., Mizuno, T., Inoue, M., Takisawa, K. (2021). Effect of wood biomass components on self-heating. *Bioresources and Bioprocessing*, 8, 1–6.
314. Mladenović, M. R., Dakič, D., Nemoda, S., Paprika, M., Komatina, M., Repić, B., Erić, A. (2016). The combustion of biomass - the impact of its types and combustion technologies on the emission of nitrogen oxide. *Hemijska Industrija*, 70, 287–298.
315. Moiceanu, G., Paraschiv, G., Voicu, G., Dinca, M., Negoita, O., Chitoiu, M., Tudor, P. (2019). Energy consumption at size reduction of lignocellulose biomass for bioenergy. *Sustainability*, 11(9), 2477.
316. Molyarova, T., Vorobyov, E., Akimkin, V. (2025). C/O ratios in self-gravitating protoplanetary discs with dust evolution. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 42, e004.
317. Moon, Y. H., Yang, J., Koo, B. C., An, J. W., Cha, Y. L., Yoon, Y. M., Yu, G. D., An, G. H., Park, I. H., Choi, I. H. (2014). Analysis of factors affecting *Miscanthus* pellet production and pellet quality using response surface methodology. *BioResources*, 9(2).
318. Moore, T. C. (1974). Mineral nutrition of sunflowers. In *Research experiences in plant physiology: A laboratory manual* (pp. 361–379). Springer Berlin Heidelberg.
319. Morissette, R., Savoie, P., Villeneuve, J. (2013). Corn stover and wheat straw combustion in a 176-kW boiler adapted for round bales. *Energies*, 6(11), 5760–5774.
320. Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple, M., Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6), 673–686.

321. Mota, T. R., Oliveira, D. M. D., Marchiosi, R., Ferrarese-Filho, O., Santos, W. D. D. (2018). Plant cell wall composition and enzymatic deconstruction. *AIMS Bioengineering*, 5(1).
322. Muh, E., Tabet, F., Amara, S. (2021). Biomass conversion to fuels and value-added chemicals: A comprehensive review of the thermochemical processes. *Current Alternative Energy*, 4(1), 3–25.
323. Mukamparirwa, V., Maliondo, S. M., Mugunga, C. P. (2024). Synergistic and antagonistic effects of mixed-leaf litter decomposition on nutrient cycling. *Plants*, 13(22), 3204.
324. Mungunkhuyag, K., Bayarsukh, Z., Ganzorig, O., Batdorj, B. (2021). Chemical composition and nutritional value of some varieties of soybean cultivated in Mongolia. *Mongolian Journal of Agricultural Sciences*, 33(2), 31-37.
325. Nath, B., Chen, G., Bowtell, L., Nguyen-Huy, T. (2024). Pyrolysis of wheat straw pellets in a pilot-scale reactor: Effect of temperature and residence time. *Energy Science & Engineering*, 12(8), 3524-3539.
326. Nath, B., Chen, G., Bowtell, L., Nguyen-Huy, T. (2025). Enhancement of wheat straw pellet quality for bioenergy through additive blending. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 75(5), 387-404.
327. Ndahirwa, D. (2023). Valorization of different biomass ashes and sunflower particles in bio-based building materials: Relation composition-structure-properties (Doctoral dissertation, Normandie Université).
328. Nguyen, Q. N., Cloutier, A., Achim, A., Stevanovic, T. (2016). Fuel properties of sugar maple and yellow birch wood in relation with tree vigor. *BioResources*, 11(2), 3275-3288.
329. Nie, J., Pan, Y., Shi, J., Guo, Y., Yan, Z., Duan, X., Xu, M. (2015). A comparative study on the uptake and toxicity of nickel added in the form of different salts to maize seedlings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(12), 15075-15087.
330. Nielsen, N. P. K., Gardner, D. J., Poulsen, T., Felby, C. (2009). Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 414-425.
331. Nikolaisen, L., Nørgaard Jensen, T., Hjuler, K., Busk, J., Junker, H., Sander, B., Baxter, L., Bloch, L. (2002). Quality characteristics of biofuel pellets (File no. 51161/00-0028, Eltra, PSO project no. 1996). Danish Technological Institute, Energy Division, Denmark.
332. Nolan, A., McDonnell, K., Devlin, G. (2010). Economic analysis of manufacturing costs of pellet production in the Republic of Ireland using non-woody biomass. *The Open Renewable Energy Journal*. 3.

333. Nti, C. A., Plahar, W. A., Annan, N. T. (2016). Development and quality characteristics of shelf-stable soy-agushie: a residual by-product of soymilk production. *Food Science & Nutrition*, 4(2), 315-321.
334. Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235-242.
335. Nunes, L. J., Matias, J. C. D. O., Catalao, J. P. D. S. (2017). *Torrefaction of biomass for energy applications: From fundamentals to industrial scale*. Academic Press.
336. Núñez-Retana, V. D., Wehenkel, C., Vega-Nieva, D. J., García-Quezada, J., Carrillo-Parra, A. (2019). The bioenergetic potential of four oak species from northeastern Mexico. *Forests*, 10(10), 869.
337. Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973-982.
338. Obernberger, I., Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669.
339. Oduntan, O. B., Koya, O. A. (2015). Effect of speed, die sizes and moisture contents on durability of cassava pellet in pelletizer. *Research in Agricultural Engineering*, 61, 35-39.
340. Ogbu, C. C., Twumasi, Y. A., Ning, Z. H., Attamah, G. N., Ezeaku, V. I., Oladigbolu, O. I. (2022). Analysis of Forest Waste Management and Recycling Potential in Nigeria. *Natural Resources*, 13(10), 191-205.
341. Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., Kozinski, J. A. (2021). Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 2145-2169.
342. Oktem, A. (2008). Mineral composition of some sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt.) genotypes under semi arid region. *Asian Journal of Chemistry*, 20(1), 723.
343. Omer, S. E., Hodžić, D., Gaco, D. (2018). Safety in pellet production from biomass. In 7th International Professional and Scientific Conference "Occupational Safety and Health", Zadar, Croatia.
344. Ozturk, H. H., Ayhan, B., Turgut, K. (2019). An assessment of the energetic properties of fuel pellets made by agricultural wastes. *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*, 8.
345. Pagano, M. C., Miransari, M. (2016). The importance of soybean production worldwide. In *Abiotic and biotic stresses in soybean production* (pp. 1-26). Academic Press.

346. Palmer, D., Tubby, I., Hogan, G., Rolls, W. (2011). Biomass heating: A guide to medium scale wood chip and wood pellet systems. Biomass Energy Centre, Forest Research, Farnham.
347. Pant, M., Negi, T., Joseph, D., Negi, A. S., Nainwal, P., Badoni, H., Raman, A., Pant, G. (2024). Analysis of selected macro-and microelement components in the indigenous soybean cultivars from regions of the Western Himalaya in India. *Agronomy*, 14(11), 2452.
348. Paraschiv, G., Moiceanu, G., Voicu, G., Chitoiu, M., Cardei, P., Dinca, M. N., Tudor, P. (2021). Optimization issues of a hammer mill working process using statistical modelling. *Sustainability*, 13(2), 973.
349. Pazalja, M., Salihović, M., Sulejmanović, J., Smajović, A., Begić, S., Špirtović-Halilović, S., Sher, F. (2021). Heavy metals content in ashes of wood pellets and the health risk assessment related to their presence in the environment. *Scientific Reports*, 11(1), 17952.
350. Pazó, J. A., Granada, E., Saavedra, Á., Patiño, D., Collazo, J. (2010). Heterogenic solid biofuel sampling methodology and uncertainty associated with prompt analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 11(5), 2118-2133.
351. Pełka, G., Jach-Nocoń, M., Paprocki, M., Jachimowski, A., Luboń, W., Nocoń, A., Wygoda, M., Wyczesany, P., Pachytel, P., Mirowski, T. (2023). Comparison of emissions and efficiency of two types of burners when burning wood pellets from different suppliers. *Energies*, 16(4), 1695.
352. Perera, F. (2018). Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: Solutions exist. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 16.
353. Petlickaitė, R., Jasinskas, A., Domeika, R., Pedišius, N., Lemanas, E., Praspaliauskas, M., Kukharets, S. (2023). Evaluation of the Processing of Multi-Crop Plants into Pelletized Biofuel and Its Use for Energy Conversion. *Processes*, 11(2), 421.
354. Petraru, A., Ursachi, F., Amariei, S. (2021). Nutritional characteristics assessment of sunflower seeds, oil and cake. Perspective of using sunflower oilcakes as a functional ingredient. *Plants*, 10(11), 2487.
355. Petrocelli, D., Lezzi, A. M. (2014). CO and NO emissions from pellet stoves: An experimental study. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 501, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
356. Phadtare, P., Kalbande, S. (2024). Assessment of agro-residues as biochar feedstock: Cotton stalk, soybean straw, and pigeon pea stalk. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(6S), 36-40.

357. Pietsch, W. B. (2008). Agglomeration processes: Phenomena, technologies, equipment. John Wiley & Sons.
358. Plazonić, I., Barbarić-Mikočević, Ž., Antonović, A. (2016). Chemical composition of straw as an alternative material to wood raw material in fibre isolation. *Drvna Industrija*, 67(2), 119-125.
359. Poisa, L., Bumane, S., Cubars, E., Platace, R. (2017). Evaluation of sulphur content in different energy crops. In Proceedings of International Conference “Engineering for Rural Development”: 1075-1079.
360. Pollex, A., Zeng, T., Khalsa, J., Erler, U., Schmersahl, R., Schön, C., Kuptz, D., Lenz, V., Nelles, M. (2018). Content of potassium and other aerosol forming elements in commercially available wood pellet batches. *Fuel*, 232, 384-394.
361. Polonini, L. F., Petrocelli, D., Lezzi, A. M. (2023). The effect of flue gas recirculation on CO, PM and NO_x emissions in pellet stove combustion. *Energies*, 16(2), 954.
362. Polonini, L. F., Petrocelli, D., Parmigiani, S. P., Lezzi, A. M. (2019). Influence on CO and PM emissions of an innovative burner pot for pellet stoves: An experimental study. *Energies*, 12(4), 590.
363. Popović, M., Katičić Bogdan, I., Varga, F., Šatović, Z., Bogdan, S., Ivanković, M. (2023). Genetic diversity in peripheral pedunculate oak (*Quercus robur* L.) provenances—Potential climate change mitigators in the center of distribution despite challenges in natural populations. *Forests*, 14(12), 2290.
364. Pradhan, P., Arora, A., Mahajani, S. M. (2018a). Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. *Energy for Sustainable Development*, 43, 1-14.
365. Pradhan, P., Mahajani, S. M., Arora, A. (2018b). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232.
366. Pradhan, P., Mohan, O., Kurian, V., Kumar, A. (2025). Production and quality analysis of biofuel pellets from Canadian forest and agricultural biomass. *Biomass and Bioenergy*, 194, 107697.
367. Prasanthi, P. S., Naveena, N., Vishnuvardhana Rao, M., Bhaskarachary, K. (2017). Compositional variability of nutrients and phytochemicals in corn after processing. *Journal of Food Science and Technology*, 54(5), 1080–1090.
368. Praspaliauskas, M., Pedišius, N., Čepauskienė, D., Valantinavičius, M. (2020). Study of chemical composition of agricultural residues from various agro-mass types. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(4), 937–948.

369. Probst, K. V., Ambrose, R. P. K., Pinto, R. L., Bali, R., Krishnakumar, P., Ileleji, K. E. (2013). The effect of moisture content on the grinding performance of corn and corncobs by hammermilling. *Transactions of the ASABE*, 56(3), 1025–1033.
370. Przywara, M., Przywara, R., Zapała, W., Opaliński, I. (2023). Mechanical properties of solid biomass as affected by moisture content. *AgriEngineering*, 5(3), 1118–1135.
371. Puri, L., Hu, Y., Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuels*, 2, 1378361.
372. Quan, C., Gao, N. (2016). Copyrolysis of biomass and coal: A review of effects of copyrolysis parameters, product properties, and synergistic mechanisms. *BioMed Research International*, 2016, 6197867.
373. Rabbat, C., Villot, A., Awad, S., Andres, Y. (2023). Gaseous and particulate matter emissions from the combustion of biomass-based insulation materials at end-of-life in a small-scale biomass heating boiler. *Fuel*, 338, 127182.
374. Rabi Prasad, B., Polaki, S., Padhi, R. K., Manoja, D. (2024). Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass and their effective delignification for sustainable bioenergy. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 28(1).
375. Ram, M., Mondal, M. K. (2022). Biomass gasification: A step toward cleaner fuel and chemicals. In *Biofuels and Bioenergy* (pp. 253–276). Elsevier.
376. Ramos, A., Monteiro, E., Rouboa, A. (2022). Biomass pre-treatment techniques for the production of biofuels using thermal conversion methods—a review. *Energy Conversion and Management*, 270, 116271.
377. Rashedi, A., Muhammadi, I. U., Hadi, R., Nadeem, S. G., Khan, N., Ibrahim, F., Hassan, M. Z., Khanam, T., Jeong, B., Hussain, M. (2022). Characterization and life cycle exergo-environmental analysis of wood pellet biofuel produced in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Sustainability*, 14(4), 2082.
378. Rathore, N. S., Pawar, A., Panwar, N. L. (2023). Kinetic analysis and thermal degradation study on wheat straw and its biochar from vacuum pyrolysis under non-isothermal condition. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(9), 7547–7559.
379. Rodino, S., Voicilă, D. N., Sterie, C. M. (2024). The use of forestry and agricultural biomass in the production of pellets. In *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, 18(1), 955–964.
380. Roman, K., Grzegorzewska, E. (2024). The comparison of physical and chemical properties of pellets and briquettes from hemp (*Cannabis sativa* L.). *Energies*, 17(9), 2210.

381. Romaniuk, W., Savinykh, P., Borek, K., Roman, K., Isupov, A. Y., Moshonkin, A., Walowski, G., Roman, M. (2021). The application of similarity theory and dimensional analysis to the study of centrifugal-rotary chopper of forage grain. *Energies*, 14(15), 4501.
382. Ronoh, B. C., Cherop, P. T., Masinde, B. H. (2025). Determination of fixed carbon of blended briquettes of sawdust, maize stalks and coffee husks: A case study of tea industry in Kericho County, Kenya. *Science Mundi*, 5(2), 21–35.
383. Rupasinghe, R. L., Perera, P., Bandara, R., Amarasekera, H., Vlosky, R. (2023). Insights into properties of biomass energy pellets made from mixtures of woody and non-woody biomass: A meta-analysis. *Energies*, 17(1), 54.
384. Rymuza, K., Radzka, E., Wysokiński, A. (2020). Nitrogen uptake from different sources by non-GMO soybean varieties. *Agronomy*, 10(9), 1219.
385. Sabitova, A., Mukhamediyarov, N., Mussabayeva, B., Rakhadilov, B., Aitkazin, N., Bayakhmetova, B., Gaisina, B. (2025). The effect of the granulometric composition of slags on the efficiency of non-ferrous metal extraction. *Processes*, 13(7), 2113.
386. Sadaka, S., Johnson, D. (2010). Biomass combustion (FSA-1056). University of Arkansas Division of Agriculture Cooperative Extension Service.
387. Safarian, S., Unnthorsson, R., Richter, C. (2021). Performance analysis of power generation by wood and woody biomass gasification in a downdraft gasifier. *International journal of applied power engineering (IJAPE)*, 10(1): 80-88.
388. Said, N., Alrowais, R., Abdel-Daiem, M. (2024). Effect of physical and chemical treatment on the characteristics of wheat straw as fuel for energy applications. *BioResources*, 19(4).
389. Saletnik, A., Saletnik, B., Puchalski, C. (2021). Modification of energy parameters in wood pellets with the use of waste cooking oil. *Energies*, 14(20), 6486.
390. Saletnik, B., Saletnik, A., Zagula, G., Bajcar, M., Puchalski, C. (2022). The use of wood pellets in the production of high quality biocarbon materials. *Materials*, 15(13), 4404.
391. Saletnik, B., Saletnik, A., Zagula, G., Bajcar, M., Puchalski, C. (2022). Oak biomass in the form of wood, bark, brushwood, leaves and acorns in the production process of multifunctional biochar. *Molecules*, 27(21), 7191.
392. Samaksaman, U., Punthurat, R., Kritsunankul, C., Manatura, K., Sasujit, K., Chindaraksa, S. (2019). Emission characteristics during combustion of torrefied PET-biomass composite pellets. *Thai Environmental Engineering Journal*, 33(3), 47–55.
393. Sanchumpu, P., Suaili, W., Nonsawang, S., Junsiri, C., Ansuree, P., Laloan, K. (2024). Biomass pellet processing from sugar industry byproducts: A study on pelletizing behavior and energy usage. *Sustainability*, 16(14), 6035.

394. Santana, D. A. R., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., de Oliveira Barros Junior, U., Garcia, D. P., Andrade, C. R., de Paula Protásio, T. (2021). Pelletizing of lignocellulosic wastes as an environmentally friendly solution for the energy supply: Insights on the properties of pellets from Brazilian biomasses. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 11598–11617.
395. Sarkar, N., Ghosh, S. K., Banerjee, S., Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27.
396. Scatolino, M. V., Neto, L. F. C., Protásio, T. D. P., Carneiro, A. D. C. O., Andrade, C. R., Guimarães Júnior, J. B., Mendes, L. M. (2018). Options for generation of sustainable energy: Production of pellets based on combinations between lignocellulosic biomasses. *Waste and Biomass Valorization*, 9(3), 479–489.
397. Schröder, T., Lenz, V., Von Sonntag, J., Ulbricht, T., Khalsa, J., Heidecke, P., Stahl, E., Schön, C., Hartmann, H., Kuptz, D., Woltersdorf, N., Kunde, R., Adeili, M., Volz, F. (2018). Methods for measuring emissions of particulate matter from solid biomass combustion.
398. Scott, C., Desamsetty, T. M., Rahmanian, N. (2025). Unlocking power: Impact of physical and mechanical properties of biomass wood pellets on energy release and carbon emissions in power sector. *Waste and Biomass Valorization*, 16(1), 441–458.
399. Sermyagina, E., Martinez, C. M., Lahti, J., Nikku, M., Mänttari, M., Kallioinen-Mänttari, M., Vakkilainen, E. (2022). Characterization of pellets produced from extracted sawdust: Effect of cooling conditions and binder addition on composition, mechanical and thermochemical properties. *Biomass and Bioenergy*, 164, 106562.
400. Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699–706.
401. Shahzadi, T., Mehmood, S., Irshad, M., Anwar, Z., Afroz, A., Zeeshan, N., Rashid, U., Sughra, K. (2014). Advances in lignocellulosic biotechnology: A brief review on lignocellulosic biomass and cellulases. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 5(3), 246–251.
402. Shevchenko, A. L., Petrov, A. E., Sytchev, G. A., Zaichenko, V. M. (2019). Oxygen influence on the process of low-temperature pyrolysis of biomass. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1147, No. 1, 012091). IOP Publishing.
403. Siarudin, M., Awang, S. A., Sadono, R., Suryanto, P. (2023). Renewable energy from secondary wood products contributes to local green development: The case of small-scale

- privately owned forests in Ciamis Regency, Indonesia. *Energy, Sustainability and Society*, 13(1), 4.
404. Silitonga, A. S., Masjuki, H. H., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chong, W. T., Boosroh, M. H. (2013). Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 346–360.
405. Singh, S., Chakraborty, J. P., Mondal, M. K. (2020). Torrefaction of woody biomass (*Acacia nilotica*): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel. *Renewable Energy*, 153, 711–724.
406. Sippula, O. L. L. I. (2010). Fine particle formation and emissions in biomass combustion. *Report Series in Aerosol Science*, 108.
407. Slivoski, O., Andreevski, I., Nusev, S. (2017). Analysis and comparison exhaust gas emissions of pellet boiler while working into three different types of pellets. *TEMEL International Journal*, 1(1), 33–40.
408. Sloss, L. (2010). Emissions from cofiring coal, biomass and sewage sludge. IEA Clean Coal Centre.
409. Smole, M. S., Kreže, T., Strnad, S., Kleinschek, K. S., Hribernik, S. (2005). Characterisation of grass fibres. *Journal of Materials Science*, 40(20), 5349–5353.
410. Sokhansanj, S., Mani, S., Tagore, S., Turhollow, A. F. (2010). Techno-economic analysis of using corn stover to supply heat and power to a corn ethanol plant–Part 1: Cost of feedstock supply logistics. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 75–81.
411. Speight, J. G. (2015). *Fouling in refineries*. Gulf Professional Publishing. 1-538.
412. Spirchez, C., Lunguleasa, A., Ionescu, C., Croitoru, C. (2019). Physical and calorific properties of wheat straw briquettes and pellets. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 290, 11011). EDP Sciences.
413. Ståhl, M., Granström, K., Berghel, J., Renström, R. (2004). Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 621–628.
414. Stella Mary, G., Sugumaran, P., Niveditha, S., Ramalakshmi, B., Ravichandran, P., Seshadri, S. (2016). Production, characterization and evaluation of biochar from pod (*Pisum sativum*), leaf (*Brassica oleracea*) and peel (*Citrus sinensis*) wastes. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 5, 43–53.
415. Stelte, W. (2011). *Fuel pellets from biomass: Processing, bonding, raw materials*. Denmark.

416. Stelte, W. (2012). Guideline: Storage and handling of wood pellets. Danish Technological Institute, Denmark.
417. Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B., Sanadi, A. R. (2012a). Fuel pellets from wheat straw: The effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties. *BioEnergy Research*, 5, 450–458.
418. Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B., Sanadi, A. R. (2011). Thermal transitions of the amorphous polymers in wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1053–1056.
419. Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. (2012b). Recent developments in biomass pelletization—A review. *BioResources*, 7(3), 4451–4490.
420. Stolarski, M. J., Krzyżaniak, M., Olba-Zięty, E. (2025). Properties of pellets from forest and agricultural biomass and their mixtures. *Energies*, 18(12), 3137.
421. Stulpinaite, U., Tilvikiene, V., Zvicevicius, E. (2023). Co-pelletization of hemp residues and agricultural biomass: Effect on pellet quality and stability. *Energies*, 16(16), 5900.
422. Sulaiman, F., Abdullah, N. (2014). Pyrolytic product of washed and unwashed oil palm wastes by slow thermal conversion process. *Journal of Physical Science*, 25(2), 73.
423. Sultanbawa, F., Sultanbawa, Y. (2023). Mineral nutrient-rich plants—Do they occur? *Applied Food Research*, 3(2), 100347.
424. Sumon, M. M. (2020). Characterization, proximate composition and mineral profile analysis of different sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes (Doctoral dissertation, MSc thesis University of Dhaka).
425. Sun, Q., Chen, C., Wang, H., Xu, N., Liu, C., Gao, J. (2023). A method for assessing background concentrations near sources of strong CO₂ emissions. *Atmosphere*, 14(2), 200.
426. Sundberg, P. (2021). Implication of pellet quality on combustion performance (Doctoral dissertation, Luleå University of Technology).
427. Symanowicz, B., Becher, M., Jaremko, D., Skwarek, K. (2018). Possibilities for the use of wood ashes in agriculture. *Journal of Ecological Engineering*, 19(3): 191-196.
428. Szczepkowski, A., Nicewicz, D. (2008). The content of heavy metals in the wood of healthy and dying oak trees (*Quercus robur* L., *Q. petraea* (Matt.) Liebl.). *Acta Scientiarum Polonorum, Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 7(4), 55–65.
429. Szczepkowski, A., Nicewicz, D., Koczoń, P. (2007). The relationship between tree health and chemical composition of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) wood of Polish provenances. *Acta Scientiarum Polonorum, Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 6(3), 77–88.

430. Szentesi, M., Kažimírová, V., Kubík, L. (2022). Mechanical properties of biomass pellets. In TAE 2022–8th International Conference on Trends in Agricultural Engineering.
431. Szostak, B., Głowacka, A., Klebaniuk, R., Kiełtyka-Dadasiewicz, A. (2020). Mineral composition of traditional non-GMO soybean cultivars in relation to nitrogen fertilization. *The Scientific World Journal*, 2020(1), 9374564.
432. Szyszlak-Bargłowicz, J., Zając, G., Słowik, T. (2017). Research on emissions from combustion of pellets in agro biomass low power boiler. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 19, 715–730.
433. Šafran, B. (2015). Ovisnost mehaničkih svojstava peleta o ulaznim veličinama drvene sirovine (Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb).
434. Šafran, B., Jug, M., Radmanović, K., Hasan, M., Augustinović, K., Vučković, K., Risović, S. (2018). Contribution to the research on wood pellet characteristics from Turopolje area. *Šumarski List*, 142(3–4), 149–158.
435. Španić, N., Jambreković, V., Antonović, A., Štaba, S. (2012). Bio matrices and bio composites. Conference: Wood is good – With Knowledge and Technology to a Competitive Forestry and Wood Technology Sector - AMBIENTA 2012., Zagreb, Croatia.
436. Španić, N., Plazonić, I., Jambreković, V., Barbarić-Mikočević, Ž. (2018). Wood and nonwood fibres length as main factor affecting their suitability as raw materials for papermaking industry. *Proceedings of Natural resources, green technology and sustainable development/3*, 121-125.
437. Španić, N., Plazonić, I., Podvorec, T. (2022). Cellulose acetate-and waste paper-based bionanocomposites: Optical and thermal properties. *Natural resources, green technology and sustainable development 14th–16th september 2022*, Zagreb, Croatia, 43.
438. Tahir, M. H., Irfan, R. M., Hussain, M. B., Alhumade, H., Al-Turki, Y., Cheng, X., Karim, A., Ibrahim, M., Rathore, H. A. (2021). Catalytic fast pyrolysis of soybean straw biomass for glycolaldehyde-rich bio-oil production and subsequent extraction. *ACS Omega*, 6(49), 33694–33700.
439. Tamangwa, M. W., Djikeng, F. T., Feumba, R. D., Sylvia, V. T. Z. N., Loungaing, V. D., Womeni, H. M. (2023). Nutritional composition, phytochemical, and functional properties of six soybean varieties cultivated in Cameroon. *Legume Science*, 5(4), e210.
440. Tamelová, B., Malat'ák, J., Velebil, J., Gendek, A., Aniszewska, M. (2022). Impact of torrefaction on fuel properties of aspiration cleaning residues. *Materials*, 15(19), 6949.

441. Tapia-Blácido, D. R., Maniglia, B. C., Martelli-Tosi, M. (2017). Biopolymers from sugarcane and soybean lignocellulosic biomass. In *Sustainable Polymers from Biomass* (pp. 227–253).
442. TAPPI. (1997). T 204 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI, Atlanta, GA, USA.
443. TAPPI. (2002). T 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. TAPPI, Atlanta, GA, USA.
444. Tarasov, D., Shahi, C., Leitch, M. (2013). Effect of additives on wood pellet physical and thermal characteristics: A review. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 876939.
445. Telmo, C., Lousada, J. (2011a). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2634–2639.
446. Telmo, C., Lousada, J. (2011b). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1663–1667.
447. Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964–972.
448. Terefe, G., Walelgne, M., Fekadu, D., Kitaw, G., Dejene, M., Kehaliu, A., Mekonne, B., Habteyesus, Y. (2022). Inclusion of sun dried brewer's spent yeast to improves nutritive value, in vitro digestibility and rumen degradability of wheat straw.
449. Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., McKinney, L., Staggenborg, S., Vadlani, P., Pei, Z. J., Wang, D. (2011). Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 325–332.
450. Toscano, G., De Francesco, C., Gasperini, T., Fabrizi, S., Duca, D., Ilari, A. (2023). Quality assessment and classification of feedstock for bioenergy applications considering ISO 17225 standard on solid biofuels. *Resources*, 12(6), 69.
451. Trzeciński, G., Tymendorf, Ł., Kozakiewicz, P. (2021). Parameters of trucks and loads in the transport of Scots pine wood biomass depending on the season and moisture content of the load. *Forests*, 12(2), 223.
452. Tucki, K., Orynycz, O., Wasiak, A., Świć, A., Mieszkalski, L., Wichłacz, J. (2020). Low emissions resulting from combustion of forest biomass in a small scale heating device. *Energies*, 13(20), 5495.
453. Tufail, T., Saeed, F., Imran, M., Arshad, M. U., Anjum, F. M., Afzaal, M., Bader Ul Ain, H., Shahbaz, M., Gondal, T. A., Hussain, S. (2018). Biochemical characterization of wheat

straw cell wall with special reference to bioactive profile. *International Journal of Food Properties*, 21(1), 1303–1310.

454. Tumuluru, J. S. (2018). Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 44–54.
455. Tumuluru, J. S., Hess, J. R., Boardman, R. D., Wright, C. T., Westover, T. L. (2012). Formulation, pretreatment, and densification options to improve biomass specifications for co-firing high percentages with coal. *Industrial Biotechnology*, 8(3), 113–132.
456. Tumuluru, J. S., Wright, C. T. (2010). A review on biomass densification technologies for energy application.
457. Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707.
458. Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707.
459. Turzyński, T., Kluska, J., Ochnio, M., Kardaś, D. (2021). Comparative analysis of pelletized and unpelletized sunflower husks combustion process in a batch-type reactor. *Materials*, 14(10), 2484.
460. Udakwar, S., Sarode, D. (2023). Production and characterization of pellets from agricultural residue: Cotton, tur, and soybean. *Indian Journal of Production and Thermal Engineering*, 3(4), 1–10.
461. Ünal, H., Alibaş, K. (2006). Determining of the Suitable Burning Method for wheat straw and sunflower stalks. *Journal of Applied Sciences*, 6(2), 435–444.
462. Ungureanu, N., Vlăduț, V., Voicu, G., Dinca, M. N., Zabava, B. S. (2018). Influence of biomass moisture content on pellet properties—Review. *Engineering for Rural Development*, 17, 1876–1883.
463. Uzcategui, M. C., Seale, R. D., França, F. N. (2020). Physical and mechanical properties of clear wood from red oak and white oak. *BioResources*, 15(3), 4960.
464. Valantinavičius, M., Vonžodas, T. (2014). Proximate and elemental analysis of solid biofuel and influence to combustion process. *CYSENI 2012*, 1–12.
465. Valdez-Vazquez, I., Pérez-Rangel, M., Tapia, A., Buitrón, G., Molina, C., Hernández, G., Amaya-Delgado, L. (2015). Hydrogen and butanol production from native wheat straw by

- synthetic microbial consortia integrated by species of *Enterococcus* and *Clostridium*. *Fuel*, 159, 214–222.
466. Vallero, D. A. (2020). Energy and the environment. In *Future Energy* (3rd ed., pp. 583–609). Elsevier.
467. Vansteenkiste, D., Van Acker, J., Stevens, M., Le Thiec, D., Nepveu, G. (2007). Composition, distribution and supposed origin of mineral inclusions in sessile oak wood—Consequences for microdensitometrical analysis. *Annals of Forest Science*, 64(1), 11–19.
468. Vasileios, F., Ioannis, P., Nikolaos, S., Ioannis, E., Kostas, T. (2018). Analysis of logging forest residues as an energy source. *Agrárinformatika/Journal of Agricultural Informatics*, 9(1), 14–25.
469. Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933.
470. Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., Song, Y. C., Li, W. Y., Feng, J. (2017). Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*, 208, 377–409.
471. Velázquez Martí, B., Gaibor-Chávez, J., Franco Rodríguez, J. E., López Cortés, I. (2023). Biomass identification from proximate analysis: Characterization of residual vegetable materials in Andean areas. *Agronomy*, 13(9), 2347.
472. Verma, M., Loha, C., Sinha, A. N., Chatterjee, P. K. (2017). Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 732–741.
473. Vicente, E., Duarte, M., Nunes, T., Tarelho, L., Alves, C. (2014). Particulate and gaseous emissions from residential pellet combustion. In *Proceedings of the SPEIC14—Towards Sustainable Combustion*, Lisbon, Portugal, 19–21.
474. Voicea, I., Danciu, A., Matache, M., Voicu, G., Vlăduț, V. (2013). Biomass and the thermo-physical-chemical properties of this related to the compaction process. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 11(1), 59.
475. Voicu, G. (2018). Impact of using additives on quality of agricultural biomass pellets. In *Engineering for Rural Development*.
476. Vukelić, J. (2012). Šumska vegetacija Hrvatske. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet; Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb, 195–202.
477. Wang, F., Shaheen, A., Yousefi, R., Ge, Q., Wu, R., Lelieveld, J., Kaskaoutis, D. G., Lu, Z., Zhan, Y., Zhou, Y. (2024). Long-term dynamics of atmospheric sulfur dioxide in urban and rural regions of China: Urbanization and policy impacts. *Remote Sensing*, 16(2), 391.

478. Wang, F., Wang, Z., Kou, C., Ma, Z., Zhao, D. (2016). Responses of wheat yield, macro- and micro-nutrients, and heavy metals in soil and wheat following the application of manure compost on the North China Plain. *PLOS ONE*, 11(1), e0146453.
479. Wang, K., Tester, J. W. (2023). Sustainable management of unavoidable biomass wastes. *Green Energy and Resources*, 1(1), 100005.
480. Wang, K., Zou, X., Guo, L., Huang, L., Wang, Y., Yang, P., Huang, L., Ma, X., Zhuo, Y., Che, L. and Xu, S (2022). The nutritive value of soybean meal from different sources for sows during mid-and late gestation. *Journal of Animal Science*, 100(11), skac298.
481. Wang, M., Qian, X., Suo, Y., Ye, Y., Li, G., Zhang, Z. (2023). Effect of hydrogen addition on soot formation and emission in acetylene laminar diffusion flame. *ACS Omega*, 8(28), 24893–24900.
482. Wang, S., Dai, G., Yang, H., Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33–86.
483. Wang, S., Zou, C., Yang, H., Lou, C., Cheng, S., Peng, C., Wang, C., Zou, H. (2021). Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the combustion behaviours of biomass under various oxygen concentrations. *Bioresource Technology*, 320, 124375.
484. Wang, Y., Niu, B., Ni, J. Q., Xue, W., Zhu, Z., Li, X., Zou, G. (2020). New insights into concentrations, sources and transformations of NH₃, NO_x, SO₂ and PM at a commercial manure-belt layer house. *Environmental Pollution*, 262, 114355.
485. Williams, O., Taylor, S., Lester, E., Kingman, S., Giddings, D., Eastwick, C. (2018). Applicability of mechanical tests for biomass pellet characterisation for bioenergy applications. *Materials*, 11(8), 1329.
486. Wilson, T. O. (2010). Factors affecting wood pellet durability (Master's thesis, The Pennsylvania State University, PA, USA).
487. World Health Organization. (2015). Residential heating with wood and coal: Health impacts and policy options in Europe and North America.
488. Xing, X., Fan, F., Jiang, W. (2018). Characteristics of biochar pellets from corn straw under different pyrolysis temperatures. *Royal Society Open Science*, 5(8), 172346.
489. Xu, Q., Peng, W., Ling, C. (2020). An experimental analysis of soybean straw combustion on both CO and NO_x emission characteristics in a tubular furnace. *Energies*, 13(7), 1587.
490. Yancey, N. A., Tumuluru, J. S., Wright, C. T. (2013). Drying, grinding and pelletization studies on raw and formulated biomass feedstock's for bioenergy applications. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 7(5), 549–558.

491. Yang, Y., Song, L., Li, Y., Shen, Y., Yang, M., Wang, Y., Zheng, H., Qi, W. and Lei, T. (2025). Effects of different biomass types on pellet qualities and processing energy consumption. *Agriculture*, 15(3), 316.
492. Yılmaz, H., Dağlı, F., Topakcı, N., Çanakcı, M., Karayel, D., Cengiz, M. F., Topakcı, M. (2024). The potential biopesticidal effects of torrefaction liquid of corn stalk pellets against *Tetranychus urticae* Koch, 1836 (Acari: Tetranychidae). *Biomass and Bioenergy*, 190, 107395.
493. Zabaniotou, A., Kantarelis, E., Skoulou, V., Chatziavgoustis, T. (2010). Bioenergy production for CO₂-mitigation and rural development via valorisation of low value crop residues and their upgrade into energy carriers: a challenge for sunflower and soya residues. *Bioresource technology*, 101(2), 619-623.
494. Zafari, A., Kianmehr, M. H. (2012). Effect of raw material properties and die geometry on the density of biomass pellets from composted municipal solid waste. *BioResources*, 7(4).
495. Zardzewiały, M., Bajcar, M., Puchalski, C., Gorzelany, J. (2023). The possibility of using waste biomass from selected plants cultivated for industrial purposes to produce a renewable and sustainable source of energy. *Applied Sciences*, 13(5), 3195.
496. Zhang, B., Hu, X., Zhang, C., Xu, X., Wu, C. (2025). Synergistic purification of flue gas from straw combustion using ammonia method and electrostatic charged spray. *Agriculture*, 15(9), 1001.
497. Zhang, M., Shi, L., Ma, X., Zhao, Y., Gao, L. (2021). Study on comprehensive assessment of environmental impact of air pollution. *Sustainability*, 13(2), 476.
498. Zhang, X., Zhou, Y., Ji, Y., Yu, M., Li, X., Duan, J., Wang, Y., Gao, J., Guo, X. (2023). Climate factors affect above–belowground biomass allocation in broad-leaved and coniferous forests by regulating soil nutrients. *Plants*, 12(23), 3926.
499. Zhang, Y., Chen, F., Chen, D., Cen, K., Zhang, J., Cao, X. (2022). Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(6), 2061–2070.
500. Zhang, Y., Ghaly, A. E., Li, B. (2012a). Availability and physical properties of residues from major agricultural crops for energy conversion through thermochemical processes. *American Journal of Agricultural and Biological Science*, 7(3), 312–321.
501. Zhang, Y., Ghaly, A. E., Li, B. (2012b). Physical properties of wheat straw varieties cultivated under different climatic and soil conditions in three continents. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 98–106.
502. Zhang, Z., Zeng, Q., Hao, R., He, H., Yang, F., Mao, X., Mao, Y., Zhao, P. (2019). Combustion behavior, emission characteristics of SO₂, SO₃ and NO, and in situ control of SO₂

and NO during the co-combustion of anthracite and dried sawdust sludge. *Science of the Total Environment*, 646, 716–726.

503. Zhao, J., Li, H., Liu, Z., Jiang, Y., Mu, W. (2025). Water saving and carbon reduction (CO₂) synergistic effect and their spatiotemporal distribution patterns. *Water*, 17(13), 1847.

504. Zhao, X., Xie, Z., Qiu, R., Peng, W., Ju, F., Zhong, F. (2024). Collaborating iron and manganese for enhancing stability of natural arsenic sinks in groundwater: Current knowledge and future perspectives. *Chemical Geology*, 669, 122369.

505. Zhou, X., Zhou, X., Wang, C., Zhou, H. (2023). Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. *Chemosphere*, 313, 137489.

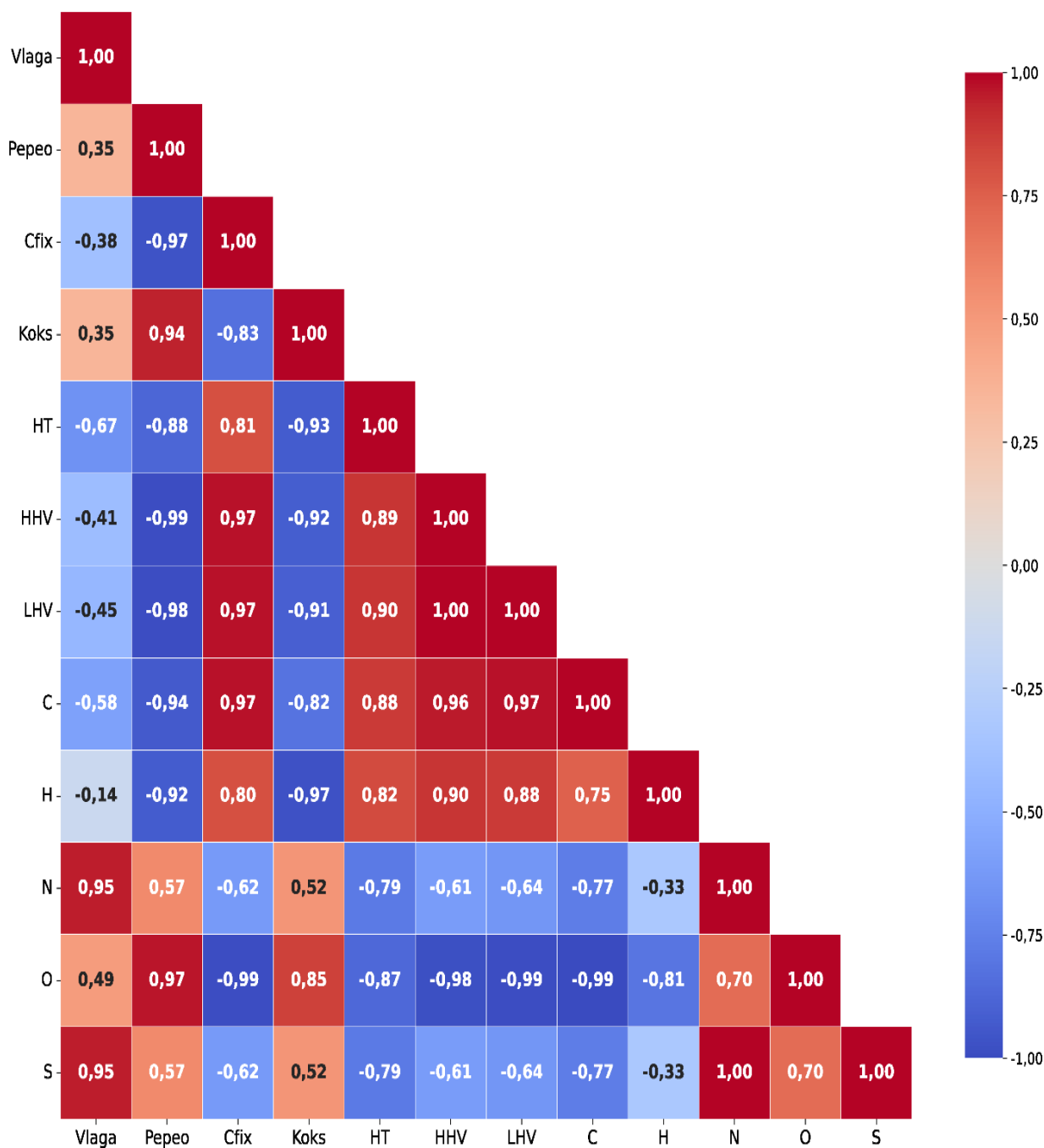
506. Zhurka, M., Spyridonidis, A., Vasiliadou, I. A., Stamatelatou, K. (2019). Biogas production from sunflower head and stalk residues: Effect of alkaline pretreatment. *Molecules*, 25(1), 164.

507. Ziebell, A. L., Barb, J. G., Sandhu, S., Moyers, B. T., Sykes, R. W., Doeppke, C., Gracom, K. L., Carlile, M., Marek, L. F., Davis, M. F., Knapp, S. J., Burke, J. M. (2013). Sunflower as a biofuels crop: An analysis of lignocellulosic chemical properties. *Biomass and Bioenergy*, 59, 208–217.

508. Zlateva, P., Terziev, A., Mileva, N. M. (2024). Sustainable solutions for energy production from biomass materials. *Sustainability*, 16(17), 7732.

8. PRILOZI

PRILOG 1 Prikazana slika predstavlja korelacijsku matricu analiziranih varijabli peleta od pojedinačnih biomasa, izraženu pomoću Pearsonovog koeficijenta korelacije (r).



P1 - 1 Korelacijska matrica analiziranih varijabli peleta od pojedinačnih biomasa