

# Utjecaj dodavanja poljoprivrednih ostataka na svojstva i kvalitetu drvnih peleta izrađenih od sirovine hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.)

---

Šarić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:178164>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**  
**DIPLOMSKI STUDIJ**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI PROCESI**

**DOMAGOJ ŠARIĆ**

**UTJECAJ DODAVANJA POLJOPRIVREDNIH OSTATAKA NA SVOJSTVA I  
KVALITETU DRVNIH PELETA IZRAĐENIH OD SIROVINE HRASTA  
LUŽNJAKA (*Quercus robur* L.)**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE**  
**DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK**

**UTJECAJ DODAVANJA POLJOPRIVREDNIH OSTATAKA NA SVOJSTVA I  
KVALITETU DRVNIH PELETA IZRAĐENIH OD SIROVINE HRASTA  
LUŽNJAKA (*Quercus robur* L.)**

**DIPLOMSKI RAD**

Diplomski studij: Drvnotehnološki procesi

Predmet: Energetika drvne industrije

Ispitno povjerenstvo: 1. (mentor) doc. dr. sc. Branimir Šafran

2. (član) doc. dr. sc. Kristijan Radmanović

3. (član) doc. dr. sc. Dinko Vusić

4. (zamjenski član) doc. dr. sc. Matija Jug

Student: Domagoj Šarić

JMBAG: 0068227702

Datum odobrenja teme:

Datum predaje rada:

Datum obrane rada:

**Zagreb, rujan, 2022.**

## Temeljna dokumentacijska kartica

Naslov	Utjecaj dodavanja poljoprivrednih ostataka na svojstva i kvalitetu drvnih peleta izrađenih od sirovine hrasta lužnjaka ( <i>Quercus robur</i> L.)
Autor	Domagoj Šarić
Adresa autora	Ljubunčić bb, 80101 Livno, BiH
Mjesto izrade	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	doc. dr.sc. Branimir Šafran
Komentor	doc.dr.sc. Kristijan Radmanović
Izradu rada pomogao	M. Sc. Marin Dujmović, Asistent za rad na projektu
Godina objave	2022
Obujam	Broj slika: 26 Broj tablica: 5 Broj grafova: 7 Broj stranica: 34 Navoda literature: 29
Ključne riječi	Drvena biomasa, Poljoprivredna biomasa, Pelet
Sažetak	<p>U ovom diplomskom radu analiziralo se dodavanje poljoprivrednih sirovina, konkretno kukuruza i suncokreta, osnovnoj sirovini hrasta, na način i u omjerima da se zadrži ENplus kvaliteta peleta prema HRN EN ISO 17225. Redom su se ispitali sadržaj vode, udio pepela, kalorijska vrijednost, vodoupojnost, dimenzijska stabilnost i tlačna čvrstoća. Dobiveni rezultati opravdali su očekivanja i ciljeve rada, te se miješanjem poljoprivredne biomase s drvnom mogu proizvesti peleti koji će svojim gorivim svojstvima, ali i mehaničkom čvrstoćom zadovoljavati sve normirane kriterije.</p>

## Basic Documentation Card

Title	Influence of addition of agricultural residues on properties and quality of wood pellets made from pedunculate oak ( <i>Quercus robur</i> L.) raw material
Author	Domagoj Šarić
Address of Author	Ljubunčić bb, 80101 Livno, BiH
Thesis Performed at	University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology
Publication Type	Diplomski rad
Supervisor	doc. dr.sc. Branimir Šafran
Co-supervisor	doc.dr.sc. Kristijan Radmanović
Preparation Assistant	M. Sc. Marin Dujmović, Project assistant
Publication year	2022.
Volume	Number of pictures: 26 Number of tables: 5 Number of graphs:7 Number of pages: 34 Citation of literature: 29
<b>Key words</b>	Woody biomass, Agricultural biomass, Pellets
<b>Summary</b>	In this thesis, it was analysed the addition of agricultural raw materials, specifically corn and sunflower to the basic raw material of oak, in a way and in proportions to maintain the ENplus pellet quality according to HRN EN ISO 17225. Moisture content, ash content, calorific value, water absorption, dimensional stability and compressive strength were examined. The final results justified the expectations and goals of the thesis, and by mixing agricultural biomass with wood, pellets can be obtained that will satisfy all standardized criteria with their fuel properties and mechanical strength.

	<b>IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI</b>	<b>OB FŠDT 05 07</b>
		Revizija: 2
		Datum: 29.04.2021.

„Izjavljujem da je ovaj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

---

vlastoručni potpis

Domagoj Šarić

U Zagrebu, 23.09.2022.

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	2
2.1. Biomasa.....	2
2.2. Oblici drvene biomase.....	3
2.2.1. Pelet od poljoprivredne biomase .....	5
2.2.2. Drvni pelet.....	5
2.2.3. Proces proizvodnje peleta .....	6
2.2.4. Certifikacija peleta .....	9
2.2.5. Tržište peleta.....	10
2.3. Biomasa CO <sub>2</sub> neutralan energent.....	14
3. Cilj istraživanja .....	16
4. Materijali i metode .....	17
4.1. Priprema sirovine .....	17
4.2. Peletiranje.....	18
4.3. Određivanje sadržaja vode prema normi HRN EN ISO 18134-1:2015.....	19
4.3.1. Određivanje sadržaja vode sirovina.....	19
4.3.2. Određivanje sadržaja vode peleta .....	21
4.4. Određivanje udjela pepela prema HRN EN ISO 18122:2015 .....	21
4.5. Određivanje kalorijske vrijednosti HRN EN 18125:2017 .....	23
4.6. Određivanje vodoupojnosti peleta.....	26
4.7. Određivanje dimenzijske stabilnosti peleta.....	27
4.8. Određivanje tlačne čvrstoće peleta.....	28
5. Rezultati i rasprava.....	29
5.1. Sadržaj vode sirovina i peleta .....	29
5.2. Udio pepela .....	30
5.3. Kalorijska vrijednost .....	31
5.4. Vodoupojnosti .....	32
5.5. Dimenzijska stabilnost.....	33
5.6. Tlačna čvrstoća .....	34
6. Zaključak .....	35

## **Popis slika**

Slika 1. Slikoviti prikaz pretvorbe drvne mase u biogorivo

Slika 2. Cjepanice

Slika 3. Drvna sječka

Slika 4. Briketi

Slika 5. Peleti

Slika 6. Shematski prikaz tehnološkog postupka proizvodnje drvnih peleta

Slika 7. Konstrukcijske izvedbe preša za peletiranje: a) preša s ravnom matricom; b) preša s prstenastom matricom

Slika 8. Pakiranje peleta u vreće od 15 kg

Slika 9. Tržište drvnih peleta u razdoblju od 2021.-2029.

Slika 10. Europski proizvođači peleta u 2020. godini

Slika 11. Europski potrošači peleta u 2020. godini

Slika 12. Biomasa CO<sub>2</sub> neutralan energent

Slika 13. Preša za peletiranje

Slika 14. Analitička vaga

Slika 15. Sušionik

Slika 16. Eksikator

Slika 17. Mufolna peć

Slika 18. Uzorci 10 grupa nakon žarenja

Slika 19. Kalorimetar

Slika 20. Hidraulična preša

Slika 21. Kalorimetarska bomba

Slika 22. Čelični kalup za prešanje

Slika 23. Isprešane tablete

Slika 24. Peleti u klima komori Memmert

Slika 25. Mjerenje dužine i promjera

Slika 26. Položaj uzorka u kidalici Shimadzu Autograph AGX plus



## **Popis grafova:**

Graf 1. Zagrijavanje mufolne peći

Graf 2. Sadržaj vode

Graf 3. Udio pepela

Graf 4. Bruto gornja ogrjevna vrijednost u apsolutno suhom stanju

Graf 5. Vodoupojnost

Graf 6. Dimenzijska stabilnost

Graf 7. Tlačna čvrstoća

## **Popis tablica**

Tablica 1. Prosječni parametri gotovog proizvoda – briketa od piljevine ili slame

Tablica 2. Dozvoljene vrijednosti najvažnijih parametara peleta

Tablica 3. Proizvodnja krutih biogoriva u Hrvatskoj 2020. godine

Tablica 4. Udio pojedine sirovine

Tablica 5. Vodoupojnost

## **Predgovor**

Pisanje Diplomskog rada na ovu temu potaknuo me ponajviše mentor doc. dr.sc. Branimir Šafran predanim radom i prenesenim znanjem na predmetima tokom preddiplomskog i diplomskog studija na kojima mi je predavao. Također potaknulo me i zanimanje o peletima, obnovljivom izvoru energije.

Zahvaljujem se svim profesoricama i profesorima Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu na trudu, strpljenju i prenesenom znanju koje će mi nadam se pomoći pri zaposlenju. Posebnu zahvalnost dugujem mentoru doc. dr.sc. Branimiru Šafranu i M. Sc. Marinu Dujmoviću koji su me uputili u znanstveno područje koje se bavi proučavanjem peleta te mi dali mnoge korisne savjete i podršku prilikom izrade diplomskog rada.

Najveće hvala mojim roditeljima, bratu, prijateljima, užoj i široj obitelji, koji su u svakom trenutku bili uz mene, vjerovali u mene i bili najveća podrška. Veliko Vam hvala!

## 1. Uvod

Visoke razine ugljičnog dioksida, globalno zagrijavanje uzrokovano povećanim emisijama stakleničkih plinova, potreba za proizvodnjom toplinske i električne energije te sve veći troškovi fosilnih goriva stvorili su rastuću industriju u cijelom svijetu usmjerenu na proizvodnju energije korištenjem obnovljivih izvora (Ungureanu, 2018). Kako Europska unija, tako i Republika Hrvatska zahtijeva na smanjenju emisije stakleničkih plinova i povećanju upotrebe biogoriva. Povećanje proizvodnje i potrošnje biomase kao energenta zasigurno je plod sve više cijene fosilnih goriva i generalno skupljeg standarda života i životnih potreba. Hrvatska u proizvodnji biomase ima veliki potencijal, vidljiv iz podataka pokrivenosti šumom od 48%, drvene zalihe koja je oko 550 mil. m<sup>3</sup>, godišnjeg prirasta oko 11 mil. m<sup>3</sup> te sječivog etata hrvatskih šuma od gotovo 8 mil. m<sup>3</sup>, čime je osigurana potrajnost gospodarenja (Šafran, 2018). Uz očuvanje okoliša, biomasa kao obnovljivi energent ima pozitivan utjecaj i na društveno-ekonomske prilike, regionalni razvoj i zapošljavanje.

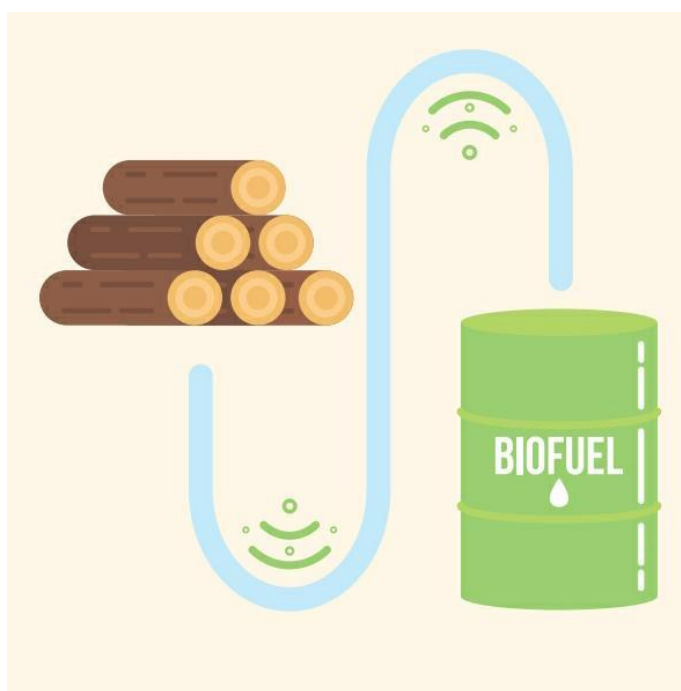
Kao obnovljivi izvor energije najčešće se koristi drvena biomasa u obliku drvene mase (stablo, krošnje) i ostataka nastalih iz prerade drva (slika 1). Kao čvrsto biogorivo, drvena biomasa može biti u obliku cjepanica, drvene sječke, briketa i peleta. Uz drvenu masu, za proizvodnju peleta velik potencijal ima i poljoprivredna biomasa brzorastućih, šećernih, škrobnih i uljnih vrsta, te poljoprivrednih ostataka i otpada. Kao i druge sirovine za biomasu, peleti su ugljično neutralni, jer se ugljik koji se oslobađa tijekom njihovog izgaranja koristi u ponovnom rastu biomase koja se koristi za njihovu proizvodnju.

Tema ovog diplomskog rada je utjecaj dodavanja poljoprivrednih ostataka (suncokreta i kukuruza) na svojstva i kvalitetu drvnih peleta izrađenih od sirovine hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.). Nakon proizvodnje peleta od navedenih sirovina ispitivana su svojstva i kvaliteta na način i u omjerima da se zadrži čim viša kvaliteta peleta prema HRN EN ISO 17225.

## 2. Pregled dosadašnjih istraživanja

### 2.1. Biomasa

Prvi i najstariji izvor energije kojeg su ljudi upotrebljavali bila je biomasa, i to drvena biomasa u obliku drvnih ostataka koje su sakupljali i koristili za grijanje, kuhanje, obranu od neprijatelja i slično. Kao što sama riječ kaže, biomasa je nešto biološko i prirodno, te je sve do pojave i primjene fosilnih goriva bila gotovo jedini izvor energije. Međutim, primjena fosilnih goriva kroz godine negativno je utjecala na okoliš, te je zanimanje za biomasu kao energent ponovno počelo rasti. Budući da ima mali štetni utjecaj na okoliš, biomasa se danas sve više spominje kao zamjena za fosilna goriva. Najčešće se koristi izravno, odnosno nije ju potrebno pretvarati u drugi oblik, kao gorivo u ložištima, od kamina, peći i kotlova za grijanje, do velikih postrojenja poput elektrana, energana, toplana i drugih. Osim izravno, biomasa se koristi i posredno što podrazumijeva pretvorbu biomase različitim biokemijskim procesima (Omer i dr., 2020).



Slika 1. Slikoviti prikaz pretvorbe drvene mase u biogorivo

Izvor: energy-community.org (s letka o ENplusu)

Biomasa za dobivanje bioenergije možemo podijeliti na:

- šumsku ili drvenu biomasu;
- ostalu biomasu biljnog porijekla
- organsku biomasu.

Šumska ili drvena biomasa obuhvaća svu šumsku drvenu masu (korijen, stablo, krošnje) i ostatke nastale iz prerade drva. Biomasa za dobivanje energije uključuje i drvo opožarenih površina, parkova, drvoreda te drvo uz vodotoke, kanale i slično. Također ostaci nakon sječe šume (granje, kora, panjevi) i ostaci industrijske prerade (piljevina, blanjevina, drvena prašina), oboljela stabla i devastirana šumska masa nastala uslijed vremenskih neprilika, predstavljaju iskoristivi dio biomase za dobivanje energije.

Većina biljne (poljoprivredne) biomase nastaje iz uzgoja: brzorastućih vrsta (vrba, topola, eukaliptus); šećerne vrste (šećerna repica, trska i proso, slatki sirak); škrobne vrste: kukuruz, žitarice (pšenica, ječam), uljne vrste (uljna repica, suncokret); poljoprivrednih ostataka i otpada (slama, gnoj); organskog dijela javnog krutog otpada; kanalizacijskog taloga; - industrijskog otpada (ostaci hrane, prerade papira) (Omer i dr., 2020). Poljoprivredna biomasa je vrlo heterogena, niske je ogrjevne vrijednosti (zbog visokih sadržaja vode), a obrađuje se prešanjem, baliranjem i peletiranjem. Ima velike prinose koji ovisi o stanju zemlje, kao i o razdoblju u kojem zemlja nije obrađivana. (Domac, 1998).

## 2.2. Oblici drvene biomase

Kao što je rečeno u odlomku Biomasa, drvena biomasa predstavlja svu šumsku drvenu masu i ostatke nastale u preradi drva. U šumarskoj i drvnoj industriji prilikom prerade nastaju značajne količine biomase koje se dalje koriste za proizvodnju energije, toplinske i električne. Pri proizvodnji toplinske energije od drva, u prvom redu se misli na ogrjevno drvo u klasičnom obliku (cjepanice), međutim drvo se koristi i u obliku peleta i briketa. Dakle drvena biomasa kao čvrsto biogorivo može biti u obliku cjepanica, drvene sječke, briketa i peleta.

Ogrjevno drvo čine cjepanice (slika 2) koje su komadi drvene biomase nastali piljenjem i cijepanjem bez daljnje obrade osim prirodnog sušenja na zraku. Cjepanice mogu biti duljine do 1 m, te se piljenjem i cijepanjem smanjuju na duljine od 25, 33 ili 50 cm, ovisno o vrsti i dimenzijama ložišta. Procesi piljenja i cijepanja obično se izvode ručno, ali i u automatskim postrojenjima. Važno je da cjepanice budu od suhog i zdravog drva, te da sadržaj vode nije viši od 20 %. Kada su svi uvjeti zadovoljeni izgaranje se odvija s udjelom pepela manjim od 0,5 %, a energija koja se dobije izgaranjem 3 kg cjepanica ekvivalentna je onoj iz 1 litre loživog ulja. Prednosti ovakvog oblika šumske biomase su relativno mala cijena, stupanj iskorištenja od 70 % pa čak i do 90 %, te smanjenje emisije štetnih i stakleničkih plinova. Koriste se u ložištima s ručnim punjenjem te su najstariji, najčešći i najjednostavniji uporabni oblik šumske biomase. Cijepano drvo u Hrvatskoj i u ovom dijelu Europe iznimno je važan izvor toplinske energije, s obzirom na tradiciju korištenja u kućanstvima (Omer i dr. 2020).



Slika 2. Cjepanice

Izvor: <https://unikomerc-uvoz.hr/piljenje-drva>

Drvena sječka (slika 3) je oblik biogoriva kojeg predstavljaju komadići drvene biomase različitih dimenzija i oblika nastali usitnjavanjem manje kvalitetne sirovine (krošnje, grane, kore i drugih drvnih ostataka). Prilikom proizvodnje drvene sječke gotovo da ne postoje ograničenja u vidu stanja, oblika i

## PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

kvalitete drvnog ostatka. Komadići sječke mogu biti u duljinama od 1 do 10 cm, a razlikuju se tri kategorije:

- fina sječka do 3 cm,
- srednja sječka do 5 cm,
- krupna sječka do 10 cm.

Problem koji se može javiti kod sječke je da može biti onečišćena kamenjem, zemljom i pijeskom što povećava sadržaj negorivih tvari koje zaostaju nakon izgaranja. Vlažnost sječke dobivene usitnjavanjem tek posječenog drva iznosi oko 50 %, ali se sušenjem snižava na oko 20 %. Za korištenje sječke u ložištima kotlova i automatiziranim ložištima vrlo je važno da udio vlage bude manji od 20 % i da veličina sječke bude podjednaka. Ima široku primjenu i prednost u odnosu na ostale oblike drvene biomase, predstavlja efikasno, lako dostupno i povoljno biogorivo, jer je njegov proces proizvodnje dosta jeftiniji za razliku od drugih. Karakteristična područja primjene drvene sječke su poljoprivredni i drvnoindustrijski pogoni, termoenergetska postrojenja, industrijske energane, trgovačke kuće, stambene i javne zgrade, te mikro i lokalni sustavi grijanja (Omer i dr. 2020).



Slika 3. Drvna sječka

Izvor: <https://nomar.biz/drvena-biomasa/>

Tehnologija briketiranja predstavlja proces kojim se usitnjeni materijal djelovanjem visokog tlaka pretvara u kompaktnu formu velike volumne mase, pogodne za dalju manipulaciju i uporabu. Konačan proizvod briketiranja naziva se briket. Briketi (slika 4) su geometrijski pravilni komadi prešane suhe usitnjene drvene sirovine, bez dodavanja vezivnih sredstava u pravilu valjkastog oblika. Sirovina za brikete ne smije sadržavati koru, a sadržaj vode trebao bi biti najviše 10 %. Oblikom, dimenzijama i načinom uporabe slični su cjepanicama, ali imaju mnogo veći energetske potencijal i mnogo bolje izgaraju. Briketi su kvadratnog ili cilindričnog oblika dužine od 10 do 30 cm i širine od 6 do 12 cm (Omer i dr. 2020).

Tablica 1. Prosječni parametri gotovog proizvoda – briketa od piljevine ili slame (Omer i dr. 2020).

	Piljevina	Slama
Ogrjevna vrijednost	18.000-20.000 kJ/kg	13.000 - 15.000 kJ/kg
Pepeo	3 %	7,4 - 7,8 %
Klor	0,02 - 0,03 %	0,04 - 0,045 %
Sumpor	0 %	0,246 - 0,276 %



Slika 4. Briketi

Izvor: <https://pozgaj.eu/briket/>

### 2.2.1. Pelet od poljoprivredne biomase

U današnje vrijeme, radi prekomjernog iskorištavanja šuma, na sve načine drvena biomasa se pokušava djelomično zamijeniti poljoprivrednom. Budući da je veliki potrošač, te svake godine na polju ostaju velike količine neiskorištene biomase, korištenjem ostataka iz njene proizvodnje, poljoprivreda također može postati i njezin veliki proizvođač. Komercijaliziraju se peleti različitih kvaliteta, ali i različitih materijala, što uključuje miješanje sirovina drvene i poljoprivredne biomase, te izradu peleta od istih. Niska energetska gustoća, kao i fizička svojstva slamnatog materijala otežavaju proizvodnju kvalitetnog peleta od poljoprivredne biomase, te ih zbog toga većina na tržištu ne zadovoljava zahtjevima normi što dovodi do dodatnih problema prilikom njihovog korištenja za dobivanje toplinske i električne energije. Dakle, peleti nastali prešanjem poljoprivrednog ostatka u odnosu na drvene pelete imaju znatno manju uporabnu vrijednost prvenstveno zbog svojih svojstava. Gotovo je nemoguće njihovo izgaranje u kućnim pećima na ekološki prihvatljiv način (Horvat, 2020). Međutim, peleti manje kvalitete u što spadaju i peleti od poljoprivredne biomase koriste se u velikim industrijskim pećima, od kojih su neke i posebno dizajnirane za njih, radi njihove robusnosti, sustava za pročišćavanje dimnih plinova i sofisticiranije tehnologije kontrole izgaranja koja se primjenjuje za takva postrojenja (Matali i dr. 2016).

Mnogi znanstvenici unatoč lošijim svojstvima i manjoj svakodnevnoj upotrebi, dobivaju ohrabrujuće rezultate za razmatranje peleta iz poljoprivredne biomase kao alternative klasičnim drvnim peletima.

### 2.2.2. Drvni pelet

Peleti (slika 5) su najpovoljniji oblik drvene biomase prešani u geometrijski pravilne komadiće cilindričnog oblika. Uz drvenu biomasu mogu biti izrađivani i od poljoprivredne biomase (Šafran, 2015). Proizvode se u postrojenjima za izradu peleta obično povezanim s pilanama, što omogućuje iskorištavanje svog drva i drvnog ostatka iz drvnoindustrijskog pogona. Peleti se izrađuju u uobičajenim dimenzijama: duljina 5 - 45 mm i promjera 6 – 8 mm. Peleti namijenjeni privatnim korisnicima imaju



promjer 6 mm i dugi su od 10 do 40 mm (Omer i dr. 2020). Prosječna pojedinačna gustoća drvnih peleta kreće se u rasponu 1000 – 1400 kg/m<sup>3</sup> dok je nasipna gustoća peleta do oko 700 kg/m<sup>3</sup> (Stelte, 2011). Najveće prednosti prešanih gorivih peleta u usporedbi s neprešanom (rasutom) bioamom su visoka nasipna i energijska gustoća što rezultira manjim skladišnim prostorom, manjim troškovima transporta, većom strukturnom homogenošću i visokom energijskom učinkovitošću. Nadalje, smanjeni sadržaj vode (8 – 10 %) omogućuje dugotrajnije skladištenje (Holm, 2006).



Slika 5. Peleti

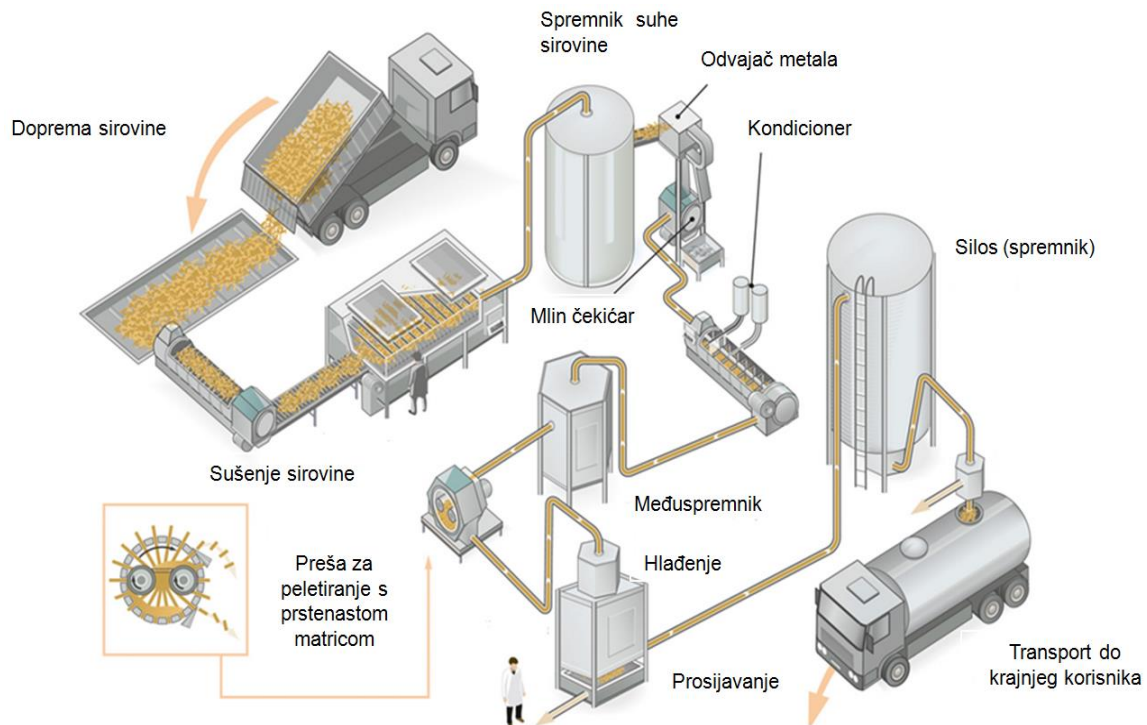
Izvor: <https://w-ukr.com/en/production/>

Zbog svoje kompaktnosti i ujednačenosti korisniku omogućavaju sigurno korištenje i nesmetan rad dozirnog mehanizma i peći. Peleti ne sadrže nikakve kemijske aditive, ali radi boljeg vezivanja i kompaktnosti samih peleta, ali i poboljšanja energetske svojstava, pri proizvodnji peleta često se dodaje kukuruzna škrob u iznosu do 2 %. Proces peletiranja moguće je opisati kao povećanje nasipne gustoće biomase mehaničkim tlakom, poznat je dugi niz godina, te je stvoreno biogorivo koje je gledajući automatiziranu uporabu doseglo razinu fosilnih goriva. Koriste se u ložištima raznih dimenzija, od kotlova za centralno grijanje i pripremu tople vode u obiteljskim kućama pa sve do stambenih, javnih, poslovnih zgrada i velikih industrijskih energana i termoenergetskih postrojenja. Kvaliteta drvnih peleta nije definirana samo odabirom sirovina i proizvodnog procesa, već na nju u prvom redu utječu prijevoz i rukovanje u privremenim skladištima, kao i dostava u prostor za skladištenje ili same silose. Mehaničkim utovarom peleta stvara se trenje te se može povećati udio sitnih čestica u jednoj seriji peleta (Omer i dr. 2020).

### 2.2.3. Proces proizvodnje peleta

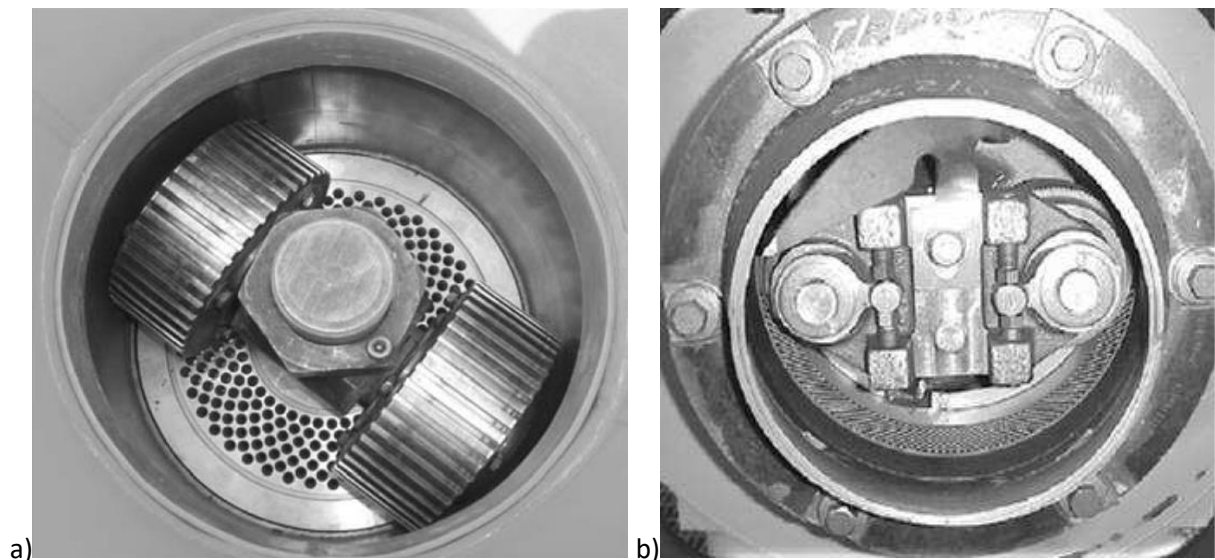
Postupak proizvodnje drvnih peleta usko je povezan s proizvodnjom stočne hrane koja se koristi od 40-ih godina prošloga stoljeća. Postupak se sastoji od nekoliko faza: prikupljanje i usitnjavanje sirovine, sušenje, kondicioniranje, peletiranje, hlađenje, pakiranje i skladištenje (Šafran, 2015).





Slika 6. Shematski prikaz tehnološkog postupka proizvodnje drvnih peleta (Šafran, 2015)

Postupak (slika 6) kreće skupljanjem i dopremom sirovine koja može biti u obliku krupnog ili usitnjenog ostatka. Usitnjeni se ostatak odmah skladišti do faze sušenja i kondicioniranja, dok se krupni prvo treba obraditi, odnosno ukloniti nečistoće od pijeska, kamena, zemlje i metala, i okorati prije usitnjavanja na iveraču. Kora dobivena okoravanjem dalje se koristi za proizvodnju toplinske energije za fazu sušenja, koja se ovisno o mediju sušenja može podijeliti na sušenje pregrijanom parom, dimnim plinovima i zrakom. Zatim slijedi faza usitnjavanja osušene sječke na mlinu čekićaru ili mlinu s noževima, na preporučenu granulaciju otvora 4 mm. Kondicioniranjem se sječki dodaje para ili voda neposredno prije peletiranja, a cilj je stvaranje sloja vode na površini čestica drva koji olakšava proces peletiranja smanjujući trenje između samih čestica drva, ali i pri kontaktu sirovine i stjenke matrice. Peletiranje se može provoditi prešama s ravnom ili prstenastom matricom (slika 7 a),b)). Kod preša s ravnom matricom sirovina se dodaje na matricu i jednoliko raspoređuje po površini, pokretni valjci smješteni iznad matrice potiskuju materijal (sirovinu) te ga usmjeravaju kroz otvore matrice kroz konično upuštenje prema dolje. Uslijed visokog tlaka i temperature, materijal se poveže i čini kompaktnu cjelinu u vidu peleta koji se nakon izlaska iz matrice reže (lomi) na odgovarajuću duljinu noževima koji prelaze ispod matrice. Drugi način je preša s prstenastom matricom koja se sastoji od rotirajuće matrice i stacionarnih valjaka (rolera) koji potiskuju materijal kroz cilindrične otvore, od unutarnjeg oboda matrice prema van (Šafran, 2015). Ovisno o namjeni pelet se izrađuje u različitim dimenzijama, tako se za kućanstva izrađuje pelet promjera 6 mm dok je onaj za industrijske kotlove promjera 11 mm. Tako isprešani peleti, budući da imaju visoku temperaturu (90-95°C), moraju se ohladiti. Hlađenjem gube mali dio vlage, stabiliziraju se, postaju otporniji na lom i spremni su na pakiranje (Omer i dr. 2020).



Slika 7. Konstrukcijske izvedbe preša za peletiranje

a) preša s ravnom matricom; b) preša s prstenastom matricom (Šafran, 2015)

Pakiranje se vrši automatiziranim strojem u plastične vreće (slika 8) od 15 kg koje se slažu na palete. Skladištenje peleta jako je važna stavka u cijelom procesu proizvodnje. Nužno je zaštititi pelet od kiše i vlage prilikom skladištenja, ali i transporta. Ako vlaga peleta prijeđe 20 %, moguća je pojava bakterija i gljiva, degradacija drva, pa tako i razvoj topline, što u najgorem slučaju može rezultirati samozapaljenjem (Omer i dr. 2020). Bitno je da se pelet skladišti na suhom mjestu bez rizika od poplave, bez plijesni i pretjerane vlage. Slaganje vreća na paletu, na drvenu ili kartonsku podlogu je dobar način zaštite peleta od gore navedenih uvjeta (<https://woodland-pellets.eu/skladistenje-peleta/>).



Slika 8. Pakiranje peleta u vreće od 15 kg

Izvor: <https://woodland-pellets.eu/pelet/>

#### 2.2.4. Certifikacija peleta

ENplus naziv je za shemu certifikacije drvnih peleta, a za njegovu provedbu odgovorno je *Europsko vijeće za pelete* (EPC) koje certificiranim tvrtkama dodjeljuje pravo korištenja ENplus certifikacijskih pečata za sve zemlje koje nisu obuhvaćene niti jednim nacionalnim udruženjem za pelete. Popis ovih nacionalnih udruga za pelete, koje upravljaju ENplus-om (Nacionalni davatelj licence) ili podržavaju razvoj ENplus-a (Nacionalna udruga za podršku) u svojim zemljama, naveden je na web stranici ENplus-a. ENplus je izvorno osmislio 2010. Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI) kao shemu certificiranja kvalitete za drvene pelete na tržištu grijanja. Cilj je bio postići opskrbu dosljednom kvalitetom proizvoda. Glavne ciljne skupine bili su proizvođači drvnih peleta i trgovci peletima s isporukom krajnjim korisnicima. Tržište peleta brzo se razvilo, doživjevši veliki porast međunarodne trgovine (ENplus Handbook, Part 1, 2015).

Licencu za korištenje zaštitnog znaka ENplus uvijek izdaje međunarodni davatelj licence ili nacionalni davatelj licence. Ona je valjana sve dok Certifikacijsko društvo ima valjani certifikat i vrijedi sve dok vrijedi i ugovor o licenciranju. Certifikat vrijedi za jedno razdoblje certificiranja u trajanju od tri godine. Zbog zlouporabe zaštitnog znaka ENplus ili zbog počinjene prijevare ovlaštenim tvrtkama koje su na crnoj listi može se zabraniti rad na dvije godine. Neovisnost certifikacijske sheme zajamčena je uključivanjem neovisnih akreditiranih tijela za certifikaciju, inspekciju i testiranje.

Certifikacijska shema ENplus definira 3 klase kvalitete peleta na temelju njihovih svojstava, koje se temelje na klasama ISO 17225-2 i nazivaju se:

- ENplus A1,
- ENplus A2,
- ENplus B.

Klase kvalitete ENplus prekoračuju zahtjeve standarda ISO 17225-2 u nekoliko sljedećih slučajeva:

- za klasu ENplus A1, mehanička otpornost treba biti  $\geq 98,0$  w-%.
- za ENplus B, mehanička otpornost mora biti  $\geq 97,5$  w-%.
- ograničena količina finih čestica u vrećama peleta i zapečaćenim velikim vrećama 0,5 w-% na tvorničkom ulazu
- ograničenje temperature peleta na mjestu utovara za isporuke krajnjem korisniku na 40°C
- obvezni propisi vezani uz taljenje pepela
- pepeo koji se koristi za mjerenje karakteristika taljenja proizvodi se na 815°C (ENplus Handbook, Part 3, 2015).

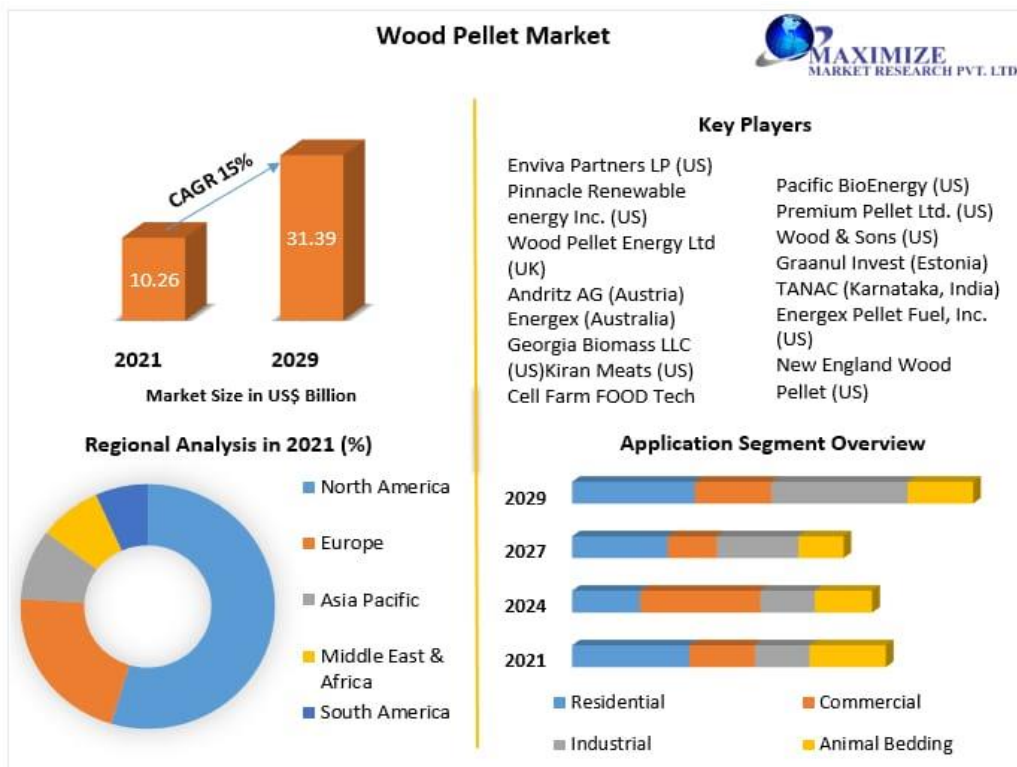
Tablica 2. Dozvoljene vrijednosti najvažnijih parametara peleta (ENplus Handbook, Part 3, 2015)

Svojstvo	Jedinica	Enplus A1	Enplus A2	Enplus B
Promjer	mm	6 ± 1 ili 8 ± 1		
Duljina	mm	3,15 < L ≤ 40		
Sadržaj vode (Vlažnost)	w-%	≤ 10		
Sadržaj pepela	w-%	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0
Mehanička otpornost	w-%	≥ 98,0	≥ 97,5	
Količine finih čestica (<3,15 mm)	w-%	≤ 1.0 (≤ 0,5)		
Temperatura peleta	°C	≤ 40		
Neto kalorična vrijednost	kWh/kg	≥ 4,6		
Nasipna gustoća	kg/m	600 ≤ BD ≤ 750		
Aditivi	w-%	≤ 2		
Sadržaj dušika	w-%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Sadržaj sumpora	w-%	≤ 0,04	≤ 0,05	
Sadržaj klora	w-%	≤ 0,02		≤ 0,03
Temperatura deformacije pepela	°C	≥ 1200	≥ 1100	
Sadržaj arsena	mg/kg	≤ 1		
Sadržaj kadmija	mg/kg	≤ 0,5		
Sadržaj kroma	mg/kg	≤ 10		
Sadržaj bakra	mg/kg	≤ 10		
Sadržaj olova	mg/kg	≤ 10		
Sadržaj žive	mg/kg	≤ 0,1		
Sadržaj nikla	mg/kg	≤ 10		
Sadržaj cinka	mg/kg	≤ 100		

### 2.2.5. Tržište peleta

Budući da cijene fosilnih goriva vrtoglavo rastu, drvni peleti postaju sve popularniji što dovodi do rasta potražnje za biomasom za proizvodnju električne i toplinske energije i snažnog globalnog rasta tržišta peleta. Obzirom da se pelet koristi od kućanstava do velikih industrijskih pogona, na tržištu razlikujemo 3 tipa korisnika peleta:

- Mali korisnici: <10 tona peleta godišnje (kućanstva koja koriste peći na pelete),
- Srednji korisnici: 10 – 1000 tona peleta godišnje (hoteli, tvrtke, sportski objekti, veće stambene zgrade),
- Veliki korisnici: > 1000 tona peleta godišnje (tvornice, energane, toplane i veliki industrijski pogoni).



Slika 9. Projekcija tržišta drvnih peleta u razdoblju od 2021. do 2029.

Izvor: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-wood-pellets-market/30306/>

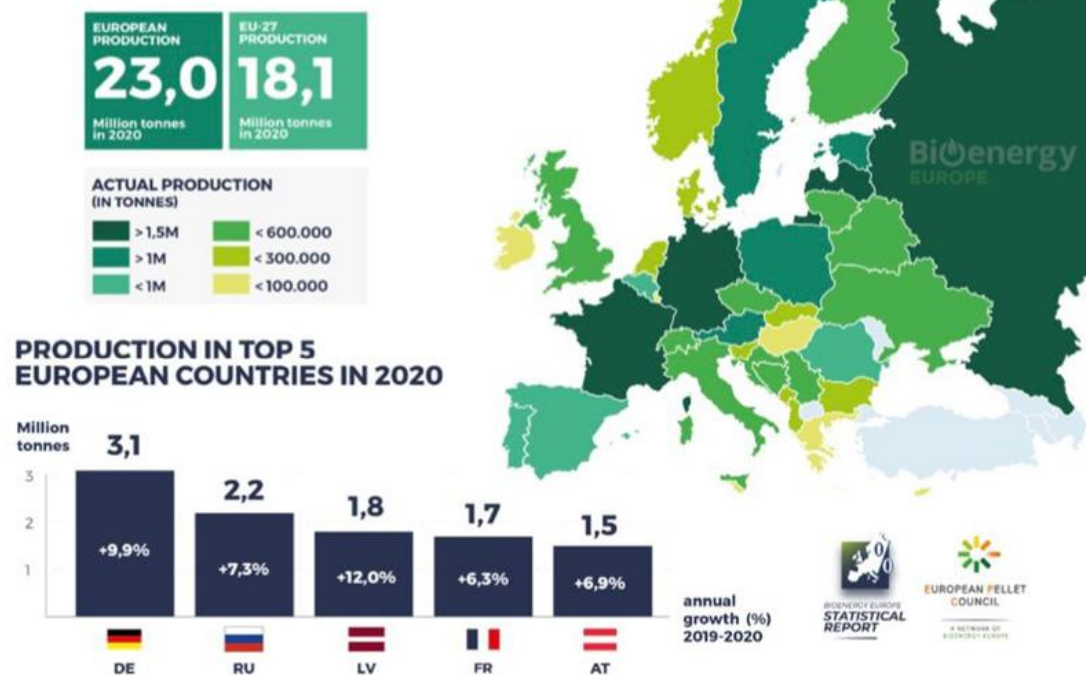
Tržište drvnih peleta procijenjeno je na 10,26 milijardi USD. u 2021 (slika 9). Procjenjuje se da će veličina globalnog tržišta drvenih peleta rasti po CAGR-u <sup>1</sup> od 15% tijekom predviđenog razdoblja (2021.-2029.), te bi 2029. godine trebala dosegnuti 31,39 milijardi USD. Očekivanja su da će europska regija imati najveći udio na tržištu peleta. U Sjevernoj Americi i Europi većina poduzeća prelazi s ugljena na biomasu u svojim energetske postrojenjima. Glavni razlog tomu je što su vlade ovih zemalja odlučile koristiti održivu biomasu za proizvodnju energije kako bi ispunile svoje obveze korištenja obnovljivih izvora energije. Na temelju istraživanja, do 2029. godine predviđa se da će tržištem drvnih peleta dominirati industrijski sektor, s udjelom od preko 35%. Upotreba peleta u industrijskom sektoru će se povećati zbog sve većeg trenda pretvaranja postrojenja na ugljen u postrojenja na biomasu. Godine 2019. elektrana na ugljen Drax sa sjedištem u Ujedinjenom Kraljevstvu objavila je da će do 2030. postati jedna od prvih tvrtki u svijetu koja će raditi bez ugljika. Slično tome, Koehler Group je namjeravala započeti pretvaranje svoje njemačke tvornice koja je koristila drobljeni lignit u fino gorivo dobiveno od drva do lipnja 2025 (<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-wood-pellets-market/30306/>).

<sup>1</sup> Složena godišnja stopa rasta (CAGR) je stopa povrata (RoR) koja bi bila potrebna da bi ulaganje raslo od početnog stanja do završnog stanja, pod pretpostavkom da je dobit ponovno uložena na kraju svakog razdoblja životnog vijeka ulaganja.



## EUROPEAN/EU-27 WOOD PELLET PRODUCTION

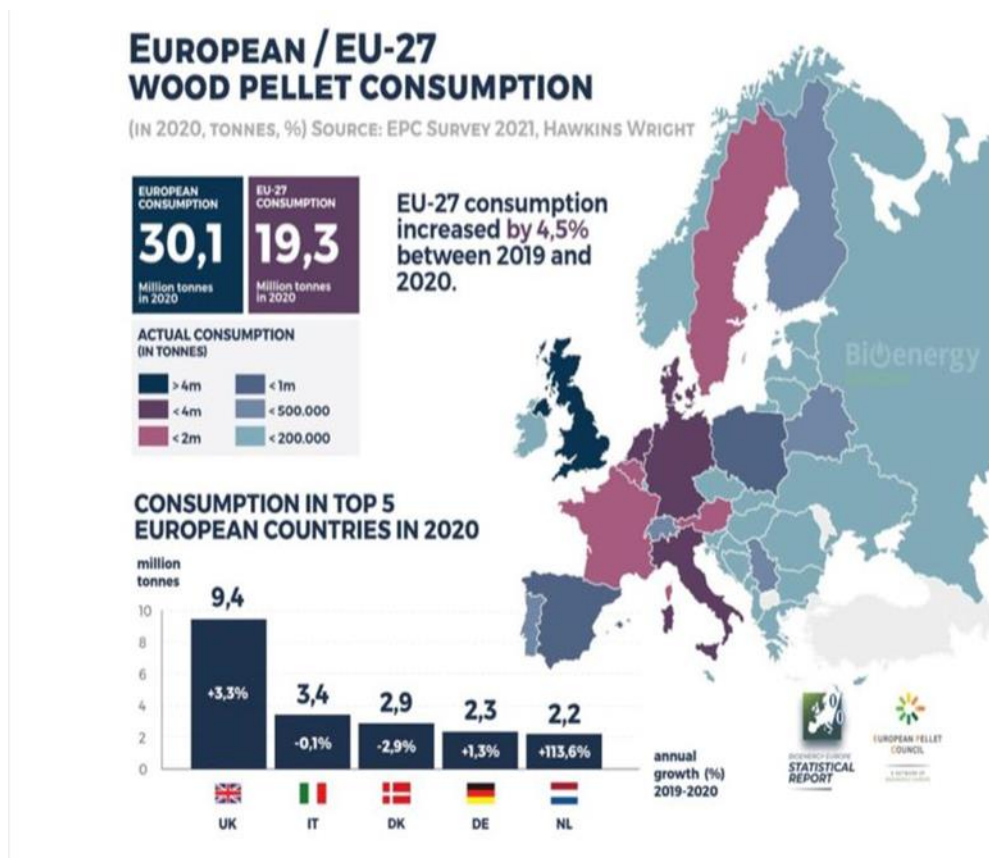
(IN 2020, TONNES, %) SOURCE: EPC SURVEY 2021



Slika 10. Europski proizvođači peleta u 2020. godini

Izvor: Bioenergy statistical report 2021

Najveći proizvođač peleta u Europi je Njemačka koja je prema podacima iz 2020. godine proizvela 3,1 milijun tona što predstavlja rast od 9,9% u odnosu na 2019. godinu. U top 5 europskih proizvođača spadaju i Rusija, Litva, Francuska i Austrija (slika 10).



Slika 11. Europski potrošači peleta u 2020. godini

Izvor: Bioenergy statistical report 2021

Također podaci iz 2020. pokazuju da je najveći europski potrošač peleta Velika Britanija s čak 9,4 milijuna tona peleta što je 3,3 % više u odnosu na godinu prije. Druga na listi potrošača je Italija s 3,4 milijuna tona što je za 0,1 % manje u odnosu na 2019. godinu. Tu su još Danska, Njemačka i Nizozemska koja zatvara poredak prvih 5 potrošača peleta (slika 11).

Prema Godišnjem energetsom pregledu iz 2020. godine proizvodnja krutih biogoriva u Hrvatskoj obuhvaćala je proizvodnju drvnih peleta, drvnih briketa, drvnog ugljena, drvene sječke i ogrjevnog drva (tablica 3).

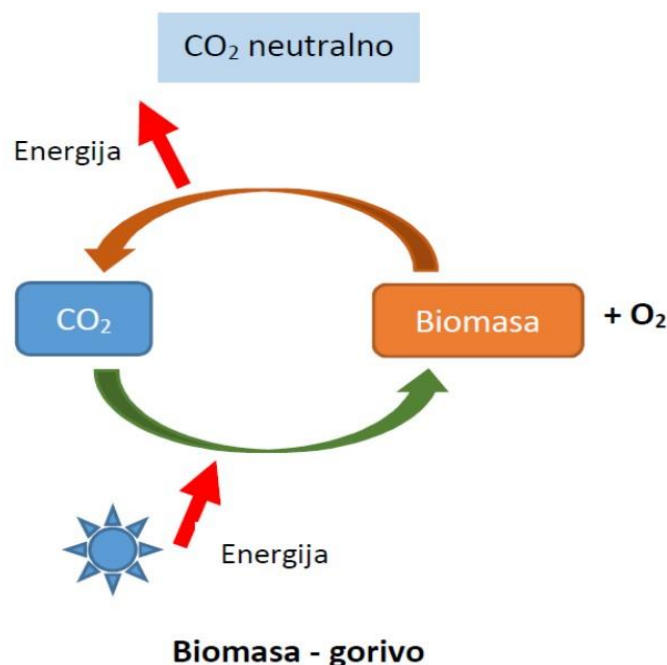
Tablica 3. Proizvodnja krutih biogoriva u Hrvatskoj 2020. godine

Vrsta krutog biogoriva Solid biofuels	Proizvodnja Production (t)
Drveni peleti Wood pellets	359 568
Drveni briketi* Wood briquettes*	54 899
Drveni ugljen Charcoal	13 219
Drvena sječka Wood chops	340 405
Ogrjevno drvo Firewood	4 934 400

Peleti su se proizvodili u 27 pogona s ukupnim kapacitetom proizvodnje od 493 040 tona godišnje, od čega je iskorišteno oko 73 %. Od ukupne proizvedene količine peleta iz 2020. godine oko 68,5% plasirano je na strano tržište dok je ostatak plasiran na domaće tržište. Kapacitet proizvodnje briketa iznosio je oko 102 370 tona godišnje, ali se njihova proizvodnja uglavnom obavlja periodično prema dostupnoj sirovini. Od ukupne proizvedene količine briketa u 2020. godini oko 60 % je plasirano na strana tržišta. U Hrvatskoj postoji samo jedan industrijski proizvođač drvenog ugljena koji proizvodi gotovo 95 % godišnje proizvodnje u svojim kapacitetima, a ostalo proizvede jedan manji proizvođač. Proizvodnja drvene sječke iznosila je nešto manje od drvnih peleta, 340 405 tona godišnje, dok je proizvodnja ogrjevnog drva bila 4 934 400 tona na godinu.

### 2.3. Biomasa CO<sub>2</sub> neutralan energent

Energija je osnova razvoja i napretka svake države, a potreba za energijom samo raste. U današnje vrijeme biomasa se koristi kao zamjena za fosilna goriva prije svega zbog znatno manjih štetnih emisija koje nastaju pri izgaranju, te se energija oslobađa u obliku toplinske energije koja se koristi za grijanje ili proizvodnju električne energije. U usporedbi s ostalim fosilnim gorivima, peleti imaju visoku energetska gustoću i proizvode relativno malo ili gotovo ništa ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) (Omer i dr. 2020.) Budući da je biomasa CO<sub>2</sub> neutralan energent (slika 12), što se postiže tako da je emisija CO<sub>2</sub> pri izgaranju jednaka količini CO<sub>2</sub> koju je biljka potrošila fotosintezom prilikom rasta, ona ne povećava emisiju stakleničkih plinova, čiji se učinak u posljednjih stotinjak godina povećava i dovodi do globalnog problema, a to su klimatske promjene. Ovaj zatvoreni krug u kojem je CO<sub>2</sub> nastao izgaranjem sveden na minimum, što nije slučaj kod plina, nafte ili ugljena, održiv je samo u slučaju da su sječa i prirast drvene biomase u jednakom odnosu (Šafran, 2015). Treba napomenuti da sječa šume isključivo s ciljem dobivanja energije nije održiva, naročito ako se ne poštuju pravila održivog upravljanja.



Slika 12. Biomasa CO<sub>2</sub> neutralan energent

Izvor: <https://www.politikaplus.com/novost/168668/zanemaruje-li-se-drвна-biomasa-u-hrvatskoj>



## PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Kao članica Europske unije Republika Hrvatska se obvezala na smanjenje stakleničkih plinova i neposredne potrošnje energije, kao i povećanja udjela obnovljivih izvora energije. Europska unija donijela je Direktivu (EU) 2018/2001 o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora koja ima obvezujući opći cilj za 2030. od najmanje 32 % energije iz obnovljivih izvora, te smanjenje emisija stakleničkih plinova u EU od 40 % također do 2030. godine u usporedbi s razinom iz 1990. godine (DIREKTIVA (EU) 2018/2001 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA).

### **3. Cilj istraživanja**

Drvni peleti su važan energent, ali zbog sve veće potražnje potrebno je proširiti sirovinsku bazu za njihovu proizvodnju. Cilj ovog rada je proizvesti i ispitati pelete koji će svojim gorivim svojstvima, ali i mehaničkom čvrstoćom zadovoljavati svim normiranim karakteristikama. Ispitivani su redom sadržaj vode, udio pepela, kalorijska vrijednost, vodoupojnost, dimenzijska stabilnost i tlačna čvrstoća. Isto tako, cilj rada je doprinijeti dosadašnjim istraživanjima peleta na osnovi drvne i poljoprivredne biomase.

#### 4. Materijali i metode

Ekperimentalni dio odrađen je u Laboratoriju za energijska mjerenja Zavoda za procesne tehnike, Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu. Za potrebe istraživanja osnovnoj sirovini hrasta dodane su poljoprivredne sirovine, točnije kukuruz i suncokret u različitim omjerima, te su smjese miješane i na kraju prešane u pelete. Tako dobiveni peleti ispitivani su različitim metodama i postupcima prema normama za ispitivanje različitih parametara peleta.

##### 4.1. Priprema sirovine

Priprema sirovina sastojala se prvenstveno od usitnjavanja sirovine hrasta, kukuruza i suncokreta budući da su im čestice bile prevelike za prešanje. Uzorci hrastovine dobiveni su iz drvne građe čiji su komadići usitnjeni dlijetom i čekićem na komadiće dimenzija 1,5 × 1,5 cm. Dalje su se takvi komadići usitnjavali na sječkalici *Retsch SM 400* s dva noža i protunožem sa sitom od 2 mm. Nadalje sirovine kukuruza i suncokreta usitnjeni su na mlinu proizvođača *IKA MF10* sa sitom od 1 mm. Tako usitnjene sirovine su tri tjedna provele u klima komori *Memmert HCP105* na temperaturi od 30 °C i 80 % relativne vlage zraka, kako bi postigle vlagu ravnoteže, tj. sadržaj vode od 12 do 15 %, koji je prema literaturi idealan za peletiranje. Završetkom kondicioniranja, pristupilo se ručnom miješanju sirovina u omjerima navedenim u tablici.

Tablica 4. Udio pojedine sirovine

grupa	sirovina (%)			rač. pepeo (%)	ciljana ENplus klasa	masa (g)		
	hrast	suncokret	kukuruz			hrast	suncokret	kukuruz
<b>1</b>	100.0	0.0	0.0	0.275	A1	50.00	0.00	0.00
<b>2</b>	97.5	2.5	0.0	0.648	A1	48.75	1.25	0.00
<b>3</b>	95.0	5.0	0.0	1.021	A2	47.50	2.50	0.00
<b>4</b>	90.0	10.0	0.0	1.766	B	45.00	5.00	0.00
<b>5</b>	95.0	0.0	5.0	0.540	A1	47.50	0.00	2.50
<b>6</b>	85.0	0.0	15.0	1.069	A2	42.50	0.00	7.50
<b>7</b>	75.0	0.0	25.0	1.599	B	37.50	0.00	12.50
<b>8</b>	96.0	2.0	2.0	0.679	A1	48.00	1.00	1.00

<b>9</b>	92.0	4.0	4.0	1.083	A2	46.00	2.00	2.00
<b>10</b>	85.0	7.5	7.5	1.790	B	42.50	3.75	3.75

Preliminarno testiranje udjela pepela, kao i sadržaja vode, zasebno je odrađeno na svakoj osnovnoj sirovini (hrast, suncokret, kukuruz). Na temelju tih podataka određeni su teoretski udjeli pepela po grupama uzoraka od 1 do 10. Konkretni udjeli sirovina po grupama odredili su se prema rezultatima preliminarnog testiranja udjela pepela, ciljajući ENplus klase od A1 do B.

## 4.2. Peletiranje

Proces peletiranja označava sabijanje ili prešanje usitnjenih poljoprivrednih i drvnih sirovina u cilindričan oblik prešom za peletiranje. Prilikom izrade ovih peleta koristila se ručno izrađena preša (slika 13) koja radi na principu postizanja odgovarajuće sile pri temperaturi u željenom vremenu s ciljem da dobiveni peleti budu bez oku vidljivih oštećenja i pukotina. Parametri za izradu ovih peleta bili su temperatura od 140 do 150 °C koja se regulirala ugrađenim termo regulatorom i grijačem te je provjeravana i termometrom, čija je sonda bila montirana u obodu kalupa za prešanje, sila od 7000 N, dok je vrijeme prešanja iznosilo 30 s od postizanja navedene sile od 7000 N. Također treba spomenuti da je preša spojena na računalo, a programom *Spider* očitavaju se sila i vrijeme prešanja. Za svaku grupu isprešano je po trideset peleta koji su se koristili za daljnje ispitivanje parametara.



Slika 13. Preša za peletiranje

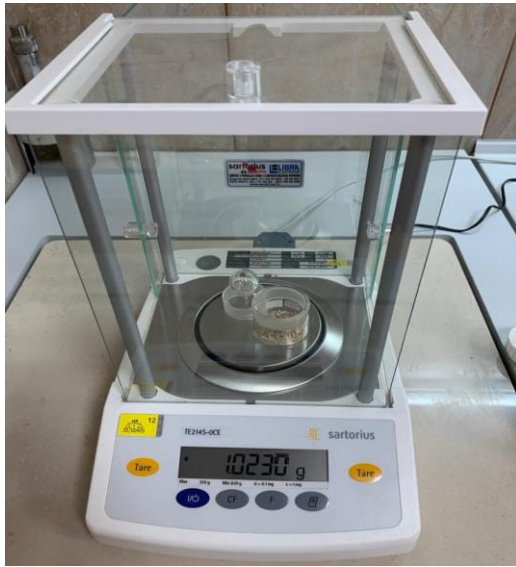
### 4.3. Određivanje sadržaja vode prema normi HRN EN ISO 18134-1:2015

Sadržaj vode količina je vode koja se nalazi u drvu, te se izražava kao postotni odnos mase vode u drvu i mase apsolutno suhoga drva (ASTM D9-12). Prema normi HRN EN 18134-1:2015 za čvrsta biogoriva određen je sadržaj vode uzoraka triju sirovina i njihovih smjesa, a potom i svih deset grupa peleta.

#### 4.3.1. Određivanje sadržaja vode sirovina

Dakle za svaku od tri usitnjene ulazne sirovine i grupu smjesa pripremljene su po tri prazne posudice koje su izvagane na analitičkoj vagi *Sartorius Talent TE214S-OCE* (slika 14) s točnošću 0,1 mg. U posudice se dodalo približno  $1 \pm 0,1$  g uzorka sirovine tako da isti bude raspoređen na  $1 \text{ cm}^2$  te su uzorci u otklopljenim posudicama stavljeni u sušionik (slika 15) na temperaturu  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  do postizanja

konstantne mase. Konstantna masa definira se kao promjena, ne veća od 0,2 % ukupne mase uzorka u vremenu od 60 min.



Slika 14. Analitička vaga



Slika 15. Sušionik

Vrijeme sušenja, postizanja konstantne mase, iznosilo je 4 sata. Nakon procesa sušenja posudice su poklopljene i premještene u eksikator (slika 16) gdje su se hladile do sobne temperature. Kao i početni uzorci, ohlađene posudice izvagane su na spomenutoj analitičkoj vagi i zabilježena im je masa. Sadržaj vode uzorka u postotcima  $M_{ad}$  određivan je prema izrazu (1):

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

gdje je:

$M_{ad}$  – sadržaj vode uzorka, %

$m_1$  – masa prazne posudice s poklopcem, g

$m_2$  – masa posudice i poklopca s uzorkom prije sušenja, g

$m_3$  – masa posudice i poklopca s uzorkom nakon sušenja (apsolutno suho stanje), g.



Slika 16. Eksikator

### 4.3.2. Određivanje sadržaja vode peleta

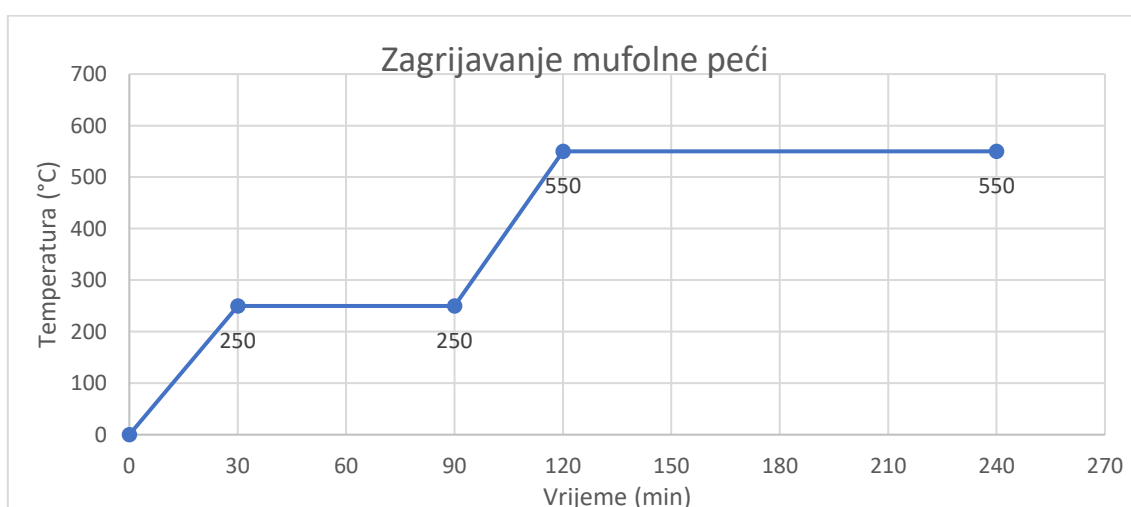
Nakon procesa prešanja isprešanim peletima također se određivao sadržaj vode prema istoj normi HRN EN 18134-1:2015 za čvrsta biogoriva. Isti uzorci peleta koristili su se i za ispitivanje vodoupojnosti. Zatim su se peleti stavili u klima komoru na ispitivanje vodoupojnosti, za čije je ispitivanje važno da su svi uzorci početnog apsolutno suhog stanja.

Za svaku grupu isprešano je po 10 peleta, na analitičkoj vagi izvagane su i zapisane mase posudica i peleta i tako stavljeni u sušionik na temperaturu  $103 \pm 2$  °C do postizanja konstantne mase. Kao što je već navedeno, peleti koji su se koristili za određivanje sadržaja vode, koristili su se i za određivanje vodoupojnosti, te se nisu mogli usitniti već su kao takvi stavljeni u sušionik na sušenje. To je razlog što je vrijeme sušenja povećano s 4h na 12h, te se sa sigurnošću može znati da se uzorak u potpunosti osušio. Nakon postizanja konstantne mase posudice su poklopljene i premještene u eksikator gdje su se neko vrijeme hladile. Ohlađene posudice i peleti ponovno su izvagani i zabilježena im je masa pomoću koje se preko izraza (gore navedeni) izračunao konačni sadržaj vode peleta.

### 4.4. Određivanje udjela pepela prema HRN EN ISO 18122:2015

Udio pepela predstavlja maseni udio anorganskog ostatka koji ostaje nakon izgaranja čvrstog biogoriva u kontroliranim uvjetima i izražava se kao postotak mase suhe tvari biogoriva. Žarenje uzoraka vrši se u mufolnoj peći *Nabertherm L9/13/B180* (slika 17) na temperaturi od  $550 \pm 10$  °C prema normi HRN EN ISO 18122:2015.

Postupak se sastoji od vaganja porculanskih posudica, po tri za svaku ulaznu sirovinu i grupu. Zatim se u porculansku posudicu dodaje približno 1 g ravnomjerno raspoređenog uzorka, izvaže na analitičkoj vagi te se zabilježi masa. Posudica s uzorkom stavlja se u hladnu mufolnu peć te se peć prema normi zagrijava prema uputama (graf 1). Temperatura se povećava jednoliko do 250 °C u 30 min (povećanje 7,5 °C/min). Navedena temperatura ostaje konstantna sljedećih 60 min da hlapljive komponente izađu iz uzorka prije zapaljenja. U sljedećih 30 min nastavlja se povećanje temperature do  $550 \pm 10$  °C. Postizanjem potonje temperature istu se zadržava sljedećih 120 min nakon čega se posuda vadi iz peći, 5-10 min se hladi na zraku i potom stavlja u eksikator (slika 18) do postizanja sobne temperature, nakon koje se posudice s pepelom važu i zapisuju vrijednosti.



Graf 1. Zagrijavanje mufolne peći

## MATERIJALI I METODE

Sadržaj pepela na suhoj bazi izražen u postotku računa se prema sljedećem izrazu (2):

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

pri čemu je:

$A_d$  – sadržaj pepela uzorka na suhoj bazi, %

$m_1$  – masa prazne porculanske posudice, g

$m_2$  – masa porculanske posudice i uzorka, g

$m_3$  – masa porculanske posudice i pepela, g

$M_{ad}$  – sadržaj vode uzorka, %



Slika 17. Mufolna peć





Slika 18. Uzorci 10 grupa nakon žarenja

#### 4.5. Određivanje kalorijske vrijednosti HRN EN ISO 18125:2017

Kalorijska ili ogrjevna vrijednost je količina energije po jediničnoj masi ili obujmu koja se oslobađa potpunim izgaranjem. Rezultat dobiven *kalorimetrom IKA C200* (slika 19) prema normi HRN EN ISO 18125:2017 predstavlja bruto (gornju) ogrjevnu vrijednost pri sadržaju vode.



Slika 19. Kalorimetar

Za svaku grupu, u porculanske posudice dodaje se po  $1 \pm 0,1$  g uzorka koji se sipaju u otvore čeličnog kalupa (slika 22) koji imaju promjer 13 mm. U otvore se postavljaju klinovi i spremni su za prešanje na ručnoj hidrauličkoj preši (slika 20) nazivne sile prešanja od 20 t. Tablete su prešane silom

od 4 t po tableti. Vrijeme prešanja iznosi približno 1 min nakon čega se tablete vade van pomoću klinova. Isprešane tablete raspoređene su u plastične bočice označene brojevima grupa kojima pripadaju. Skladištenje tableta u plastične bočice prvenstveno se radi kako one ne bi primile vlagu iz zraka. Tako isprešanim tabletama (slika 23) mjeri se masa na analitičkoj vagi te su spremne za ispitivanje gornje ogrjevne vrijednosti na kalorimetru. Kalorimetar je uređaj koji se sastoji od kalorimetarske bombe, posude kalorimetra, miješalice, temperaturnog senzora i konektora u vidu celulozne niti koji služi za zapaljenje uzorka.

Na platinastu žicu za zapaljenje zaveže se celulozna nit, a tableta se pincetom postavlja u kvarcnu posudicu za paljenje koja je dalje postavljena na držač koji se nalazi na poklopcu kalorimetarske bombe (slika 21). Celulozna nit pincetom se precizno spusti u posudicu tako da dodiruje tabletu kako bi zapaljenje bilo učinkovitije. Kalorimetrijska bomba se zatvara i puni kisikom pri tlaku od 30 bara, stavi se adapter za zapaljenje i postavlja na za to određeno mjesto u kalorimetru. U spremnik kalorimetra uliju se 2-3 litre vode sobne temperature (18-25 °C) zbog određivanja promjene temperature ( $\Delta t$ ) tijekom izgaranja i na digitalni ekran unosi se prethodno izvagana masa tablete. Zatvaranjem poklopca kalorimetra automatski počinje mjerenje bruto (gornje) ogrjevne vrijednosti koje traje između 14 i 17 min. Tokom mjerenja na zaslonu uređaja prikazuje se povećanje temperature vode koja okružuje kalorimetarsku bombu i tom promjenom temperature vode, uređaj po završetku mjerenja daje bruto (gornju) kalorijsku vrijednost pri sadržaju vode ispitivanog materijala. Vrijednosti bruto pri 0 % vode i neto kalorijskih vrijednosti mogu se naknadno računski odrediti. Rezultat se iskazuje u jedinicama J/g ili MJ/kg (kWh/kg).

Mjerenje gornje ogrjevne vrijednosti odvija se u 3 faze:

1. faza - miješanje i stabilizacija temperature vode,
2. faza - paljenje i izgaranje,
3. izjednačavanje temperature vode.

Ipak radi razlike u sadržaju vode ispitivanih uzoraka, dobivene bruto (gornje) ogrjevne vrijednosti nema svrhe uspoređivati i donositi neke zaključke na osnovu njih. Sve gornje ogrjevne vrijednosti svode se na apsolutno suho stanje tj. dodana im je energija utrošena za isparavanje vode iz uzorka koju dobijemo prema izrazu (3):

$$q_{V,gr,d} = q_{V,gr,m} \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

pri čemu su:

$M_{ad}$  – sadržaj vode uzorka, %

$q_{V,gr,d}$  – gornja ogrjevna vrijednost apsolutno suhog uzorka, pri konstantnom volumenu (J/g)

$q_{V,gr,m}$  – gornja ogrjevna vrijednost uzorka pri sadržaju vode, pri konstantnom volumenu (J/g)



Slika 20. Hidraulična preša



Slika 21. Kalorimetarska bomba



Slika 22. Čelični kalup za prešanje



Slika 23. Isprešane tablete

#### 4.6. Određivanje vodoupojnosti peleta

Vodoupojnost predstavlja proces ili dinamiku primanja vlage na drvo i proizvode od drva pri njihovoj izloženosti određenim vanjskim uvjetima. Za potrebe određivanja vodoupojnosti peleta kako je navedeno u poglavlju *Određivanje sadržaja vode* peleta, za svaku grupu isprešano je po 10 uzoraka koji su posušeni do apsolutno suhog stanja. Tako posušeni peleti stavljeni su u klima komoru *Memmert* (slika 24) na temperaturu od 30 °C i 90 % relativne vlage zraka. U vremenskim intervalima od 20, 40, 60, 90, 120 i 180 min peletima se mjerila masa i tako se utvrđivao sadržaj vode kojim se došlo do ispitivane vodoupojnosti. Sadržaj vode se dobivao iz izraza (4):

$$M_{ad} = \frac{(m - m_3)}{(m - m_1)} \times 100$$

pri čemu je:

$M_{ad}$  – sadržaj vode uzorka, %

$m$  – masa posudice i poklopca s uzorkom nakon određenog vremenskog perioda u klima komori, g

$m_1$  – masa prazne posudice s poklopcem, g

$m_3$  – masa posudice i poklopca s uzorkom nakon sušenja (apsolutno suho stanje), g.



Slika 24. Peleti u klima komori *Memmert*



#### 4.7. Određivanje dimenzijske stabilnosti peleta

Dimenzijska stabilnost predstavlja promjene dimenzija uzoraka peleta u različitim vanjskim uvjetima. Odlikuje se bubrenjem ili utezanjem što znači da uzorak gubi ili prima vodu ili vlagu iz okolnog zraka. Za potrebe određivanja dimenzijske stabilnosti isprešano je po 10 uzoraka za svaku grupu kojima su se nakon prešanja i kratkog kondicioniranja mjerile i zapisivale dimenzije. Dužina, promjer i dimenzije mjerile su se digitalnim pomičnim mjerilom *Insize* (slika 25) s mogućnošću prijenosa izmjerenih podataka na računalo. Nakon mjerenja i zapisivanja mase i dimenzija, uzorci su ostavljeni na zraku 7 dana pri prosječnoj temperaturi od 19 °C i prosječnoj relativnoj vlazi zraka od 59 %, a uvjeti su se mjerili na uređaju *Testo 175H1 Data Logger*. Sedmoga dana ponovio se postupak mjerenja dimenzija i mase kojim se došlo do konačnih potrebnih rezultata koje dobijemo iz izraza (5) i (6):

$$\Delta l = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100$$

pri čemu je:

$\Delta l$  – promjena dužine, %

$l_1$  - početna dužina uzorka, mm

$l_2$  - konačna dužina uzorka ( nakon 7 dana), mm

$$\Delta d = \frac{d_2 - d_1}{d_1} \times 100$$

pri čemu je:

$\Delta d$  – promjena promjera, %

$d_1$  – početni promjer uzorka, mm

$d_2$  - konačni promjer uzorka ( nakon 7 dana), mm



Slika 25. Mjerenje dužine i promjera

#### 4.8. Određivanje tlačne čvrstoće peleta

Maksimalno naprezanje kojim se drvo, u ovom slučaju pelet, opire djelovanju sile na tlak predstavlja tlačnu čvrstoću. Određivanje tlačne čvrstoće izvršeno je u Laboratoriju za drvo u graditeljstvu Zavoda za namještaj i drvo u graditeljstvu na strojnoj kidalici proizvođača *Shimadzu Autograph AGX plus* (slika 26).

Za svaku grupu izrađeno je po 10 uzoraka peleta kojima se izmjere dužina, promjer i masa kako bi se mogao dobiti volumen odnosno gustoća istih. Na slici je prikazan položaj uzorka peleta u kidalici prilikom postupka ispitivanja djelovanjem sile, te su uzorci postepeno opterećeni tlačnom silom u radijalnom smjeru. Brzina djelovanja sile iznosila je 8 mm/s. U trenutku kada je sila dosegla maksimalnu vrijednost ona je očitana na računalu spojenom na kidalicu. Ispitivanje svakog pojedinog uzorka trajalo je toliko dugo dok sila nije počela opadati, a taj pad sile uzrokovan je prelaskom iz elastičnog u područje plastičnih deformacija materijala.



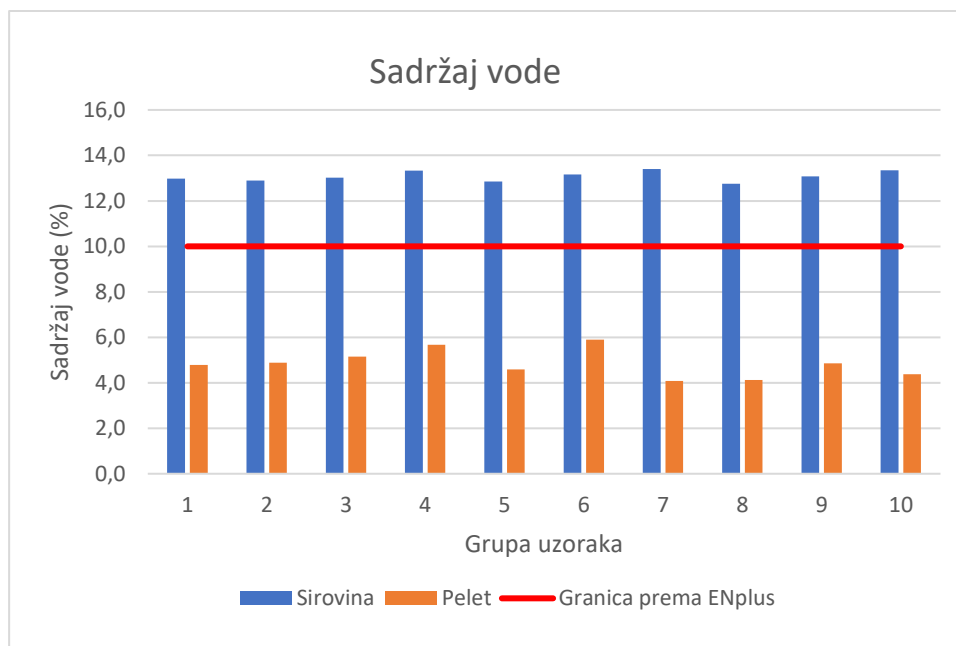
Slika 26. Položaj uzorka u kidalici *Shimadzu Autograph AGX plus*

## 5. Rezultati i rasprava

### 5.1. Sadržaj vode sirovina i peleta

Prema normi HRN EN 18134-1:2015 za čvrsta biogoriva određen je sadržaj vode uzoraka. Rezultati su prikazani u grafu (2).

Iz grafa je vidljivo da je sadržaj vode sirovina prilično ujednačen, s odstupanjem od svega 0,6% između najveće grupe 7 (75% hrast i 25% kukuruz) čiji je sadržaj vode bio 13,4% i najmanje grupe 8 (96% hrast, 2% suncokret i 2% kukuruz) sa sadržajem vode od 12,8%. Šafran i dr. (2018) u svom su istraživanju određivali sadržaj vode pojedinih vrsta drva. Tako su hrast i jasen imali oko 9 % sadržaja vode, a ostale vrste poput johe, graba i topole sadržaj vode između 11 i 12 %. Prema Ungureanu i dr. (2018) najoptimalniji sadržaj vode za peletiranje drvene sirovine kreće se od 10 do 15 %, dok sadržaj vode iznad 20 % ne stvara stabilne pelete. Također su otkrili da se povećanjem sadržaja vode za drvnu i poljoprivrednu sirovinu smanjuje tlak peletiranja te negativno utječe na mehaničku izdržljivost samih peleta. Serrano i dr. (2011) ispitivali su pelete od ječmene slame i pokazalo se da je optimalan sadržaj za proizvodnju peleta u rasponu od 19-23 %. 23 % je gornja dopuštena granica budući da se konačna vlaga peleta penje iznad 15 %, što prelazi maksimalnu dozvoljenu granicu od 10 %. Optimalni sadržaj vode razlikuje se od sirovine do sirovine, općenito se za bor kreće između 6 i 13 %, slamu 8 i 15% i miscanthus 20 i 25 % (Whittaker i dr. 2017). Sadržaj vode isprešanih peleta kretao se između 4 i 6 %, što je općenito manje od komercijalnog drvnog peleta čiji se sadržaji vode tipično kreću između 5 i 8 %. Razlog ovome ne možemo pripisati udjelu poljoprivredne sirovine, već načinu prešanja. Kako je već navedeno, u ovom istraživanju je korištena laboratorijska preša s matricom za pojedinačni pelet. Prešani materijal u ovom slučaju ostaje u kontaktu s matricom duže vremena, te je samim time produženo vrijeme ispravanja vode iz materijala.

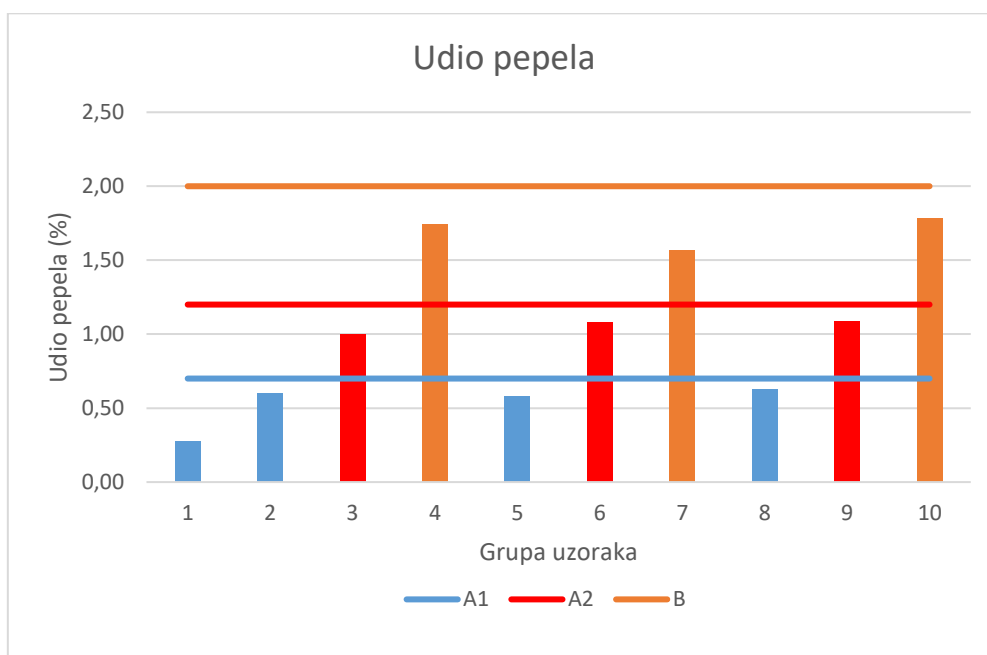


Graf 2. Sadržaj vode

## 5.2. Udio pepela

Prema normi HRN EN ISO 18122:2015 određen je udio pepela u uzorcima. Rezultati udjela pepela po grupama prikazani su u grafu (3).

Iz grafa je vidljivo da dodavanjem poljoprivrednih sirovina kukuruza i/ili suncokreta udio pepela raste. Tako je očekivano najmanji udio pepela imala čista hrastovina 0,28 %. Najmanji udio pepela, 0,58 %, imala je grupa uzoraka 5 (95 % hrast i 5 % kukuruz), a najveći grupa 10 s 1,79 % (85 % hrast, 7,5 % suncokret i 7,5 % kukuruz). Tenorio i dr. (2015) ispitivali su svojstva peleta proizvedenih od 12 vrsta poljoprivrednih i šumskih kultura. Dobivene vrijednosti za udio pepela kretale su se od 1,0 % do 10,5% gdje su viši udio pepela svakako imale poljoprivredne vrste. Različite mješavine izdanaka vinove loze i pluta peletirali su Mediavilla i dr. (2009) gdje su dobili da se dodavanjem industrijskog ostatka pluta u mladice vinove loze trošilo manje energije, a pri izgaranju dobivenih peleta smanjeno je i sinteriziranje pepela. Najmanji udio pepela kojeg su istraživali Kamperodou i dr. (2017) imalo je bukovo drvo (0,5 %), dok je kora bukve očekivano imala veći udio pepela (7,73 %). Najveći udio pepela među ispitivanim vrstama u istraživanju imala je pšenična slama (9,9 %). Kukuruz, bilo da se radi o sjemenu ili žetvenim ostacima, kao i suncokret pokazao je relativno nizak udio pepela, međutim u daljnjem dodavanju drvu bukve on raste kao što je vidljivo i iz ovog istraživanja. Iz istraživanja Šafran i dr. (2018) kora hrasta lužnjak ima izrazito visok udio pepela i iznosi 13,64 %, dok je graba nešto niži 11,91 %, dok je kod ostalih vrsta (grab, topola, joha) između 7 i 10 %. Zatim se ispitivao udio pepela okoranog drva koji je dao dosta bolje rezultate, a vrijednosti su 0,50 % za jasen, 0,46 % za grab, te za johu i topolu oko 0,45 %. Rezultat za hrast bio je 0,63 % što je nešto veće u odnosu na rezultat udjela pepela hrasta ovog rada koji je iznosio 0,28 %. Svi prikazani rezultati sugeriraju da prilikom proizvodnje peleta drvo prvotno treba okorati s ciljem postizanja željene kvalitete, te da povećanjem udjela poljoprivredne biomase raste i udio pepela. Isto tako, pokazalo se da su preliminarni teoretski proračuni udjela pepela na osnovu udjela pepela svake sirovine zasebno (vidi poglavlje 4.1.) bili točni. Željeni uvjeti udjela pepela (prema Enplus A1, A2 i B) su ispunjeni za svaku grupu uzoraka (graf 3).

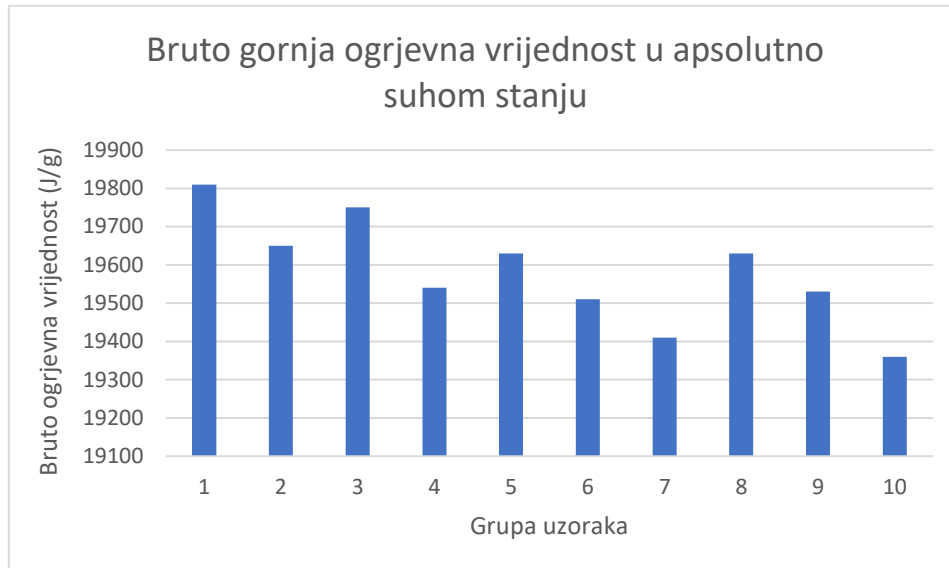


Graf 3. Udio pepela



### 5.3. Kalorijska vrijednost

Veća kalorijska vrijednost znači veću toplinsku energiju koju pelet izgaranjem emitira. Prema normi HRN EN ISO 18125:2017 dobivene su vrijednosti kalorijske vrijednosti bruto pri određenom sadržaju vode koje su se preko izraza (3) svedene na bruto gornje ogrjevne vrijednosti u apsolutno suhom stanju koje su vidljive na grafu (4).



Graf 4. Bruto gornja ogrjevna vrijednost u apsolutno suhom stanju

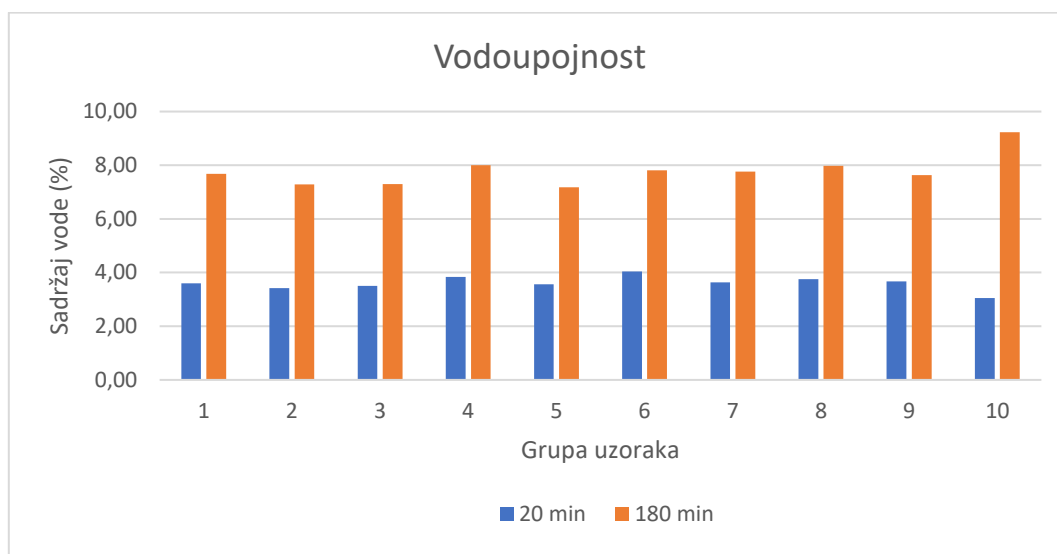
Iz grafa je vidljivo da grupa 1 (čisti hrast) ima najveću gornju ogrjevnu vrijednost dok se dodavanjem poljoprivrednih sirovina ista smanjuje, izuzev grupe 3.. Najmanju vrijednost, 19360 J/g, ima grupa 10 (85 % hrast, 7,5 % suncokret i 7,5 % kukuruz), a najveću, izuzev grupe 1, ima grupa 3 (95 % hrast i 5 % suncokret), 19750 J/g. Miranda i dr. (2009) u svom radu dobili su rezultate koji su pokazali da peleti ječmene slame imaju bruto ogrjevnu vrijednost za 2200 J/g nižu nego neprešani materijal. Serrano i dr. (2011) u svom radu ističu da je donja ogrjevna vrijednost peleta od ječmene slame (16,23 MJ/kg) znatno niža od one za pelete od borovine (19,21 MJ/kg). Kod miješanih peleta napravljenih miješanjem poljoprivrednih i drvenih sirovina, ne samo niži sadržaj pepela u drvu, već i sadržaj lignina, poboljšava neto kaloričnu vrijednost smjese. Neto ogrjevna vrijednost je varirala je od 11,61 MJ/kg do 19,92 MJ/kg, te su peleti izrađeni od poljoprivrednih ostataka imali niže vrijednosti od onih izrađenih od drva. Veliki raspon rezultat je varijacija u kemijskim svojstvima za svaku vrstu biomase, kao što su sadržaj pepela, hlapljive tvari, lignin, ekstraktivi i vezani ugljik (Tenorio i dr. 2015). Određivanjem ogrjevne vrijednosti najbolje rezultate Šafran i dr. (2018) utvrdili su kod uzorka drva crne topole koja iznosi 19,63 MJ/kg, a najmanja vrijednost izmjerena je kod uzorka graba 18,94 MJ/kg.

## 5.4. Vodoupojnost

Vodoupojnost je određena izlaganjem uzoraka apsolutno suhog stanja uvjetima u klima komori (vidi poglavlje 4.6.). U tablici (4) i grafu (5) prikazani su rezultati dinamike primanja sadržaja vode (vodoupojnosti) kroz različite periode provedene u klima komori (od 20 do 180 min).

Tablica 5. Vodoupojnost

Grupa uzoraka	Sadržaj vode (%)					
	20 min	40 min	60 min	90 min	120 min	180 min
<b>1</b>	3,59	4,69	5,83	6,49	7,02	7,67
<b>2</b>	3,41	4,57	5,56	6,18	6,74	7,29
<b>3</b>	3,51	4,45	5,72	6,33	6,64	7,29
<b>4</b>	3,84	4,94	6,27	6,88	7,42	8,00
<b>5</b>	3,56	4,81	5,68	6,34	6,79	7,18
<b>6</b>	4,04	5,38	6,26	6,99	7,32	7,81
<b>7</b>	3,63	5,07	5,83	6,59	7,03	7,76
<b>8</b>	3,75	5,23	6,11	6,81	7,35	7,98
<b>9</b>	3,67	5,14	5,96	6,55	7,03	7,63
<b>10</b>	3,05	4,61	5,56	6,72	7,80	9,23

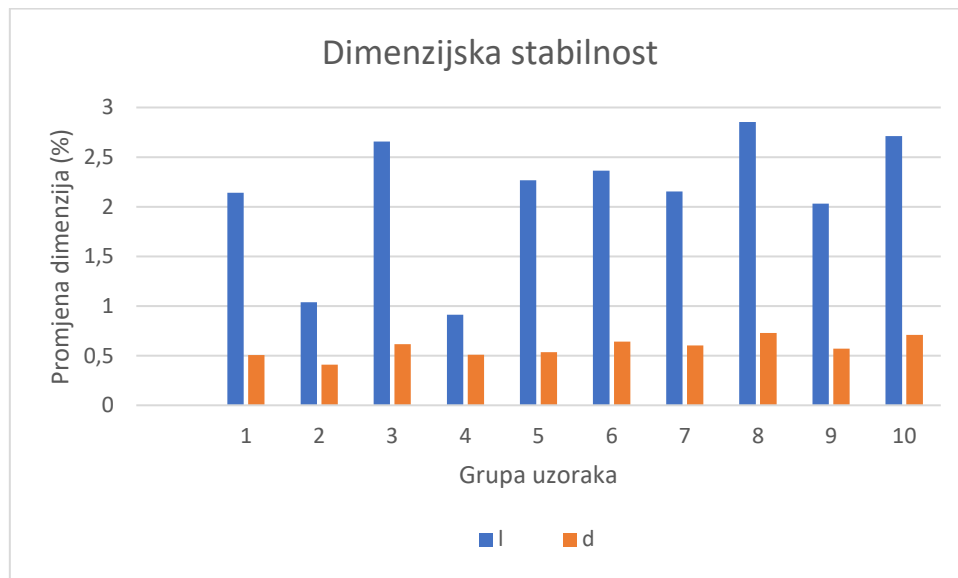


Graf 5. Vodoupojnost

Iz rezultata prikazanih u tablici i grafu vidi se postepeni rast sadržaja vode svih grupa uzoraka. Najviši konačni sadržaj vode od 9,23 % ostvarila je grupa uzoraka 10 (85 % hrast, 7,5 % suncokret i 7,5 % kukuruz), dok je grupa 5 (95 % hrast i 5 % kukuruz) imala najniži konačni sadržaj vode, koja je iznosila 7,18 %. Fasina (2008) u studiji provedenoj na peletima od kikirikijeve ljuske ističe da je optimalna točka upijanja vlage peleta od 3 % do 5 % te da dodatno povećanje apsorbirane vlage može rezultirati smanjenjem kvalitete i karakteristika čvrstoće peleta. Peleti s visokim sadržajem vode imaju tendenciju da apsorbiraju manje vode, dok peleti s niskim sadržajem vode imaju tendenciju da apsorbiraju više vode.

### 5.5. Dimenzijska stabilnost

Ispitivanje dimenzijske stabilnosti zasnivalo se na promjenama dužine i promjera peleta nakon 7 dana izloženosti uvjetima temperature zraka od 19 °C i 59 % relativne vlage zraka. Prije početka određivanja dimenzijske stabilnosti isprešani peleti bili su u prosjeku dužine 7 mm i promjera 6 mm. Prosječne vrijednosti povećanja dimenzija prikazane su na grafu (6).



Graf 6. Dimenzijska stabilnost

Iz grafa rezultata dimenzijske stabilnosti vidljivo je da su promjene relativno približnih vrijednosti (osim grupe 2 i 4). Najveću promjenu dužine (l) od 2,86 % imala je grupa 8 (96 % hrast, 2 % suncokret i 2 % kukuruz), a najmanju grupa 4 (90 % hrast i 10 % suncokret), 0,91%. Što se tiče promjera (d), najmanju promjenu imala je grupa 2 (97,5 % hrast i 2,5% suncokret) 0,41 %, dok je najveću imala grupa 10 (85 % hrast, 7,5 % suncokret i 7,5 % kukuruz), 0,71 %. Da su istraživanjem utvrđene jako male razlike u postotnim vrijednostima vidljivo je u razlici između najvećeg i najmanjeg postotka koji iznosi svega 0,31 %. Promjeri isprešanih peleta bili su u granicama prema *Enplus* certifikaciji ( $6 \pm 1$  mm) Duljina je bila od 5,72 do 8,22 mm, dok se promjer kretao od 6,05 do 6,11 mm. U radu Tenorio i dr. (2015) utvrđeno je da je duljina peleta varirala od 12,3 do 27,7 mm, dok se promjer peleta kretao od 5,9 do 6,6 mm. Budući da su se u ovom radu peleti prešali na ručnoj peletirki duljinu peleta je teško uspoređivati, dok je promjer relevantan i otprilike istih dimenzija. U drugim radovima svi peleti zadovoljavaju *ENplus* certifikaciju, Whittaker i dr. (2017) ustanovili su da je povećana vlačna čvrstoća primjećena s povećanjem duljine peleta u nizu sirovina, a kraći peleti imali su viši sadržaj vode i bili su manje izdržljivi.

## 5.6. Tlačna čvrstoća

Na laboratorijskoj kidalici određivala se tlačna čvrstoća na principu djelovanja tlačne sile na pelet u radijalnom smjeru. Očitavana je postignuta maksimalna sila pri kojoj je došlo do deformacije peleta, odnosno kada je deformacija prešla iz elastičnog u plastično područje deformacija materijala.



Graf 7. Tlačna čvrstoća

S grafa (7) je vidljivo da se maksimalna sila kojom se tlačio pojedini pelet kretala od 241 N do 286 N. Najmanju vrijednost maksimalne sile imala je grupa uzoraka 6 (85 % hrast i 15 % kukuruz), dok je najveću vrijednost imala grupa 10 (85 % hrast, 7,5 % suncokret i 7,5 % kukuruz). Carone i dr. (2011) određivali su tlačnu čvrstoću peletima masline od sirovine mljevene na 2 i 4 mm. Utvrdili su veće vrijednosti tlačne čvrstoće u peletima masline od sirovina mljevenih na 2 mm u usporedbi s onima od sirovina veličine mljevenja 4 mm. Maksimalna sila loma kojom se tlačio pelet u radu Tenorio i dr. (2015) varirala je od 295 do 692 N. Vrijednosti maksimalne sile u ovoj studiji bile su superiornije od vrijednosti ovog rada i vrijednosti koje su dobili García-Maraver i dr. (2010) za pelete od drva masline. Visoke vrijednosti lomnih i maksimalnih sila omogućuju peletima da zadrže svoj oblik tijekom transporta.

## 6. Zaključak

Ovaj diplomski rad sastojao se od prešanja sirovine hrasta s dodacima poljoprivredne biomase te laboratorijskih ispitivanja kojima su podvrgnuti isprešani peleti. Redom su se ispitivali sadržaj vode, udio pepela, kalorijska vrijednost, vodoupojnost, dimenzijska stabilnost i tlačna čvrstoća. Dobiveni rezultati bude nadu da se u budućnosti, radi prevelikog iskorištavanja drvene biomase, ona u nekoj mjeri zamijeni poljoprivrednom biomasom, s namjerom da takvi peleti postanu prihvatljivi za proizvodnju energije u industrijama i malim kućanstvima.

Sadržaj vode svih mješavina sirovina pripremljenih za prešanje kondicioniran je na 12 do 14 %, što se pokazalo povoljnim za prešanje peleta. Sadržaji vode gotovih, isprešanih peleta, kretali su se između 4 i 6 %. Bitno je napomenuti kako se ovi iznosi sadržaja vode ne mogu uspoređivati s peletom proizvedenim industrijskim prešama. Prešanje pojedinačnih peleta laboratorijskom prešom uzrokuje povećano isparavanje vode te je za očekivati da će ti sadržaji vode biti niži u usporedbi s peletom proizvedenim industrijskom prešom. No, može se zaključiti kako bi sadržaj vode peleta proizvedenih od ispitivanih sirovina s industrijskom prešom bio ispod dozvoljene gornje granice od 10 % (prema Enplus-u). Nadalje, udio pepela raste s povećanjem udjela poljoprivredne sirovine. Teoretski izračuni udjela pepela, a koji su se temeljili na određenim udjelima pepela svake sirovine zasebno, su se pokazali kao točni, te su sve grupe uzoraka ispunile uvjete ciljne ENplus klase (A1, A2, B). Kada govorimo o kalorijskoj vrijednosti, generalno možemo zaključiti kako povećani udio poljoprivredne sirovine također ima negativni učinak, no minimalni. Najmanju vrijednost gornje bruto ogrjevnice vrijednosti, 19360 J/g, imala je grupa 10 (85 % hrast, 7,5 % suncokret i 7,5 % kukuruza), a najveću izuzev grupe 1 (100% hrast) ima grupa 3 (95% hrast i 5% suncokret), 19750 J/g. Najveća vodoupojnost zabilježena je kod grupe 10 s najvećim udjelom suncokreta i kukuruza. Općenito, sadržaji vode uzoraka su od početno suhog stanja narasli do otprilike 8 % u periodu od 180 min. Dimenzijska stabilnost se pokazala kao zadovoljavajuća te nisu uočene značajne razlike između pojedinih grupa uzoraka, pogotovo u radialnom smjeru. Za uspoređivanje grupa uzoraka na temelju tlačne čvrstoće bi bilo poželjno povećati broj ponavljanja. No zanimljivo je, i svakako ide u prilog poljoprivredne sirovine, da je najbolje rezultate (najvišu maksimalnu silu postignutu na kidalici) pokazala grupa 10, s udjelom od 85 % hrasta, 7,5 % suncokreta i 7,5 % kukuruza.

Na kraju, može se reći da je cilj ovoga rada ispunjen. Zaključak je da se miješanjem drvene i poljoprivredne biomase može proizvesti pelet koji potencijalno zadovoljava Enplus certifikaciju, kao i očekivanja krajnjih kupaca. Daljnja istraživanja, po mogućnosti s većim laboratorijskim ili polu-industrijskim prešama, su svakako poželjna.

## Literatura

1. Carone, M. T., Pantaleo, A., Pellerano, A., 2011: Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L, *Biomass Bioenergy* 35: 402–10.
2. DIREKTIVA (EU) 2018/2001 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora, Službeni list Europske unije, 2018.
3. Domac, J., 1998: BIOEN – Program korištenja biomase i otpada, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb.
4. Energija u Hrvatskoj, 2020: Godišnji energetski pregled
5. ENplus Handbook, Part 1 – Quality Certification Scheme For Wood Pellets; European Pellet Council (EPC) 2015.
6. ENplus Handbook, Part 2 – Certification Procedure; European Pellet Council (EPC) 2015.
7. ENplus Handbook, Part 3 – Pellet Quality Requirements; European Pellet Council (EPC) 2015.
8. Fasina, O. O., 2008: Physical properties of peanut hull pellets, *Bioresour. Technol.* 99(5): 1259-1266
9. García-Maraver, A., Ramos-Ridao, A. F., Ruiz, D. P., Zamorano, M., 2010: Quality of pellets from olive grove residual biomass, *European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, Spain.*
10. Holm, J.K., Henriksen, U.B., Hustad, J.E., Sørensen, L.K. 2006: Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. *Energy & Fuels*
11. Horvat, I., 2020: Numeričko-eksperimentalna analiza prikladnosti korištenja poljoprivredne biomase u toplovodnim kotlovima, Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb
12. HRN EN ISO 18134-1:2015 Čvrsta biogoriva -- Određivanje udjela vlage - Metoda sušionika - 1. dio: Ukupna vlaga - Referentna metoda (ISO 18134-1:2015; EN ISO 18134-1:2015)
13. HRN EN ISO 18122:2015 Čvrsta biogoriva -- Određivanje udjela pepela (ISO 18122:2015; EN ISO 18122:2015)
14. HRN EN 18125:2017 Čvrsta biogoriva – Određivanje kalorijske vrijednosti
15. Kamperodou, V., Lykidis, C., Barmpoutis, P., 2017: Assessment of the Thermal Characteristics of Pellets Made of Agricultural Crop Residues Mixed with Wood, *Crop residue in pellets, BioResources* 12(4): 9263-9272
16. Matali, S., Rahman, N. A., Idris S. S., Yaacob, N., 2016: Combustion properties, water absorption and grindability of raw/torrefied biomass pellets and Silantek coal, *Faculty of Chemical Engineering Malasya*
17. Mediavilla, I., Fernández, M. J., Esteban, L. S., 2009: Optimization of pelletisation and combustion in a boiler of 17.5 kWth for vine shoots and industrial cork residue, *Fuel Process Technol.* 90: 621–628.
18. Miranda, M. T., Arranz, J.I., Rojas, S., Montero, I., 2009: Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest, *Fuel* 88: 2106–2112
19. Omer, S. E., Kopljar, A., Hodžić, A., 2020: Biomasa kao gorivo, Univerzitet u Bihaću, Grafičar doo; Bihać
20. 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: 699-706.

21. Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. S., Barsberg, S.; Ahrenfeldt, J.; Henriksen, U.B. 2011: A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass & bioenergy* 35
22. Šafran, B., 2015: Ovisnost mehaničkih svojstava peleta o ulaznim veličinama drvene sirovine, Disertacija, Šumarski fakultet Zagreb.
23. Šafran, B., Jug, M., Radmanović, K., Hasan, M., Augustinović, K., Vučković, K., Risović, S., 2018: Doprinos istraživanju peleta od drva turopoljskog kraja, *Šumarski list*, 142 (3-4):149-159
24. Tenorio, C., Moya, R., Filho, M. T., Valaert, J., 2015: Quality of Pellets Made from Agricultural and Forestry Crops in Costa Rican Tropical Climates, *Biomass pellets in Costa Rica, BioResources* 10(1): 482-498.
25. Ungureanu, N., Vladut, V., Voicu, G., Dinca, M. N., Zabava, B. S., 2018: Influence of biomass moisture content on pellet properties – Review, *Engineering for rural development: 1876-1883*.
26. Whittaker, C., Shield, I., 2017: Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71: 1-11.
27. <https://www.enplus-pellets.eu/en-in/>
28. <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-wood-pellets-market/30306/>
29. <https://woodland-pellets.eu/skladistenje-peleta/>