

Utjecaj izlaganja drvnih peleta različitim mikroklimatskim uvjetima na njihova mehanička svojstva

Orlić, Danijel

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:108:836240>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

DIPLOMSKI STUDIJ
OBLIKOVANJE PROIZVODA OD DRVA

DANIJEL ORLIĆ

UTJECAJ IZLAGANJA DRVNIH PELETA RAZLIČITIM
MIKROKLIMATSKIM UVJETIMA NA NJIHOVA
MEHANIČKA SVOJSTVA

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK
DIPLOMSKI STUDIJ
OBLIKOVANJE PROIZVODA OD DRVA

UTJECAJ IZLAGANJA DRVNIH PELETA RAZLIČITIM
MIKROKLIMATSKIM UVJETIMA NA NJIHOVA
MEHANIČKA SVOJSTVA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Oblikovanje proizvoda od drva

Predmet: Energetika drvne industrije

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

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

3. (član) M. Sc. Marin Dujmović

Student: Danijel Orlić

JMBAG: 0068225825

Datum odobrenja teme: 25.04.2022.

Datum predaje rada: 15.09.2022.

Datum obrane rada: 28.09.2022.

ZAGREB, 2022.

Dokumentacijska kartica

Naslov:	Utjecaj izlaganja drvnih peleta različitim mikroklimatskim uvjetima na njihova mehanička svojstva
Autor:	Danijel Orlić
Adresa autora:	Hajdine 18, Vrbovsko, Republika Hrvatska
Mjesto izrade:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
Vrsta objave:	Diplomski rad
Mentor:	doc. dr. sc. Branimir Šafran
Komentor:	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Izradu rada pomogao:	M. Sc. Marin Dujmović
Godina objave:	2022.
Obujam:	5 + 53 stranica + 17 slika + 17 grafova + 1 tablica + 27 izvora literature
Ključne riječi:	biomasa, peleti, sadržaj vode, mehanička izdržljivost, skladištenje peleta
Sažetak:	<p>Šumska biomasa se sastoji od ostataka i otpada koji nastaju tijekom redovnog gospodarenja šumama. U biomasu iz drvne industrije spadaju ostaci piljenja, drobljenja itd. Može biti korištena kao gorivo u kotlovima ili kao sirovina za proizvodnju briketa, peleta i sl. Proizvodnjom peleta se ostvaruje dodana vrijednost iskorištavanja ostataka drva u pilani te industrijskih ostataka drva iz drvoprerađivačke industrije. Drvni pelet je obnovljivo gorivo s neutralnom emisijom ugljikovog dioksida. Jedna od bitnih stavki vezana za pelete je mehanička izdržljivost. Mehanička izdržljivost jedan je od najvažnijih parametara u proizvodnji peleta. Niska mehanička izdržljivost može prouzrokovati visok udio finih čestica što negativno utječe na kvalitetu peleta, ali i zadovoljstvo samog kupca. U ovom radu analizirat će se mehanička izdržljivost peleta hrvatskih proizvođača nakon izlaganja oštrim mikroklimatskim uvjetima. Oštri mikroklimatski uvjeti negativno će utjecati na svojstva peleta, a u ovom radu analizirat će se utjecaj povećane vlage na dimenzijsku stabilnost i mehaničku izdržljivost peleta. Mehanička izdržljivost mjerit će se pomoću dva uređaja: pelet-tester i ligno-tester.</p>

Documentation card

Title	Influence of wood pellet exposure to different microclimatic conditions on their mechanical properties
Author	Danijel Orlić
Address of author:	Hajdine 18, Vrbovsko, Republic of Croatia
Thesis performed at:	University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology
Publication type:	Master's thesis
Supervisor:	Assistant professor Branimir Šafran, PhD
Co-supervisor:	Assistant professor Kristijan Radmanović, PhD
Preparation assistant:	M.Sc. Marin Dujmović
Publication year:	2022
Volume:	5 + 53 pages + 17 figures + 17 graphs + 1 table + 27 references
Key words:	biomass, wood pellets, moisture content, mechanical durability, pellet storage
Abstract:	<p>Forest biomass consists of residues and waste generated during regular forest management. Biomass from the wood industry includes the remains of sawing, crushing, etc. It can be used as fuel in boilers or as raw material for the production of briquettes, pellets, etc. The production of pellets realizes the added value of utilizing wood residues in sawmills and industrial wood residues from the wood processing industry. Wood pellets are a renewable fuel with neutral carbon dioxide emissions. One of the important feature related to pellets is mechanical durability. Mechanical durability is one of the most important parameters in pellet production. Low mechanical durability can cause a high proportion of fine particles, which negatively affects the quality of the pellets, as well as the satisfaction of the customer. This work will analyze the mechanical durability of pellets produced by Croatian producers after exposure to harsh microclimatic conditions. Harsh microclimatic conditions will negatively affect the properties of pellets, and in this work impact of increased humidity on dimensional stability and mechanical durability of pellets will be analyzed. Mechanical durability will be measured using two devices: a pellet tester and a ligno tester.</p>



**IZJAVA O AKADEMSKOJ
ČESTITOSTI**

OB FŠDT 05 07

Revizija: 2

Datum: 2.2.2021.

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

vlastoručni potpis

Danijel Orlić

U Zagrebu, 28.09.2022.

PREDGOVOR

Na pisanje ovog diplomskog rada potakla me želja za istraživanjem drvnih peleta i njihove svakodnevne primjene.

Ovim putem se zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Branimiru Šafranu što mi je omogućio pisanje ovog diplomskog rada te na prenesenom znanju i korisnim savjetima. Zahvaljujem se M. Sc. Marinu Dujmoviću koji mi je pomogao u laboratorijskom istraživanju te je uvijek bio dostupan za odgovaranje na moje upite i nedoumice. Zahvaljujem se doc. dr. sc. Kristijanu Radmanoviću na komentorstvu i korisnim savjetima. Zahvaljujem se svim ostalim profesorima, asistentima, osoblju Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije koji su svojim znanjem i stručnošću educirali još jednog magistra inženjera drvne tehnologije.

Hvala mojoj majci i sestri na strpljenju i podršci tijekom studiranja.

Najveća hvala mojoj ljubavi Mariji koja mi je bila najveća podrška tijekom studiranja i koja je uvijek bila uz mene kad mi je bilo najpotrebnije.

Sadržaj

1.	UVOD.....	1
2.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	3
2.1.	Biomasa	3
2.2.	Peletiranje	4
2.3.	Sadržaj vode sirovine za izradu peleta	6
2.4.	Mehanička izdržljivost peleta.....	9
2.4.1.	Uređaji za određivanje mehaničke izdržljivosti peleta	11
2.5.	Skladištenje i transport peleta.....	13
2.6.	Klase peleta prema kvaliteti	15
3.	CILJ ISTRAŽIVANJA	16
4.	MATERIJALI I METODE	17
4.1.	Određivanje sadržaja vode.....	18
4.1.1.	Postupak	18
4.1.2.	Proračun	20
4.2.	Određivanje mehaničke izdržljivosti.....	20
4.2.1.	Određivanje mehaničke izdržljivosti prema normi HRN EN ISO 17831-1:2016	20
4.2.2.	Određivanje mehaničke izdržljivosti s ligno-testerom.....	22
4.3.	Određivanje dimenzijske stabilnosti peleta	23
5.	REZULTATI.....	25
5.1.	Rezultati ovisnosti mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode	25
5.2.	Rezultati mjerenja dimenzijske stabilnosti peleta	37
6.	RASPRAVA	41
7.	ZAKLJUČAK.....	44

8.	LITERATURA	46
9.	POPIS SLIKA.....	50
10.	POPIS GRAFOVA	51
11.	POPIS TABLICA	52
12.	DODACI.....	53

1. UVOD

Biomasa se smatra značajnim izvorom obnovljive energije, značajno smanjuje ovisnost o tradicionalnim fosilnim gorivima, posebno u slučaju zemalja koje su u mogućnosti nabaviti biomasu iz raznih izvora.

Proizvodnja i korištenje biomase, tehnologije bioenergije, njihov tržišni udio i istraživački interesi se značajno razlikuju u pojedinim državama pa čak i u različitim područjima unutar iste države. U većini zemalja regionalno zapošljavanje i ekonomska dobit su vjerojatno dva najvažnija pitanja u vezi korištenja biomase za proizvodnju energije. Biomasa je vrlo širok pojam koji se koristi za opisivanje materijala biološkog podrijetla koji može biti korišten kao izvor energije ili za pridobivanje kemijskih komponenti. Kao takav, uključuje drveće, alge i druge biljke te poljoprivredne i šumske ostatke. Isto tako podrazumijeva i mnoge druge materijale koji se smatraju otpadom našeg društva, poput otpadnih voda iz proizvodnje hrane i pića, mulj, industrijski (organski) nusproizvodi te organski ostaci iz kućnog otpada (Šegon i sur. 2014).

Zgušnjavanje biomase je učinkovita tehnologija za postizanje visokog iskorištenja resursa biomase. Jedan od načina zgušnjavanja biomase je peletiranje biomase. Peleti kao kruto biogorivo mogu se proizvesti iz raznih vrsta široko dostupne sirovine biomase, uključujući drveni otpad, poljoprivredne ostatke i industrijske nusproizvode. Prema Obernberger i Thek (2010) najčešće sirovine koje se koriste za proizvodnju drvnog peleta su: strugotine, piljevina i drvna prašina.

Sadržaj vode u peletima usko je povezan s njihovim mehaničkim svojstvima i za kvalitetne pelete prema ENplus certifikaciji sadržaj vode peleta ne smije prelaziti 10 %, jer to može negativno utjecati na samu mehaničku izdržljivost peleta. Određivanje optimalnog sadržaja vode u peletima, koji varira ovisno o vrsti biomase, potrebno je za proizvodnju peleta visoke stabilnosti i trajnosti, kao i za odabir odgovarajućih uvjeta skladištenja.

Skladištenje je jedna od bitnijih stavki vezana za drvene pelete. Pravilno skladištenje peleta može očuvati njihovu trajnost odnosno kvalitetu. Pravilnim skladištenjem peleta smanjuje se gubitak energetske vrijednosti peleta koji može nastati zbog povećane količine sadržaja vode.

U ovom radu analizirat će se mehanička izdržljivost peleta hrvatskih proizvođača nakon izlaganja oštrim mikroklimatskim uvjetima. Oštri mikroklimatski uvjeti negativno će utjecati na

svojstva peleta, a u ovom radu analizirat će se utjecaj povećane vlage na dimenzijsku stabilnost i mehaničku izdržljivost peleta. Mehanička izdržljivost mjerit će se pomoću dva uređaja: pelet-tester i ligno-tester. Dobiveni rezultati mehaničke izdržljivosti uspoređivat će se ENplus certifikacijom kod koje donja granica mehaničke izdržljivosti iznosi 97,5 % za A2, odnosno 98,0 % za A1 klasu

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

2.1. Biomasa

Biomasa se sastoji od brojnih proizvoda biljnog i životinjskog svijeta, kao što su drvo, grane, grančice, kora i piljevina iz šumarstva, životinjski otpad i ostaci sa stočnih farmi te komunalni i industrijski otpad. Biomasa se smatra najvažnijim izvorom obnovljive energije u Europi i ima golem potencijal za daljnji razvoj koji treba slijediti neka osnovna načela, kao što su visoka učinkovitost, konkurentnost i održivost. Iskustva su pokazala da korištenje biomase za proizvodnju toplinske energije na najbolji način zadovoljava navedene principe. Biomasa za proizvodnju topline može se koristiti u malim jedinicama, poput pojedinačnih kuća u projektima ugovorne prodaje topline u područnim sustavima grijanja te u industriji. U svakom slučaju, kvalitetna ponuda biomase, bez obzira da li je to drvo za ogrjev, drvna sječka ili obrađeno drvo, presudna je za brzi rast toga tržišta. (Šegon i sur. 2014).

Prema Labudović i sur. (2012) biomasa se prema podrijetlu može svrstati u tri grupe. Razlikuje se šumska ili drvna biomasa, nedrvna biomasa i biomasa životinjskog podrijetla, a prema konačnom pojavnom obliku razlikuju se:

- biogoriva u čvrstom stanju (ogrjevno drvo, pelet, briket, drvna sječka itd.)
- biogoriva u tekućem stanju (biodizel, bioetanol, biometanol)
- biogoriva u plinovitom stanju (bioplin, plin iz rasplinjavanja biomase, deponijski plin)

Šumska biomasa se sastoji od ostataka i otpada koji nastaju tijekom redovnog gospodarenja šumama. U biomasu iz drvne industrije spadaju ostaci piljenja, drobljenja itd. te može biti korištena kao gorivo u kotlovima ili kao sirovina za proizvodnju briketa, peleta i sl. Takva biomasa kvalitetnija je od šumske biomase jer ima niži početni sadržaj vode pa je nije potrebno uvelike sušiti kao šumsku biomasu te je povoljnija s ekonomskog gledišta (troškovi transporta). Biomasa iz poljoprivrede uključuje slamu, stabljike kukuruza, sjeme i ostatke voća, ostatke proizvodnje ulja i mnoge dr. Životinjski otpad uključuje stajski gnoj, izmet te drugi otpad koji nastaje mesarskom obradom stoke. Energetski usjevi se posebno uzgajaju za upotrebu kao gorivo i nude visok prinos po hektaru uz razmjerno niska ulaganja. Glavna prednost energetskih usjeva je korištenje otpadnih

voda, upotreba gnojiva i sedimenata (vegetacijski filtri), biološka raznolikost i izbjegavanje viškova poljoprivredne proizvodnje (Šegon i sur. 2014).

Prerada šumske biomase u oblik pogodan za korištenje složen je zadatak. Osim radnih strojeva koji djeluju na usitnjavanju i ugušćivanju biomase, bitan parametar je i rukovanje tijekom procesa kao npr. transport, skladištenje, premještanje i sušenje. Izradba gorivog drva odvija se dijelom u industrijskom pogonu, a dijelom na otvorenom prostoru sastojine. Kod izrade šumske biomase razlikuju se tri operacije: sječa i sakupljanje, peletiziranje i transport proizvedenog energenta (Risović i sur. 2008).

2.2. Peletiranje

Drvni peleti (slika 1) su proizvod od sušenog, prešanog usitnjenog drva ili piljevine, valjkastog oblika, homogeniziranih dimenzija, proizvedeni u postrojenjima za proizvodnju peleta često u sklopu pilana. Postoji mogućnost proizvodnje peleta od kore drveta, papira, sortiranog kućanskog smeća, poljoprivrednih kultura, šumskih ostataka, brzorastućeg energetskog drva i drvnog otpada. Proizvodnjom peleta se ostvaruje dodana vrijednost iskorištavanja ostataka drva u pilani te industrijskih ostataka drva iz drvoprerađivačke industrije (Šegon i sur. 2014). Drvni pelet je obnovljivo gorivo s neutralnom emisijom ugljikovog dioksida (Wahlund i sur. 2004, prema: Pirc Barčić i sur. 2020).

Pirc Barčić i sur. (2020) navode da su drvni peleti prema ENplus standardu definirani kao biogorivo oblikovano u cilindričnom obliku, a najčešćih duljina između 3,15 do 40 mm i s promjerom od 6 ili 8 mm.



Slika 1. Drvni peleti

Izvor: <https://www.rotochopper.com/resources/rotochoppers-solutions-for-biomass-wood-pellet-production/> (Pristupljeno: 14.8.2022.)

Japhet i sur. (2019) navode da je glavna svrha peletiziranja smanjiti volumen i time povećati nasipnu gustoću. Nakon tog procesa potrebno je razmotriti dva aspekta kvalitete. Prvi je da pelet mora ostati čvrst sve dok ne posluži svojoj svrsi, a drugi je da se pelet mora dobro ponašati kao gorivo.

Peletiranje se sastoji od ekstruzije sirove biomase kroz prstenastu ili ravnu matricu s rupama od 6 ili 8 mm pod pritiskom dvaju ili više valjaka. Trenje između biomase i stijenki rupa rezultira povećanim tlakom i temperaturom što pomaže ligninu da poveže čestice biomase (Ungureanu i sur. 2018).

Prema Obernberger i Thek (2010) najčešće sirovine koje se koriste za proizvodnju peleta su: strugotine, piljevina i drvena prašina. Strugotine i drvena prašina su obično niskog sadržaja vode i stoga idu u fino mljevenje kao početni proces peletiranja. Piljevina je obično vlažna i treba je osušiti prije mljevenja. Proces peletiranja obično se sastoji od četiri ili pet koraka ovisno o tome koristi li se strugotina ili piljevina. Nakon proizvodnje peleta potreban je skladišni prostor za pelete.

Peleti se proizvode u preši koja se sastoji od matrice i potisnih valjaka koji potiskuju sirovinu za peletiranje da prolazi kroz otvore matrice. Prilikom potiskivanja sirovine kroz otvore matrice stvara se visoki povratni tlak i temperatura. Sile koje se javljaju prilikom samog procesa peletiranja u pelet preši ključne su za optimiziranje procesa peletiranja (Wolfgang i sur. 2012).

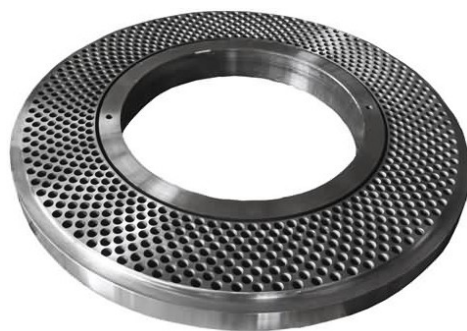
Prema Brkić i sur. (2012) postoje dva tipa matrica, a to su prstenasta matrica (slika 2) i ravna matrica (slika 3). U slučaju ravne matrice, valjci se okreću, a slučaju prstenaste matrice, elektromotori pokreću i rotiraju samu matricu dok valjci ostaju fiksni (Dujmović i sur. 2022).

Prstenaste matrice se obično koriste u komercijalnim postrojenjima zbog njihove visoke propusnosti, dok ravne matrice pokazuju veću robusnost s ulaznom biomasom i općenito zahtijevaju manja kapitalna ulaganja od prstenastih matrica (Jackson i sur. 2016, prema: Dujmović i sur. 2022). Osim valjaka i matrice, drugi temeljni dijelovi svake pelet preše jesu elektromotor koji pogoni valjak ili matricu, obično putem remenskog prijenosa, rezni nož koji skraćuje beskonačnu nit peletiziranog materijala na željenu dužinu, i pogonsko vratilo (Dujmović i sur. 2022).



Slika 2. Prstenasta matrica

Izvor: <https://www.generaldies.com/en/ricambi/dies/> (Pristupljeno: 17.8.2022.)



Slika 3. Ravna matrica

Izvor: <https://www.bobshellzjkhx.com/ring-die-flat-die/1714.html> (Pristupljeno 17.8.2022.)

2.3. Sadržaj vode sirovine za izradu peleta

Voda ima ključnu ulogu u procesu peletiranja i zajedno sa sadržajem lignina je jedan od najbitnijih parametara koji određuju otpornost peleta (Samuellsson 2009).

Prema Obernberger i Thek (2010) sadržaj vode potreban za peletiranje u osnovi ovisi o tehnologiji peletiranja, ali i o sirovini kao i o korištenim materijalima, ako je sadržaj vode u sirovini previsok, potrebno ju je osušiti, što uglavnom otvara pitanja o ekonomičnosti procesa. Raspon sadržaja vode za sirovinu neposredno prije prešanja drvnih peleta iznosi između 8 i 12 %. Kada su vrijednosti sadržaja vode ispod tih vrijednosti sila trenja je toliko velika da onemogućuje peletiranje, a kada su vrijednosti sadržaja vode previsoke dolazi do dimenzionalne nestabilnosti peleta. Kondicioniranjem sirovine se postiže ravnomjerniji raspored sadržaja vode i bolje povezivanje između čestica.

S obzirom na sadržaj vode sirovina se može podijeliti u dvije grupe: sirovina koja nije osušena na željeni sadržaj vode te kao takva nije spremna za peletiranje i sirovina koja je osušena na željeni sadržaj vode i spremna je za peletiranje (Dujmović i sur. 2022).

Prema Samuelsson (2009) sadržaj vode bio je čimbenik koji je utjecao na nasipnu gustoću najviše kod peleta koji su izrađeni iz piljevine crnogoričnog drva.

Grover i Mishra 1996 (prema: Kaliyan i Vance Morey 2009) navode da voda djeluje i kao vezivno sredstvo i kao lubrikant. Voda pomaže u razvoju van der Waalsovih sila povećanjem površine kontakta između čestica. Sadržaj vode smanjuje temperaturu na kojoj se plastificira lignin što pospješuje vezivanje čestica (Stelte i sur. 2011, prema: Whittaker i Shield 2017). Iznad 20 % sadržaja vode utvrđeno je da visoki pritisak pare zbog visokih temperatura uzrokuje smanjenje zgušnjavanja sirovine te se vodikove veze između polimera drva zamjenjuju s molekulama vode, a rezultat je slabiji pelet (Filbakk i sur. 2011, prema: Whittaker i Shield).

Li i Liu 2000 (prema: Tumuluru i sur. 2010) istraživali su peletiranje i briketiranje kore drveća, pilanskog otpada, strugotina, slame lucerne, svježe lucerne i trave i otkrili su da je optimalan sadržaj vode od približno 8 % preporučen za proizvodnju briketa ili peleta visoke gustoće. Također su preporučili da za dobru kvalitetu (u smislu dobre gustoće i dugotrajnosti) potreban je sadržaj vode od 5 do 12 %. Također se navodi da peleti ili briketi postaju lomljivi u samo nekoliko dana ako je sadržaj vode manji od 4 %, zbog apsorpcije vlage iz okoline.

U strukturi biomase koja je prikupljena za izradu peleta voda uvijek zauzima određeni udio koji se kreće od 6 do 60 %. Prekoračenjem gornje granice biomasa nije pogodna za rad, jer je za odstranjivanje navedene vode i svođenje u željene granice potrebno utrošiti značajnu količinu energije. Takva biomasa nije pogodna ni za duže skladištenje, jer dolazi do njene biološke razgradnje. Smatra se da gornja granica sadržaja vode pri kojoj se biomasa može peletirati iznosi 35 % (Janić i sur. 2013).

Neka istraživanja potvrđuju pozitivan učinak sadržaja vode na kvalitetu peleta dok neki iznose negativan učinak povećanja sadržaja vode na kvalitetu peleta. Npr. Serrano i sur. (2011) (prema: Pradhan i sur. 2018) koristili su prešu s prstenastom matricom kapaciteta 100 kg h⁻¹ za peletiranje slame ječma i dobili vrijednosti mehaničke izdržljivosti veće od 90 % kod sadržaja vode slame od 17 do 23 %. Suprotno tome kod sadržaja vode između 7 i 17 % dobiveni su kratki

peleti dimenzija od 15 do 20 mm duljine i mehaničke izdržljivosti između 60 i 90 %. Daljnjim ispitivanjem nisu proizvodili pelete sa sadržajem vode slame manjim od 8 % i navode da voda pogoduje vezivanju čestica do određene granice. Kada je sadržaj vode slame bio veći od 23 % peletiranje postaje otežano i rezultira mekanim peletima sa konačnim sadržajem vode peleta većim od standardnih 10 %.

Demirbas 2004 (prema: Tumuluru i sur. 2010) je zaključio da povećanjem sadržaja vode smrekove piljevine sa 7 na 15 % raste mehanička izdržljivost peleta.

Colovic i sur. 2010 (prema: Muramatsu i sur. 2015) su utvrdili da voda može djelovati kao lubrikant i smanjiti trenje između matrice i valjka što negativno utječe na mehaničku izdržljivost peleta. Filbakk i sur. 2011 (prema: Deng i sur. 2019) su utvrdili pozitivnu korelaciju sadržaja vode i izdržljivosti peleta između 7 i 15 % za škotski bor. Lee i sur. 2013 (prema: Deng i sur. 2019) su također otkrili pozitivnu korelaciju između sadržaja vode i mehaničke izdržljivosti peleta za drvo tulipanovca.

Suprotno prethodnim istraživanjima Nielsen i sur. 2009 (prema: Deng i sur. 2019) su utvrdili negativnu korelaciju između sadržaja vode od 5 do 14 % i mehaničke izdržljivosti za drvo bukve, a Carone i sur. 2011 (prema: Deng i sur. 2019) su utvrdili negativnu korelaciju između sadržaja vode i mehaničke izdržljivosti za ostatke rezidbe masline. Kaliyan i sur. 2009 (prema: Deng i sur. 2019) su zaključili da se čvrstoća i mehanička izdržljivost peleta povećava povećanjem sadržaja vode sve do optimalne vrijednosti s tim da je ovo vrijedilo za izradu peleta.

Što se tiče tehnologije izgaranja, sadržaj vode peleta je važan za ogrjevnju vrijednost, učinkovitost ložišta i temperaturu izgaranja. Kalorična vrijednost, učinkovitost ložišta i temperatura izgaranja opadaju s porastom sadržaja vode. Sadržaj vode u drvnim peletima postavljen je na najviše 10 % prema prEN 14961-2 za sve klase (Oberberger i Thek 2010).

2.4. Mehanička izdržljivost peleta

Mehanička izdržljivost je sposobnost zgnusnutih gorivnih jedinica biomase (npr. briketa, peleta) da ostanu netaknuti, npr. otpornost na habanje i udarce tijekom rukovanja i transporta. Mehanička izdržljivost jedan je od najvažnijih parametara u proizvodnji peleta. Niska mehanička izdržljivost može prouzrokovati visok udio finih čestica što negativno utječe na kvalitetu peleta, ali i zadovoljstvo samog kupca. Udio finih čestica također nije pogodan s ekološke strane gledišta. Velika količina finih čestica mijenja nasipnu gustoću i povećava gubitke tokom transporta, kao i emisije prašine tijekom rukovanja. Štoviše, fine čestice mogu prouzročiti eksplozije tijekom skladištenja i rukovanja (Obernberger i Thek 2010).

Niska mehanička izdržljivost peleta može prouzrokovati smetnje unutar sustava za dovod peleta i povećane emisije drvene prašine (Ungureanu i sur. 2016).

Visoka mehanička izdržljivost peleta predstavlja prednost kod transportiranja peleta krajnjem kupcu ili kod transportiranja u proizvodnom pogonu. Fine čestice mogu se nakupiti tijekom transporta i u nekim slučajevima dovesti do eksplozije prašine. Fine čestice također nastaju kada se peleti puštaju s transportera. Kako fine čestice imaju visoku sklonost upijanju vlage moguće je rizik od gljivičnog napada kod peleta. Prosijavanje peleta prije isporuke kupcu smanjit će problem s finim česticama u određenoj mjeri. Fine čestice odnosno drvena prašina predstavljaju rizik sa zdravstvenog gledišta (Lehtikangas 2000).

Mehanička izdržljivost definira se indeksom izdržljivosti, a on označava sposobnost zgnusnutog materijala da ostane netaknut kada se s njim rukuje tijekom skladištenja i transporta. Mehanička izdržljivost može se prema tome definirati i kao otpornost peleta na kidanje. Mehanička izdržljivost ispituje se stavljanjem peleta u metalnu zatvorenu posudu koja se okreće kako bi peleti mogli strugati jedni od druge. Količina prašine koja nastane označava izdržljivost peleta, što je veća količina prašine manja je mehanička izdržljivost peleta (Kaliyan i Vance Morey 2009).

Prema Oveisi-Fordiie (2011) trajnost peleta je važno svojstvo u industriji i trgovini drvnim peletima. Pelet s niskom mehaničkom izdržljivošću može prouzrokovati poteškoće u skladištenju i otpremi, kao i zdravstvene probleme i probleme s okolišem jer je sklon lakom raspadanju bilo

zbog apsorpcije vlage ili zbog pada, ili abrazije između peleta. Što je veća mehanička izdržljivost peleta manja je vjerojatnost da će se pelet lomiti.

Trajnost ili otpornost na abraziju općenito se definira kao sposobnost podnošenja habanja, propadanja i gubitka materijala kontinuiranom uporabom; otpornost na promjenu izvornog izgleda; ili sposobnost otpornosti na vremenske uvjete ili kemijsko oštećenje (Deng i sur 2019).

Pradhan i sur. (2018) navode da lignin na višim temperaturama prisutan u biomasi omekšava i djeluje kao vezivno sredstvo. Veći sadržaj lignina u biomasi rezultira izdržljivijim peletima jer lignin djeluje kao vezivno sredstvo. Međutim Bradfield i Levi 1984 (prema: Pradhan i sur. 2018) navode da kada se sadržaj lignina i ekstraktivnih tvari poveća iznad 34 % mehanička izdržljivost peleta pada. Prema Souza i sur. (2021) peleti izrađeni iz paulovnije i kalifornijskog bora imali su veću mehaničku izdržljivost i manje praznog prostora između čestica od peleta izrađenih iz drva eukaliptusa kod sadržaja lignina između 26.4 i 34.2 %.

Kao što je već opisano, sadržaj vode ima veliki utjecaj na mehaničku izdržljivost peleta, a osim sadržaja vode postoji još nekoliko parametara koji utječu na mehaničku izdržljivost peleta kao što su sadržaj lignina, gustoća čestica, veličina čestica, sadržaj škroba, tlak prešanja, skladištenje itd. Esteban i sur 2006 (prema: Obernberger i Thek 2010) su ispitivali pelete izrađene iz iste sirovine, ali različite finoće čestica i nisu utvrdili povezanost gustoće čestica s mehaničkom izdržljivošću peleta.

Skladištenje peleta utječe na mehaničku izdržljivost peleta. Peleti tijekom skladištenja mogu upiti nepotrebnu vodu koja im može narušiti kvalitetu stoga uvjeti skladištenja uvelike utječu na mehaničku izdržljivost peleta. Drvni peleti su higroskopni i tijekom skladištenja apsorbiraju vlagu iz vlažne okoline. Apsorpcija vlage uzrokuje volumetrijsku ekspanziju koja dovodi do pada mehaničke izdržljivosti peleta (Lee 2021).

Samuellsson i sur. 2009 (prema: Ungureanu i sur. 2018) tvrde da su drvni peleti osjetljivi na upijanje vlage iz okoline stoga je vrlo važno osigurati vodonepropusne skladišne prostore.

Prema Lee i sur. (2020) povećanje sadržaja vode peleta s 5 na 15 % uzrokovalo je smanjenje mehaničke izdržljivosti peleta s tim da su peleti koji su bili navlaženi tekućom vodom imali smanjenje mehaničke izdržljivosti za 10 % dok su peleti koji su bili skladišteni u vlažnoj okolini imali smanjenje mehaničke izdržljivosti za 5 %.

Prema Lee (2021) nakon mjesec dana skladištenja pri relativnoj vlažnosti zraka od 90 % peleti koji nisu bili kondicionirani imali su mehaničku izdržljivost jednaku 0 dok su peleti koji su bili kondicionirani imali mehaničku izdržljivost od 87 %.

Skladištenje peleta u vlažnoj okolini uzrokovat će smanjenje mehaničke izdržljivosti peleta u satima ili tjednima ovisno o tome kreće li se vlažni zrak koji okružuje pelete ili stagnira. Prema tome drvene pelete treba transportirati do krajnjih odredišta u relativno kratkom roku ili treba omogućiti pravilno skladištenje koje neće uzrokovati značajan pad mehaničke izdržljivosti peleta odnosno skladištenje s optimalnom vlagom zraka (Lee 2021).

Graham i sur. (2017) proučavali su mehaničku izdržljivost peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva koji su bili skladišteni vani 10 mjeseci u natkrivenoj terasi. Nakon 6 mjeseci skladištenja takvih peleta primijetili su da je većina peleta imala pukotine. Sadržaj vode peleta koji su bili na vrhu hrpe povećao se sa 10 na 12 % i mehanička izdržljivost im je pala za 40 %.

Drvni peleti prozračeni vlažnim zrakom mogu biti skloniji razgradnji od peleta u ustajalom okruženju. Stoga je preporučljivo odvlažiti vlažan zrak ako je to moguće u skladištima na vrijednost ispod 50 % relativne vlage zraka kako bi se smanjila mogućnost upijanja vlage. Kod skladištenja u vlažnim okruženjima koja stalno imaju relativnu vlažnost zraka iznad 80 %, trajnost peleta značajno se smanjuje zbog upijanja vlage (Lee 2021).

2.4.1. Uređaji za određivanje mehaničke izdržljivosti peleta

U ovom radu za određivanje mehaničke izdržljivosti korišteni su pelet-tester i ligno-tester, te je način njihovog djelovanja opisan u poglavlju 4. Ligno-tester u usporedbi s pelet-testerom omogućava brže dobivanje rezultata, lakše je prenosiv, zahtjeva manji uzorak i lakši je za manipuliranje materijalom. Prema Oveisi-Fordiie (2011) Za mjerenje pomoću pelet-testera postoji nekoliko nedostataka:

- Usko područje rezultata – mjerenje mehaničke izdržljivosti kod peleta niske kvalitete ne bi bilo pouzdano ili realno. Temmerman i sur. 2006 (prema: Oveisi-Fordiie 2011) proveli su istraživanje na jedanaest vrsta peleta na pelet-testeru. Peleti su bili drukčijih dimenzija i bili su prikupljeni iz jedanaest različitih država.

Rezultati njihovog istraživanja pokazuju da su sva mjerenja bila u rasponu od 91 do 99 %.

- Količina uzorka – uzorak od 500 g za svako mjerenje predstavlja problem za ispitivanje u laboratoriju, ako ispitivanje nije moguće provesti u industrijskom pogonu.
- Potrebno vrijeme testiranja – interval od 10 minuta predstavlja problem u industrijskim postrojenjima gdje se preferiraju metode kraćeg vremenskog intervala zbog same dinamike procesa.

Mjerenje mehaničke izdržljivosti pomoću ligno-testera ima veću varijabilnost rezultata i to utječe na ponovljivost mjerenja mehaničke izdržljivosti. Ligno-tester je složeniji stroj u smislu rada i strukture te zahtjeva stroge uvjete zbog strujanja zraka što može predstavljati problem u industrijskim pogonima (Temmerman i sur 2006, prema: Oveisi-Fordiie 2011).

Oveisi-Fordiie (2011) opisala je još dva načina za mjerenje mehaničke izdržljivosti, a to su mjerenje mehaničke izdržljivosti pomoću dural testera i pomoću testa padom.

Test pada namijenjen je mjerenju količine prašine u situaciji koja simulira stvarne uvjete. Peleti se slobodno ispuštaju s određene visine, zatim se nastala prašina uklanja, a preostali nerazlomljeni peleti se važu kako bi se odredio postotak odlomljenih čestica. Uzorak se može ispustiti kao jedan pelet ili više peleta zajedno.

Jedan od uređaja za mjerenje mehaničke izdržljivosti koji se često spominje u literaturi naziva se dural tester (slika 4) tj. skraćeno od “durability tester”. Njegov prototip dizajniran je u Agricultural Process Engineering laboratoriju (Larsen i sur. 1996, prema: Oveisi-Fordiie 2011). U dural tester stavlja se uzorak od 100 g u vremenskom intervalu od 30 sekundi s brzinom okretaja elektromotra od 1615 okretaja u minuti. Kod pelet-testera koji je korišten u ovom radu uzorak od 500 g testiran je u vremenskom intervalu od 10 minuta s 50 okretaja u minuti.

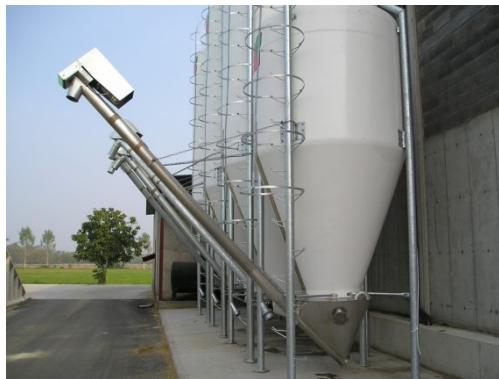


Slika 4. Dural tester

Izvor: Oveysi-Fordiie (2011)

2.5. Skladištenje i transport peleta

Jedna od bitnih stavki vezana za pelete je njihovo skladištenje. Pravilno skladištenje peleta može očuvati njihovu trajnost odnosno kvalitetu. Pravilnim skladištenjem peleta smanjuje se gubitak energetske vrijednosti peleta koji može nastati zbog povećane količine sadržaja vode. Skladištenje peleta vrši se u halama i silosima tako da se može osigurati cjelogodišnja opskrba peleta za krajnje potrošače. Drvni peleti se skladište u zatvorenim prostorima i suhim uvjetima jer brzo upijaju vlagu iz zraka.. Nakon proizvodnje, peleti su skladišteni u proizvodnim pogonima prije nego što se transportiraju kupcima. „Veliki“ potrošači peleta, kao što su gradska poduzeća za grijanje i stambene zadruge, obično skladište svoje pelete u velikim silosima (slika 5), a „manji“ korisnici peleta ih skladište u svojim domaćim skladištima ili manjim silosima (Alakoski i sur. 2016).



Slika 5. Silos za skladištenje peleta

Izvor: http://panontech.com/?page_id=91 (Pristupljeno: 14.8.2022.)

Vrijeme skladištenja peleta obično varira ovisno o potrebi grijanja. U vrijeme ljeta, kada je potreba za grijanjem mala, peleti se skladište na duže vrijeme u proizvodnim pogonima i međuskladištima, a u vrijeme zime potreba za peletima se povećava te se ona skladište na kraće vrijeme u proizvodnim pogonima i međuskladištima. U usporedbi s drvnom sječkom, peleti zauzimaju tek četvrtinu skladišnog prostora tako da obično svaka privatna kuća ima dovoljno prostora za pohraniti godišnju zalihu peleta koji mogu biti uskladišteni u suhom podrumu (Šegon i sur. 2014).

Potražnja za drvnim peletima u stalnom je porastu diljem svijeta. Drvni peleti imaju neutralnu emisiju ugljičnog dioksida i smatraju se obnovljivim. Dobro razvijena transportna logistika za drvene pelete ključ je njihove široke upotrebe diljem svijeta. Drvni peleti se distribuiraju u potrošačkim (slika 6) i velikim vrećama, kamionima cisternama, kontejnerima, željezničkim i pomorskim prometom ovisno o potrebama i zahtjevima krajnjeg korisnika. Od same pojave peleta za dobivanje toplinske energije, isporuke peleta putem željezničkog, pomorskog i preookeanskog prometa na dugim relacijama postale su dominantan način transporta. Peleti se do krajnjeg korisnika izravno distribuiraju vlastitim transportnim i distribucijskim sustavom proizvođača ili ih do krajnjeg kupca distribuira posrednik. U mnogim slučajevima oba su načina u upotrebi. Važan aspekt transporta do posrednika kao i do krajnjeg kupca je sadržaj vode na koji treba posebno obratiti pažnju. Kontakt s vodom treba eliminirati tijekom transporta kako peleti ne bi upili vodu i kako im se zbog toga ne bi narušila kvaliteta (Alakoski i sur. 2016).



Slika 6. Potrošačke vreće za pelete

Izvor: <https://www.lavafires.co.za/product/wood-pellets-15kg-jhb/> (Pristupljeno 15.8.2022.)

2.6. Klase peleta prema kvaliteti

Klase peleta prema kvaliteti definirane su prema ENplus certifikacijskoj shemi koja se temelji na normi HRN EN ISO 17225-2 i nazivaju se: ENplus A1, ENplus A2 i ENplus B.

U tablici 1. prikazana su svojstva peleta i granične vrijednosti po klasama. Mehanička izdržljivost peleta za klasu Enplus A1 ne smije iznositi manje od 98 %, za Enplus A2 i Enplus B manje od 97,5 %. Sadržaj vode peleta za sve navedene klase ne smije biti veći od 10 %.

Tablica 1. Granične vrijednosti najvažnijih parametara peleta

Svojstvo	Jedinica	Enplus A1	Enplus A2	Enplus B
Promjer	mm	6 ± 1 ili 8 ± 1		
Duljina	mm	3,15 < L ≤ 40		
Mokrina (Vlažnost)	w-%	≤ 10		
Sadržaj pepela	w-%	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0
Mehanička Izdržljivost	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		
Ađitivi	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		

3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja ovog rada je odrediti kakav utjecaj povećana vlaga kao rezultat oštrih mikroklimatskih uvjeta ima na pelete. Istraživat će se kakav utjecaj povećani sadržaj vode peleta ima na mehaničku izdržljivost peleta i dimenzijsku stabilnost. Uspoređivat će se mjerenje mehaničke izdržljivosti na pelet-testeru i ligno-testeru. Vrijednosti mehaničke izdržljivosti i dimenzija (promjer) uspoređivat će se s ENplus certifikacijom.

4. MATERIJALI I METODE

Za istraživanje korišteni su peleti deset različitih proizvođača iz Republike Hrvatske. Peleti su korišteni za određivanje utjecaja sadržaja vode na njihovu mehaničku izdržljivost i dimenzijsku stabilnost. Povećanje sadržaja vode postignuto je podvrgavanjem uzoraka peleta u klima komori gdje je temperatura iznosila 30 °C, a relativna vlaga zraka 90 %.

Peleti svakog proizvođača stavljeni su u klima komoru. Na slici 7 prikazano je navlaživanje (kondicioniranje) uzoraka peleta u klima komori. Peleti su prije stavljanja u klima komoru bili prosijani sitom okruglih otvora 3,15 mm (slika 8) kako bi se odstranila početna drvena prašina. Peleti su bili raspoređeni u 4 grupe po 2 kg. Grupe su vađene nakon 1 h, 2 h, 4 h i 8 h. Nakon svakog vađenja određivao se sadržaj vode, mjerena je duljina i promjer za određivanje dimenzijske stabilnosti te se određivala mehanička izdržljivost na dva uređaja koja će kasnije biti detaljno opisana. Svaka grupacija peleta raspoređena je u tri posude, tako se smanjila debljina sloja peleta i omogućeno je da peleti ravnomjernije upijaju vlagu. Nakon svakog vađenja, peleti iz tri posude pomiješani su u jednu. Za dimenzijsku stabilnost korišteno je deset uzoraka peleta za svakog proizvođača duljine 10 ± 1 mm i promjera 6 ± 1 mm koji su također bili podvrgnuti režimu u klima komori. Nakon svakog vađenja mjerena je duljina i promjer peleta.



Slika 7. Navlaživanje (kondicioniranje) uzoraka peleta u klima komori



Slika 8. Prosijavanje peleta u situ okruglih otvora 3,15 mm

4.1. Određivanje sadržaja vode

4.1.1. Postupak

Sadržaj vode određivan je prema normi HRN ISO 18314-3:2015. Nakon svakog vađenja iz klima komore određivan je sadržaj vode te je određen i početni sadržaj vode prije stavljanja uzoraka u klima komoru. Za svako vađenje i za početni sadržaj vode izvršena su tri mjerenja. Prazne staklene posudice s poklopcem sušene su u sušioniku na 103 ± 2 °C i ostavljene da se ohlade na sobnu temperaturu. Nakon što su se posudice ohladile u eksikatoru, izvagane su na analitičkoj vagi (slika 9).



Slika 9. Analitička vaga

Nakon vaganja posudica stavljeni su uzorci od $1 \pm 0,1$ g za prva 3 mjerenja početnog sadržaja vode, a zatim su se nakon svakog vađenja uzoraka iz klima komore vršila 3 mjerenja. Kada su izmjerene sve mase nakon završnog vađenja od 8 h staklene posudice s otklopljenim poklopcem stavljene su na metalni nosač koji se stavlja u sušionik (slika 10). Uzorci peleta sušili su se u sušioniku u vremenskom intervalu od 15 h. Prema ranije navedenoj normi uzorke je potrebno usitniti na veličinu od 1 mm, ali s obzirom na duljinu sušenja od 15 h to nije bilo potrebno pa su korišteni razlomljeni peleti do propisane mase. Po završetku sušenja u sušioniku posudice su poklopljene i raspoređene u eksikator (slika 11) da se ohlade na sobnu temperaturu. Nakon što su se posudice ohladile izvagane su s poklopcem i uzorkom na analitičkoj vagi s točnošću od 0,1 mg.



Slika 10. Uzorci u sušioniku



Slika 11. Uzorci u eksikatoru

4.1.2. Proračun

Za mjerenje sadržaja vode korištena je sljedeća formula:

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

gdje je:

m_1 – masa u gramima prazne posudice s poklopcem

m_2 – masa u gramima posudice i poklopca s uzorkom prije sušenja

m_3 – masa u gramima posudice i poklopca s uzorkom nakon sušenja

m_{ad} – sadržaj vode uzorka izražen postotno

Rezultat svakog mjerenja zaokružen je na dvije decimale.

4.2. Određivanje mehaničke izdržljivosti

Mehanička izdržljivost peleta u ovom radu određivana je pomoću ligno-testera i pelet-testera (metoda rotirajuće posude). U potpoglavlju 4.2.1. opisano je određivanje mehaničke izdržljivosti peleta prema normi HRN EN ISO 17831-1:2016 odnosno prema pelet-testeru. U potpoglavlju 4.2.2. opisano je određivanje mehaničke izdržljivosti prema ligno-testeru.

4.2.1. Određivanje mehaničke izdržljivosti prema normi HRN EN ISO 17831-1:2016

U uređaju za određivanje mehaničke izdržljivosti peleta (slika 12) uzorci su podvrgnuti kontroliranom sudaranju između samih peleta i ploha rotirajuće kutije uređaja.



Slika 12. Uređaj za određivanje mehaničke izdržljivosti peleta (pelet-tester)

Za ispitivanje uzoraka u rotirajućoj posudi bilo je potrebno 1500 g peleta za svako ispitivanje za svakog proizvođača posebno jer su se vršila 3 mjerenja s uzorcima od 500 ± 10 g. Za određivanje mehaničke izdržljivosti kod početna 3 uzorka potrebno je prosijati pelete u situ okruglih otvora 3,15 mm. Ostali uzorci koji se stavljaju u klima komoru su također prosijani navedenim sitom te ih nakon vađenja iz klima komore nije potrebno dodatno prosijati. Peleti su vagani s vagom točnošću 0,1 g (slika 13) te su kao takvi stavljeni u rotirajuću kutiju uređaja (pelet-testera), uređaj se zatim rotira 500 puta frekvencijom 50 ± 2 okretaja u minuti u trajanju od cca 10 min. Nakon što je uređaj obavio rotiranje uzorci se izvade iz kutija te se ručno prosijaju navedenim sitom. Sav ostatak peleta koji je ostao na situ se izvaže i računa u kojem postotku su peleti ostali čitavi.

Računanje se odvija prema sljedećoj formuli:

$$DU = \frac{m_A}{m_E} \times 100$$

Gdje je:

DU – mehanička (otpornost) trajnost, mrvljivost - (%)

m_E – masa prosijanog uzorka prije izlaganja rotaciji u pelet-testeru – (g)

m_A – masa prosijanog uzorka nakon izlaganja u pelet-testeru – (g)

Rezultat se izračunava na dvije decimale, a konačni rezultat zaokružuje se na najbližu postotnu vrijednost od 0,1 % s tim da su rezultati u ovom radu zaokruženi na dvije decimale u programu Microsoft Excel.



Slika 13. Vaganje prosijanih peleta

4.2.2. Određivanje mehaničke izdržljivosti s ligno-testerom

Ligno-tester (slika 14) koristi se za određivanje mehaničke izdržljivosti ili količine finog materijala drvnih peleta. U ligno-testeru peleti su izloženi udarima uzrokovanim strujanjem zraka koji djeluje pod određenim tlakom. Peleti i čestice peleta se sudaraju jedni s drugim i sa stijenkama komore ligno-testera. Ispitna komora ima piramidalni oblik, a izvor strujanja zraka je ispod komore. Uzorak od 100 ± 10 g se prosije i stavlja u komoru. (Ungureanu i sur. 2016).



Slika 14. Ligno-tester

U ovom ispitivanju rađena su tri mjerenja po vađenju uzoraka iz klima komore i tri mjerenja za početnu vrijednost mehaničke izdržljivosti prije stavljanja uzoraka u klima komoru, sveukupno 15 mjerenja po 100 ± 10 g za svakog proizvođača. Peleti se prije stavljanja u komoru uređaja moraju prosijati sitom okruglih otvora 3,15 mm. Nakon što je ligno-tester završio testiranje u vremenskom intervalu od 60 s pod odabranim tlakom od 70 mbar-a uzorcima je određena masa na vagi s točnošću 0,1 g (slika 15). Uzorak nije potrebno dodatno prosijavati nakon ispitivanja na uređaju kao kod prethodne metode rotirajuće posude jer komora ligno-testera sadrži otvore od 3,15 mm koji odvajaju sitne čestice peleta od ostatka testiranog uzorka. Ostatak testnog uzorka potrebno je izvagati i izračunati u kojem su postotku peleti ostali čitavi. Rezultat se dobiva prema istoj formuli kao kod prethodne metode.



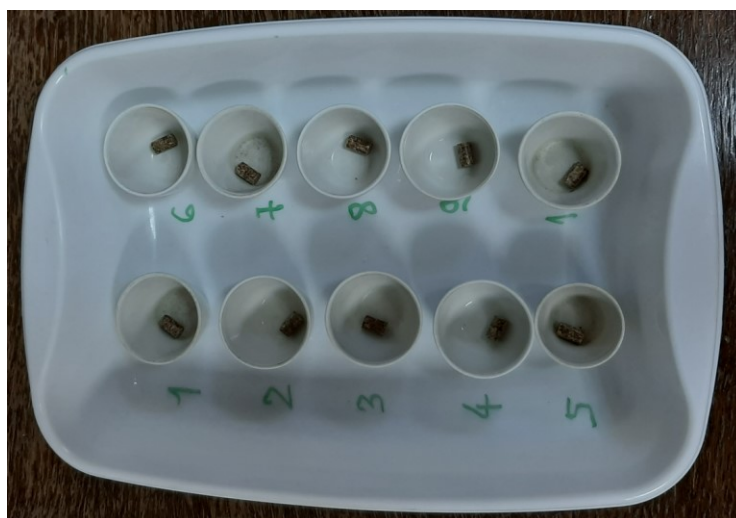
Slika 15. Vaganje uzoraka za ispitivanje na ligno-testeru

4.3. Određivanje dimenzijske stabilnosti peleta

Za potrebe određivanja dimenzijske stabilnosti peleta uzeto je 10 uzoraka za svakog proizvođača. Uzorci se uzimaju prema normi HRN EN ISO 18135:2017, a iz tog uzorka uzima se poduzorak za mjerenje duljine i promjera po normi HRN EN ISO 14780:2017. Za potrebe unificiranja dimenzija peleta korištena je kružna pila s 96 zubi. Peleti su svedeni na duljinu od 10 mm i time je omogućeno da svaki uzorak podjednako upija vlagu. Duljina i promjer peleta mjereni su mikrometrom (slika 16). Mjereni su promjer i duljina peleta prije izlaganja uzoraka u klima komori i nakon svakog vađenja iz klima komore. Uzorci koji su stavljeni u klima komoru bili su raspoređeni u posudice, a kraj svake posudice nalazio se redni broj kako ne bi došlo do krivog redoslijeda mjerenja. (slika 17). Dobiveni rezultati zapisivani su u programu Microsoft Excel i iz rezultata mjerenja duljine i promjera izračunata je dimenzijska stabilnost izražena u postocima promjene u usporedbi s početnim uzorkom.



Slika 16. Mjerenje promjera i duljine peleta s mikrometrom

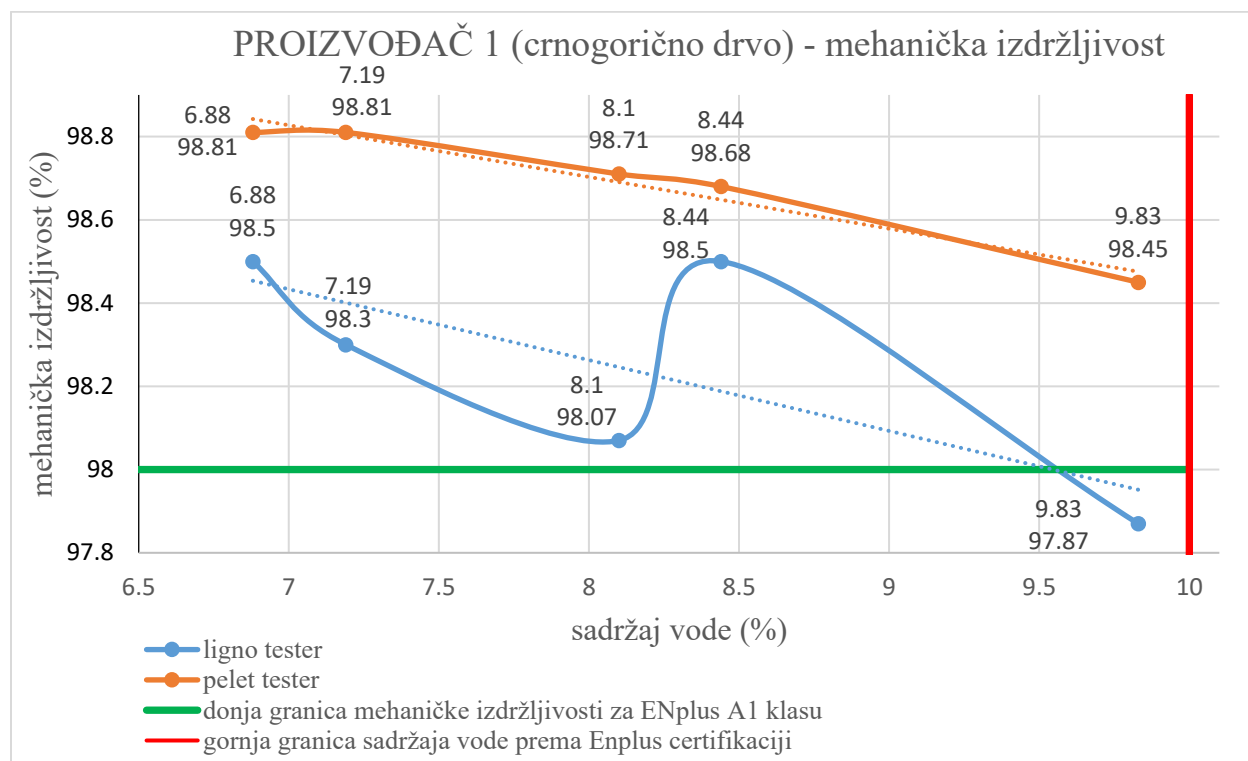


Slika 17. Uzorci za određivanje dimenzijske stabilnosti raspoređeni u posudice

5. REZULTATI

U potpoglavlju 5.1 biti će prikazani grafovi koji pokazuju ovisnost mehaničke izdržljivosti o sadržaju vode. Grafovi su prikazivani redoslijedom od proizvođača 1 do proizvođača 10. U potpoglavlju 5.2 prikazat će se dimenzijska stabilnost izražena u postocima promjene u usporedbi s početnim uzorkom.

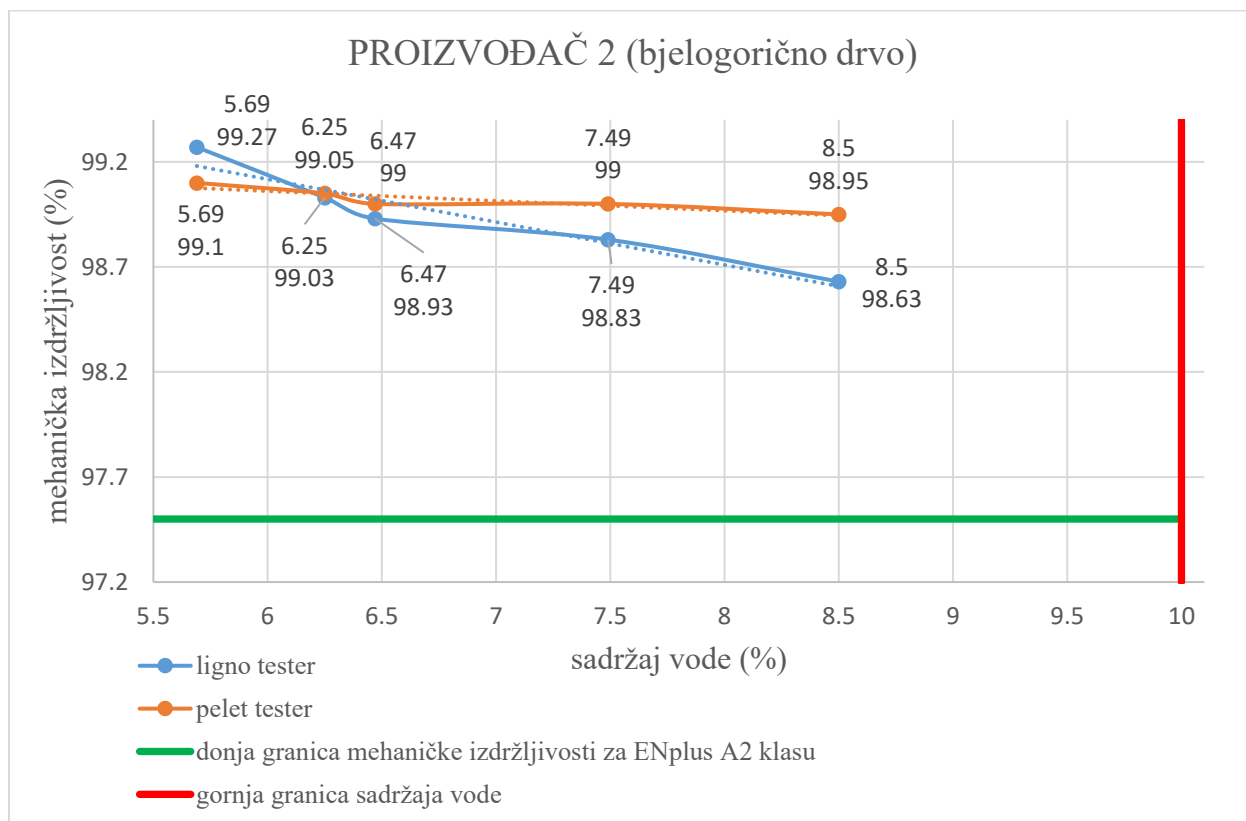
5.1. Rezultati ovisnosti mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode



Graf 1. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 1

Na grafu 1 prikazana je ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz crnogoričnog drva o sadržaju vode za proizvođača 1 (ENplus A1). Vrijednosti mehaničke izdržljivosti veće su kod mjerenja pelet-testerom od onih na ligno-testeru. Na pelet-testeru se može uočiti blagi pad mehaničke izdržljivosti s obzirom na porast sadržaja vode, ali taj pad iznosi 0,37 % što pokazuje da vrijednost mehaničke izdržljivosti mjerene na pelet-testeru kod sadržaja vode od 6,88 % do sadržaja vode od 9,83 % ne pada ispod donje granice od 98 % za ENplus A1 klasu.

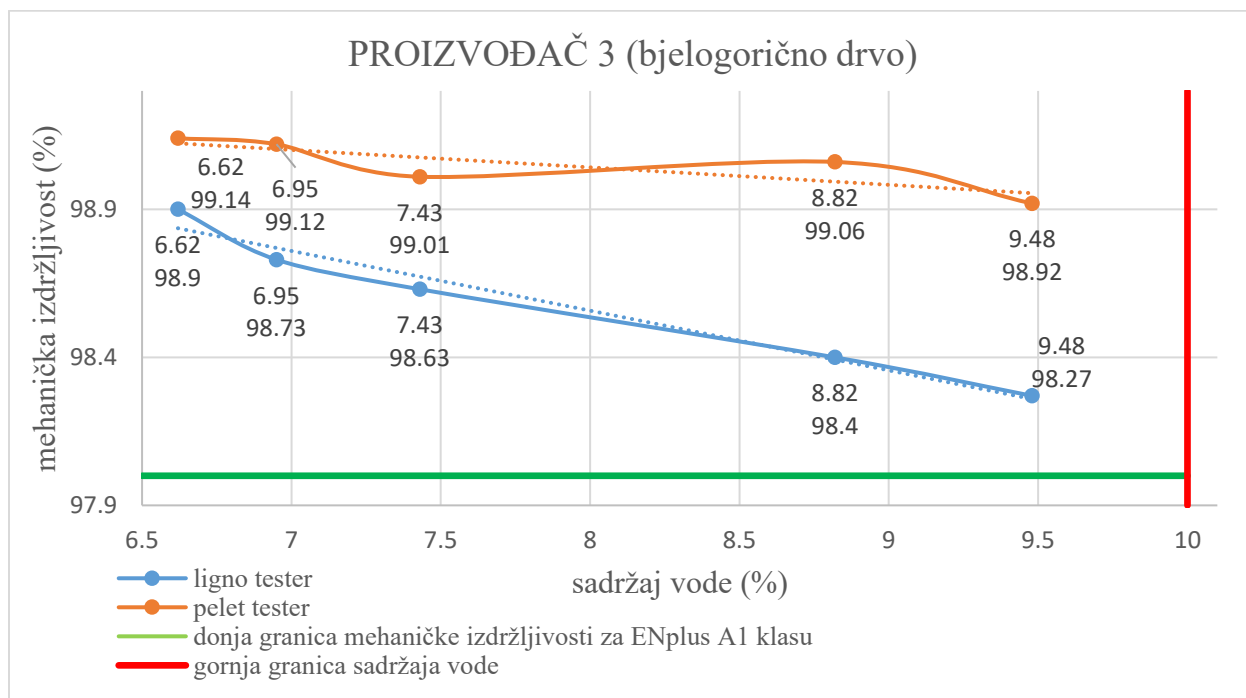
Kod mjerenja ligno-testerom može se uočiti pad mehaničke izdržljivosti peleta od sadržaja vode 6,88 do 8,1 %. Nakon 8,1 % mehanička izdržljivost naglo raste do 8,44 %, što može ukazivati na lošiju ponovljivost rezultata ligno-testerom, a zatim pada do sadržaja vode od 9,83 %. Daljnji porast sadržaja vode naglo smanjuje mehaničku izdržljivost peleta mjerenu na ligno-testeru kod proizvođača 1. Vrijednost mehaničke izdržljivosti mjerene na ligno-testeru kod sadržaja vode od 9,83 % pada na 97,87 % što je ispod donje granice za A1 klasu, ali je iznad 97,5 % što je donja granica za mehaničku izdržljivost za A2 klasu.



Graf 2. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 2

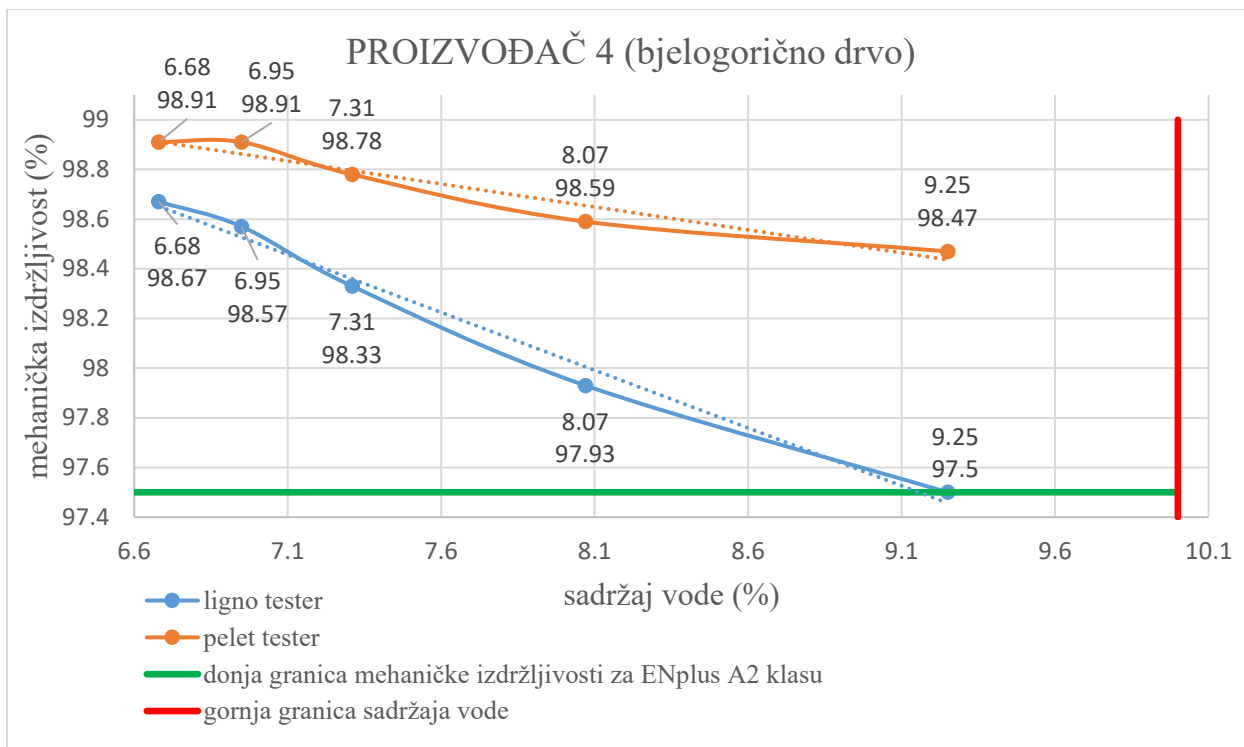
Na grafu 2 kod proizvođača 2 (ENplus A2) može se uočiti da je mehanička izdržljivost peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva kod mjerenja na pelet-testeru manja od vrijednosti mehaničke izdržljivosti dobivenih na ligno-testeru u rasponu sadržaja vode od 5,69 do 6,25 %. Nakon 6,25 % mehanička izdržljivost na pelet-testeru bilježi veće vrijednosti od one na ligno-testeru. Može se uočiti da mehanička izdržljivost kod proizvođača 2 s obzirom na sadržaj vode peleta pada s povećanjem sadržaja vode s tim da je kod pelet-testera pad vrijednosti blaži. Zanimljivo je da se kod sadržaja vode od 6,47 % i 7,49 % bilježe iste vrijednosti kod pelet-testera

za mehaničku izdržljivost. Vrijednost mehaničke izdržljivosti na pelet-testeru i ligno-testeru kod proizvođača 2 ni u jednom trenutku ne padaju ispod donje granice za A2 klasu.



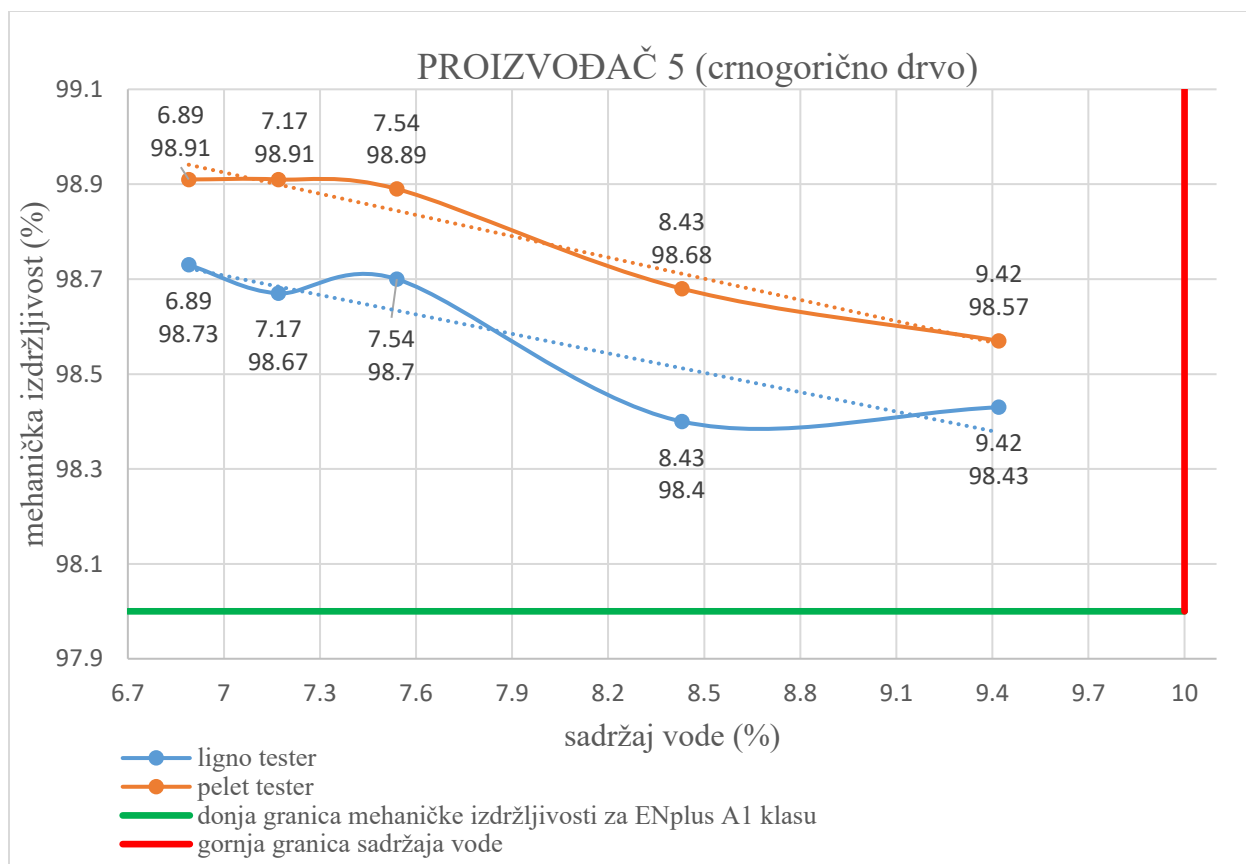
Graf 3. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 3

Na grafu 3 kod proizvođača 3 (Enplus A1) može se uočiti da je vrijednost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva kod pelet-testera veća od one na ligno-testeru. Kod mjerenja pelet-testerom može se uočiti blaži pad vrijednosti mehaničke izdržljivosti s porastom sadržaja vode. Kod mjerenja pelet-testerom od sadržaja vode 6,62 do 7,43 % vrijednosti mehaničke izdržljivosti padaju, a od 7,43 do 8,82 % vrijednosti blago rastu. Kod pelet-testera i ligno-testera vrijednost mehaničke izdržljivosti kod sadržaja vode od 6,62 do 9,48 % ne pada ispod donje granice od 98 % za A1 klasu (ligno-tester 98,27 %, pelet-tester 98,92 %). Vrijednosti sadržaja vode ne prelaze 10 %.



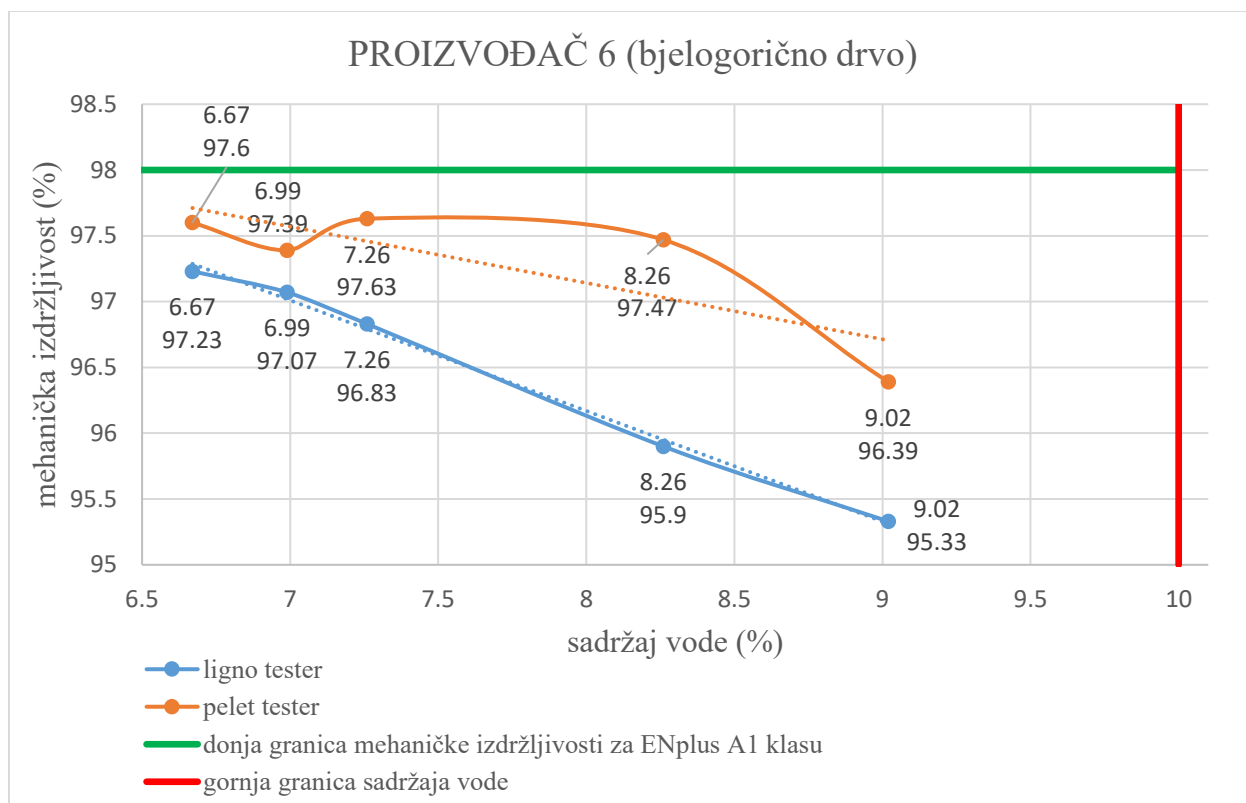
Graf 4. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 4

Na grafu 4 kod proizvođača 4 (ENplus A2) može se uočiti da je vrijednost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva kod pelet-testera veća od one na ligno-testeru. Mehanička izdržljivost pada s porastom sadržaja vode kod oba uređaja s tim da je kod ligno-testera izraženiji pad vrijednosti mehaničke izdržljivosti. Vrijednost mehaničke izdržljivosti kod ligno-testera kod sadržaja vode od 8,07 % i 9,25 % je ispod granice za A1 klasu (97,93 i 97,5 %), ali iznad 97,5 % što je donja granica mehaničke izdržljivosti za A2 klasu. Vrijednost mehaničke izdržljivosti kod pelet-testera je iznad 98 % što je donja granica za A1 klasu. Vrijednosti sadržaja vode ne prelaze 10 %.



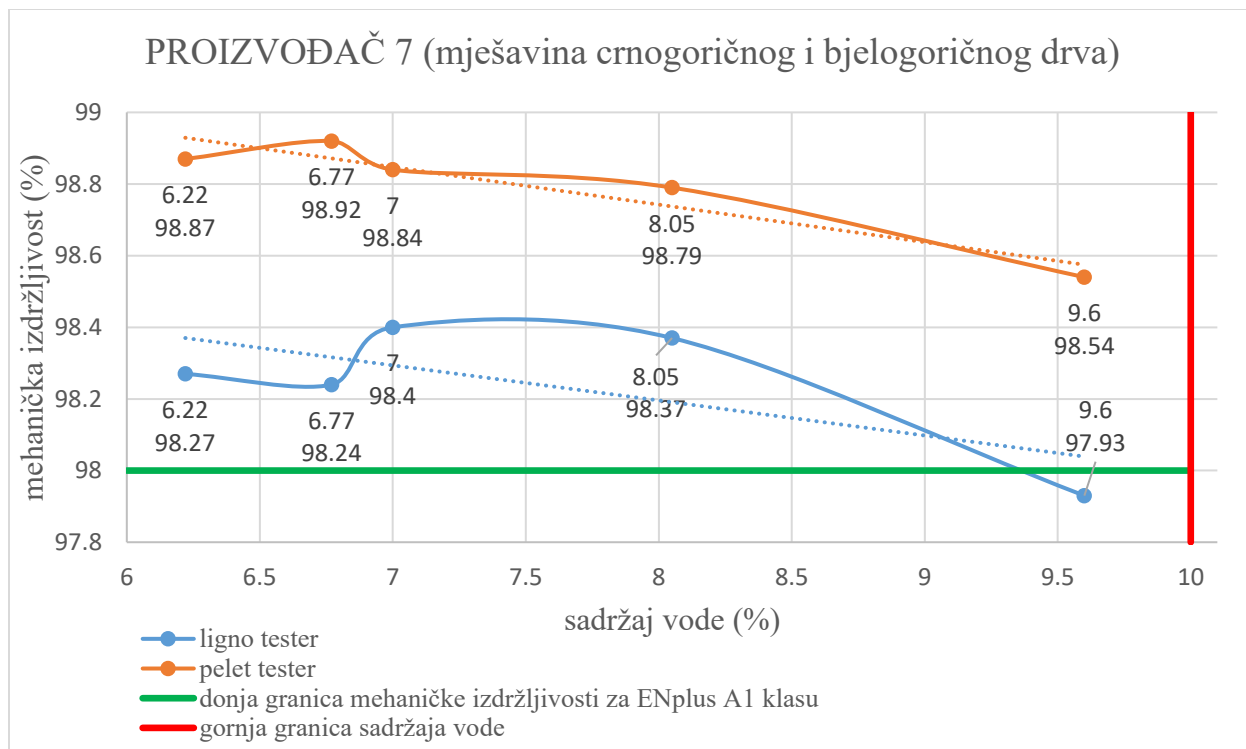
Graf 5. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 5

Na grafu 5 kod proizvođača 5 (ENplus A1) može se uočiti da je vrijednost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz crnogoričnog drva kod pelet-testera veća od one na ligno-testeru. Mehanička izdržljivost mjerena na pelet-testeru pada s porastom sadržaja vode. Kod mjerenja na ligno-testeru uočene su oscilacije u mehaničkoj izdržljivosti. Kod sadržaja vode od 7,17 do 7,54 % vrijednosti mehaničke izdržljivosti rastu i kod sadržaja vode od 8,43 do 9,42 %. Vrijednosti sadržaja vode ne prelaze granicu od 10 %. Vrijednosti mehaničke izdržljivosti kod pelet-testera i kod ligno-testera ne padaju ispod donje granice mehaničke izdržljivosti za A1 klasu ispod 98 %, a vrijednosti sadržaja vode ne prelaze 10 %.



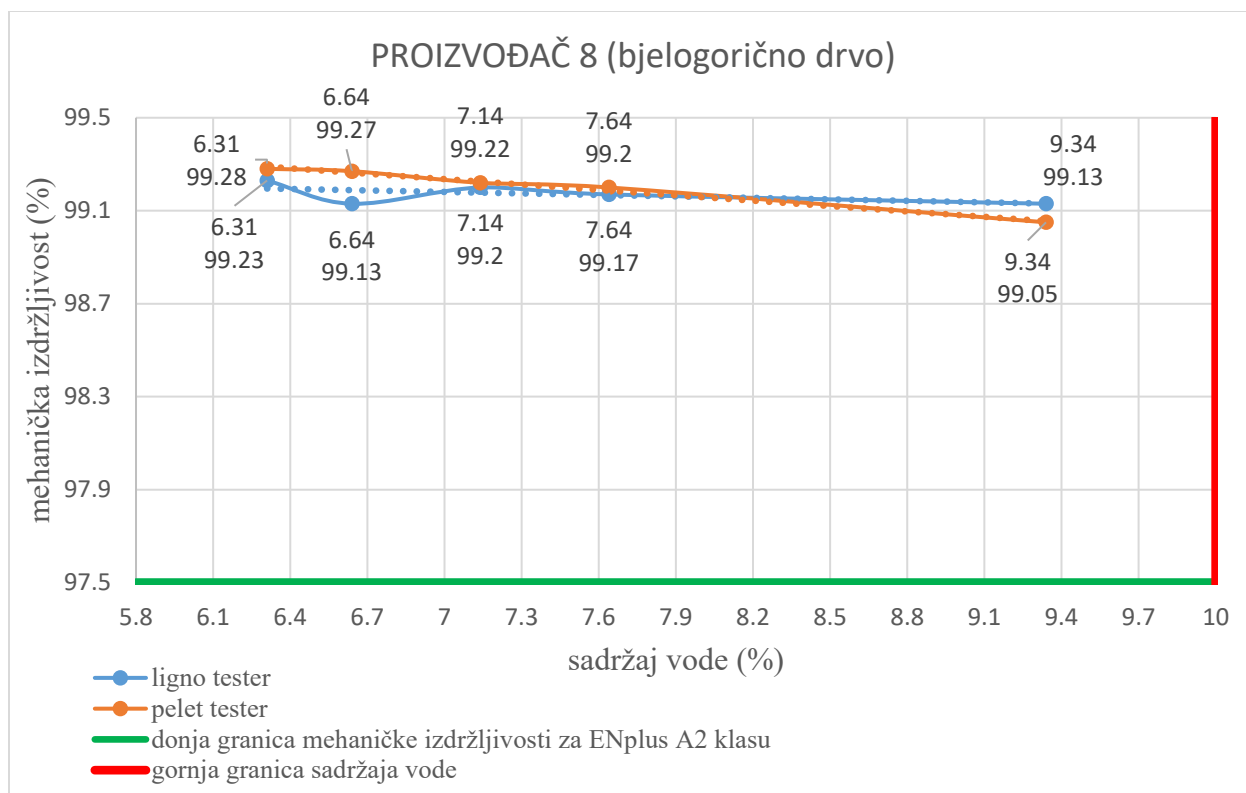
Graf 6. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 6

Na grafu 6 kod proizvođača 6 (ENplus A1) može se uočiti da je vrijednost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva kod pelet-testera veća od one na ligno-testeru. Kod ligno-testera vrijednosti mehaničke izdržljivosti s porastom sadržaja vode padaju. Kod mjerenja pelet-testerom vrijednosti mehaničke izdržljivosti padaju od 7,26 % sadržaja vode. Kod sadržaja vode od 6,99 do 7,26 % zabilježen je porast mehaničke izdržljivost kod pelet-testera. Vrijednosti mehaničke izdržljivosti kod pelet-testera ne zadovoljavaju donju granicu mehaničke izdržljivosti za A1 klasu kod svih sadržaja vode. Kod sadržaja vode od 6,67 % (97,6 %) i kod sadržaja vode od 7,26 % (97,63 %) vrijednosti mehaničke izdržljivosti su iznad donje granice za mehaničku izdržljivost kod A2 klase. Kod ostalih sadržaja vode vrijednost mehaničke izdržljivosti je ispod 97,5 %, što je ispod donje granice za klasu A2. Vrijednosti mehaničke izdržljivosti kod ligno-testera ne zadovoljavaju donju granicu mehaničke izdržljivosti za A1 klasu od 98,0 %. Vrijednosti sadržaja vode ne prelaze granicu od 10 %.



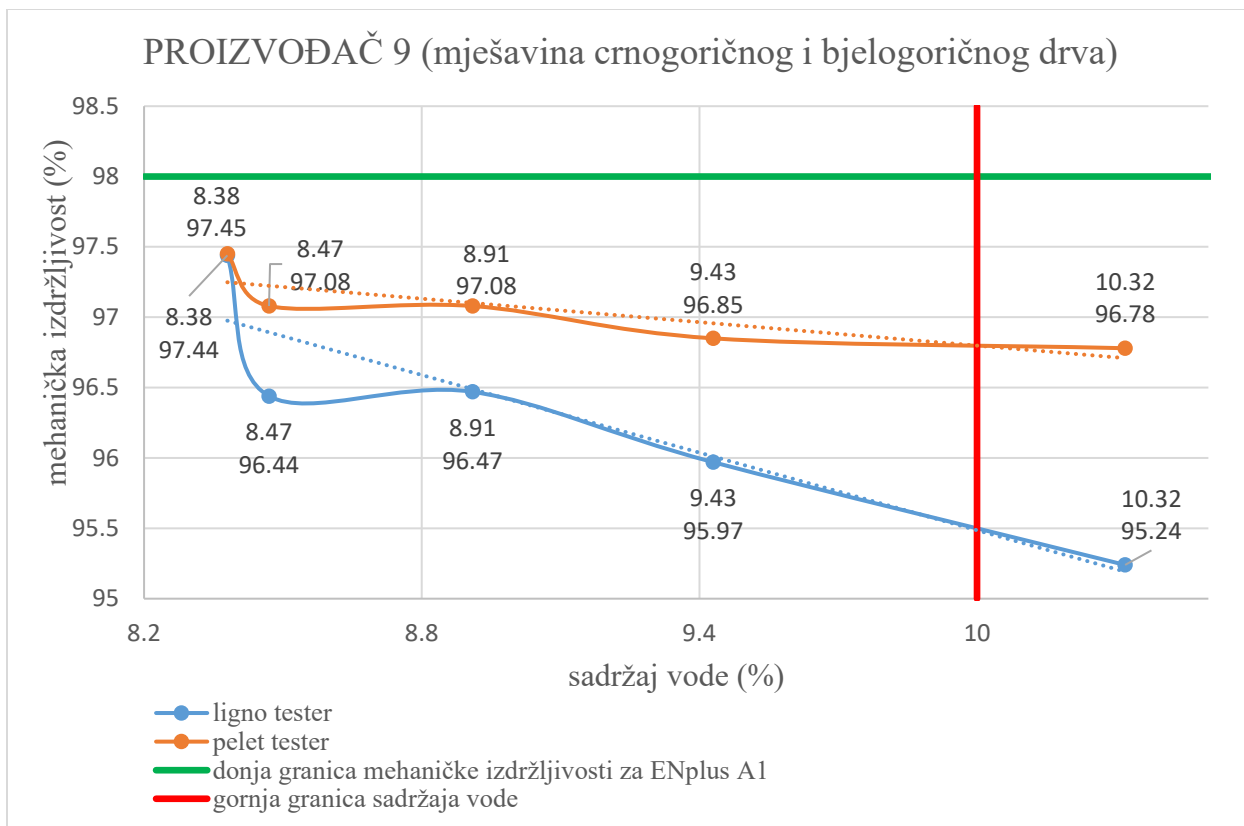
Graf 7. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 7

Na grafu 7 kod proizvođača 7 (ENplus A1) može se uočiti da je vrijednost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz mješavine bjelogoričnog i crnogoričnog drva kod pelet-testera veća od one na ligno-testeru. Kod mjerenja mehaničke izdržljivosti na pelet-testeru porastom sadržaja vode od 6,22 do 6,77 % raste mehanička izdržljivost peleta. Nakon sadržaja vode od 6,77 % mehanička izdržljivost izmjerena na pelet-testeru blago opada porastom sadržaja vode. Kod mjerenja na ligno-testeru od sadržaja vode 6,22 do 6,77 % mehanička izdržljivost neznatno opada, a zatim raste do sadržaja vode od 7 % te se zatim opet bilježi pad vrijednosti mehaničke izdržljivosti s porastom sadržaja vode peleta. Vrijednosti mehaničke izdržljivosti kod pelet-testera ne padaju ispod donje vrijednosti od 98 % za A1 klasu dok kod ligno-testera vrijednost mehaničke izdržljivosti pada ispod 98 % jedino kod sadržaja vode od 9,6 % (97,93 %). Vrijednosti sadržaja vode ne prelaze granicu od 10 %.



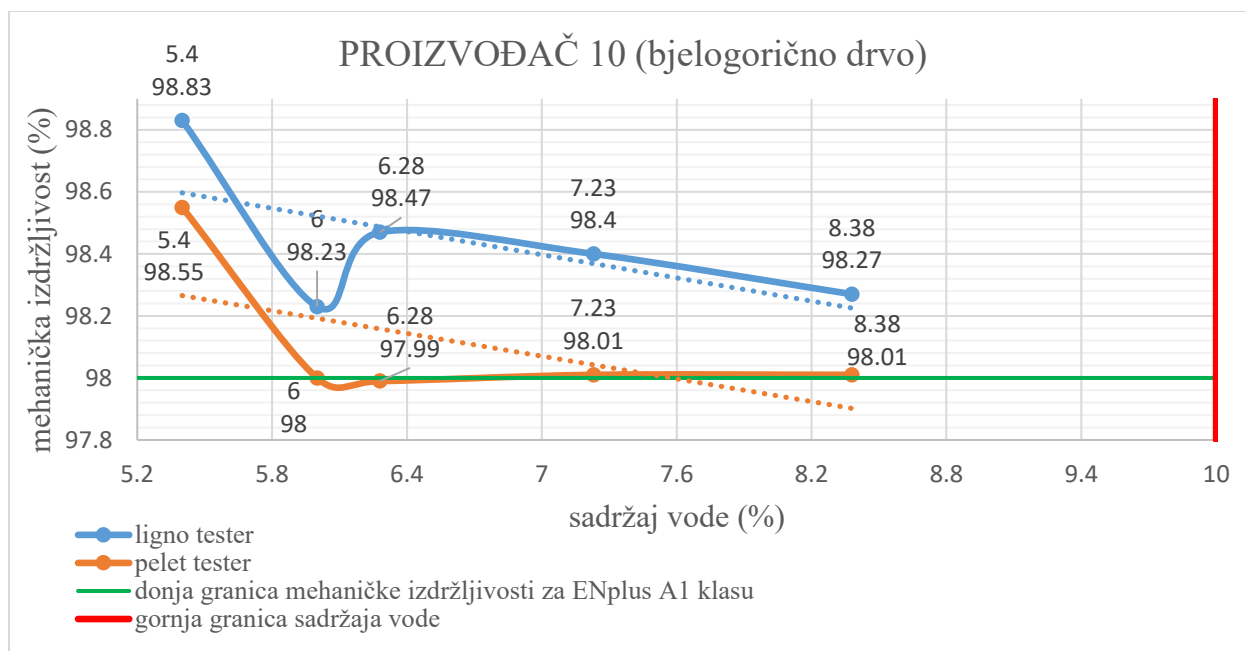
Graf 8. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 8

Na grafu 8 kod proizvođača 8 (ENplus A2) može se uočiti da je mehanička izdržljivost peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva mjerena na pelet-testeru veća od one mjerene na ligno-testeru sve do sadržaja vode od 8 %, nakon te vrijednosti, vrijednost mehaničke izdržljivosti mjerena na ligno-testeru je veća od one mjerene na pelet-testeru. Pad vrijednosti mehaničke izdržljivosti izraženiji je kod pelet-testera. Kod mjerenja na ligno-testeru porastom sadržaja vode sa 6,64 do 7,14 % raste mehanička izdržljivost peleta. Nakon 7,14 % mehanička izdržljivost porastom sadržaja vode blago pada s tim da ni u jednom trenutku mehanička izdržljivost ne pada ispod donje granice za A1 ili A2 klasu (98,0 %, odnosno 97,5 %) ni kod pelet-testera ni kod ligno-testera što pokazuje da kod proizvođača 8 porast sadržaja vode do 9,34 % bitno ne utječe na mehaničku izdržljivost. Vrijednosti sadržaja vode ne prelaze granicu od 10 %.



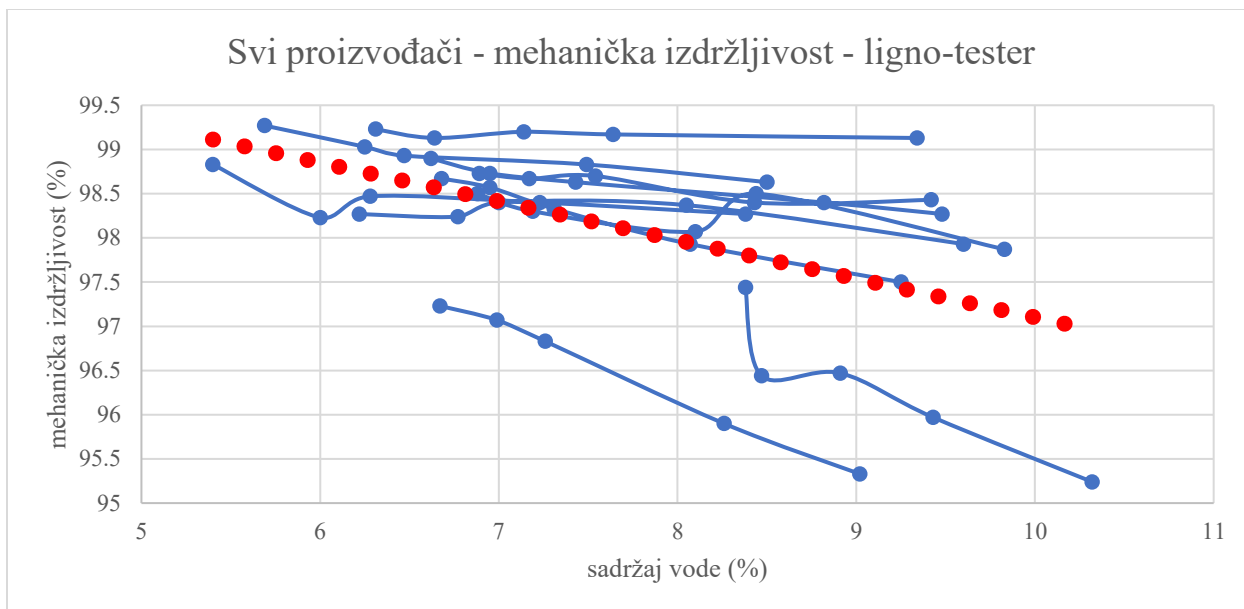
Graf 9. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 9

Na grafu 9 kod proizvođača 9 (ENplus A1) može se uočiti da je vrijednost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz mješavine bjelogoričnog i crnogoričnog drva kod pelet-testera veća od one na ligno-testeru. Kod proizvođača 9 zabilježen je najveći početni sadržaj vode (8,38 %). Kod mjerenja na pelet-testeru mehanička izdržljivost je blago padala s porastom sadržaja vode dok je kod ligno-testera taj pad izraženiji. Kod mjerenja na ligno-testeru mali porast sadržaja vode s 8,38 do 8,47 % uzrokuje pad mehaničke izdržljivosti zatim ona ponovno raste do sadržaja vode od 8,91 %. Daljni porast sadržaja vode uzrokuje pad vrijednosti mehaničke izdržljivosti mjerene na ligno-testeru. Kod proizvođača 9 zabilježena je najmanja vrijednost mehaničke izdržljivosti izmjerene na ligno-testeru. Vrijednosti mehaničke izdržljivosti i kod pelet-testera i kod ligno-testera ne zadovoljavaju donju granicu mehaničke izdržljivosti za A1 klasu od 98,0 %. Vrijednosti sadržaja vode poslije 8 h navlaživanja u klima komori prelaze gornju granicu sadržaja vode od 10 % (10,32 %).

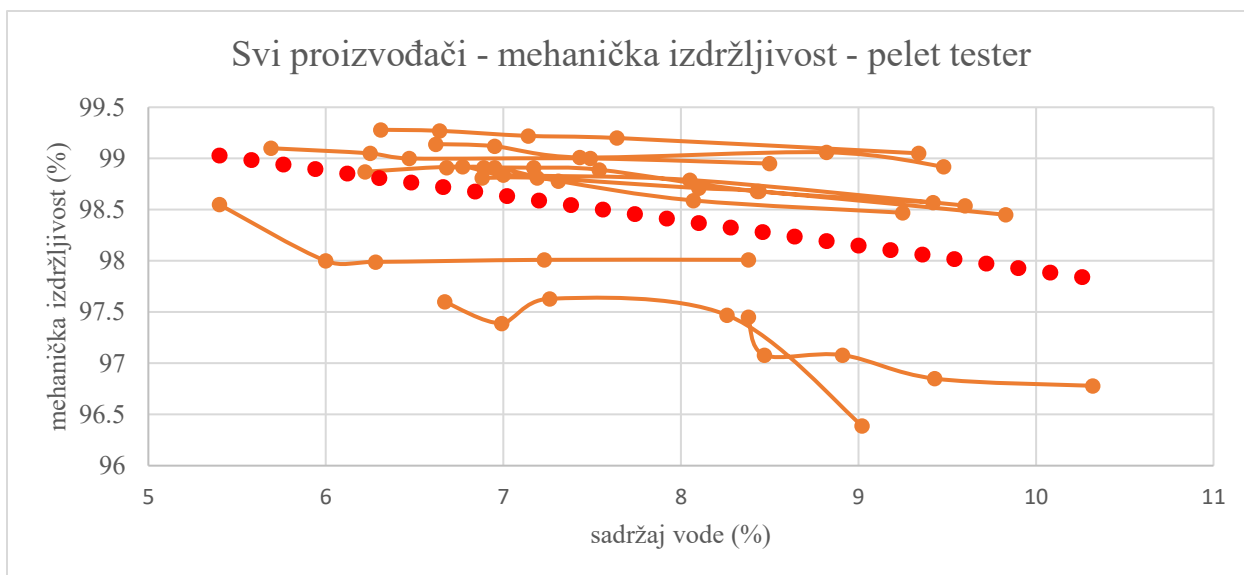


Graf 10. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 10

Na grafu 10 kod proizvođača 10 (ENplus A1) može se uočiti da je vrijednost mehaničke izdržljivosti peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva veća kod mjerenja na ligno-testeru od one mjerene na pelet-testeru. Kod svih 9 proizvođača koji su se do sada spomenuli nije zabilježen ovakav slučaj tj. vrijednost mehaničke izdržljivosti bila je veća kod mjerenja na pelet-testeru uz minimalne oscilacije kod proizvođača 2 i 8. Kod mjerenja na ligno-testeru porastom sadržaja vode od 6 do 6,28 % zabilježen je porast mehaničke izdržljivosti čemu uzrok može biti ranije spomenuta lošija ponovljivost rezultata na ligno-testeru. Kod mjerenja na pelet-testeru porast sadržaja vode uzrokuje pad vrijednosti mehaničke izdržljivosti između 5,4 i 6 %. Od sadržaja vode 6 % vrijednost mehaničke izdržljivosti stagnira i kreće se oko 98 % što odgovara donjoj granici sadržaja vode za A1 klasu. Kod mjerenja na ligno-testeru vrijednost mehaničke izdržljivosti ne pada ispod 98 % (98,27 %). Vrijednosti sadržaja vode ne prelaze granicu od 10 %.

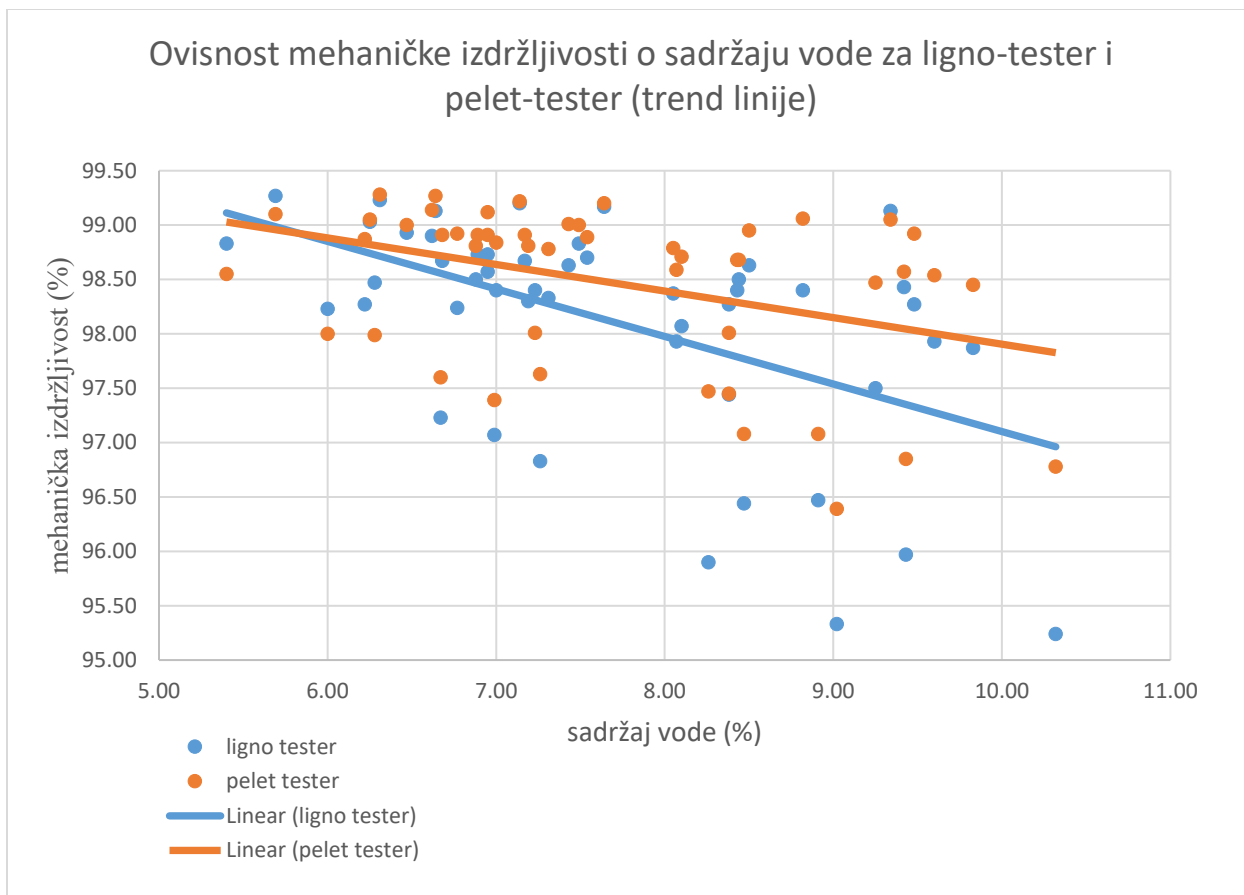


Graf 11. Ovisnost mehaničke izdržljivosti mjerene na ligno-testeru o sadržaju vode kod svih 10 proizvođača



Graf 12. Ovisnost mehaničke izdržljivosti mjerene na pelet-testeru o sadržaju vode kod svih 10 proizvođača

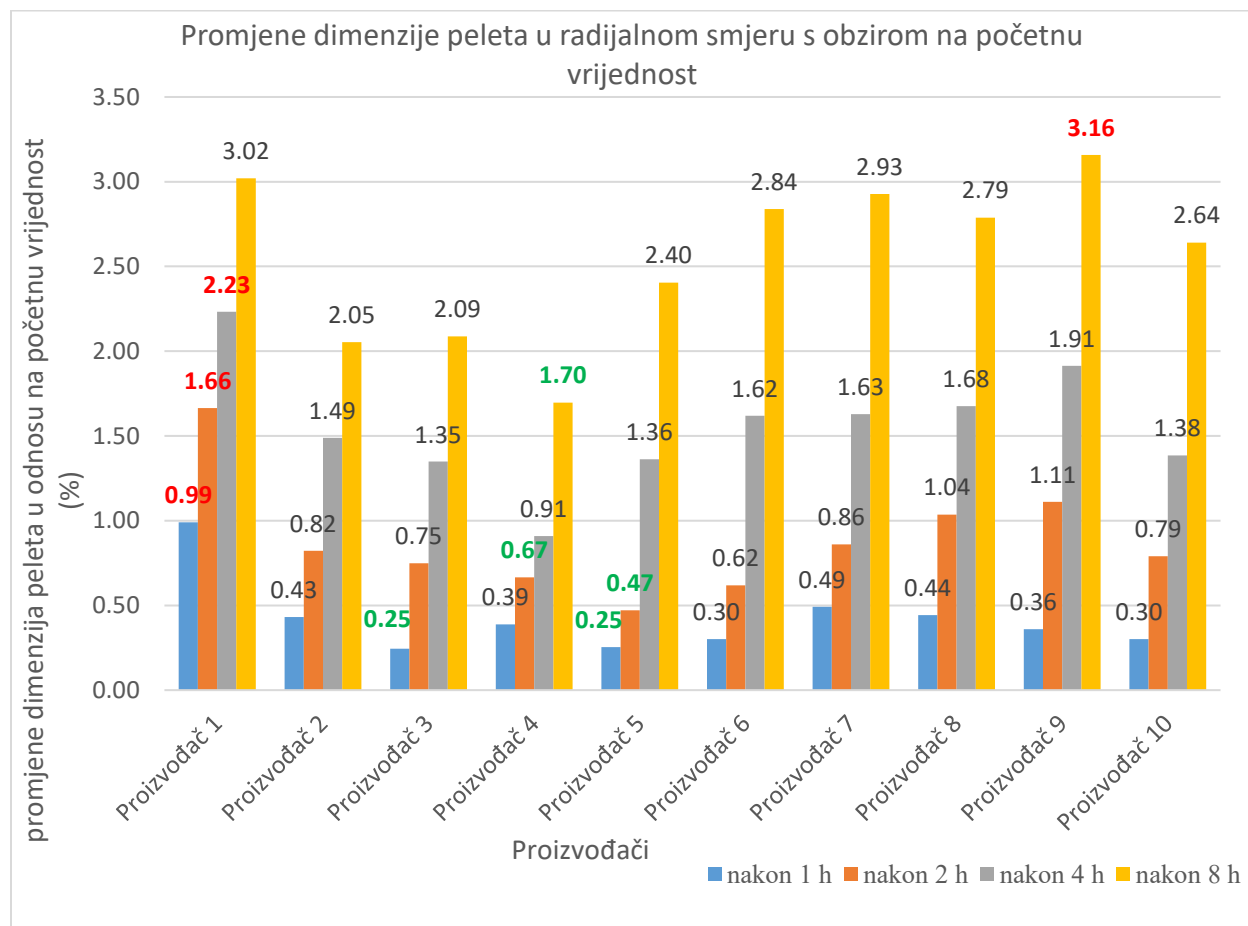
Na grafovima 11 i 12 prikazana je trend linija ovisnosti mehaničke izdržljivosti o sadržaju vode. Može se uočiti da je porastom sadržaja vode mehanička izdržljivost padala i kod mjerenja na pelet-testeru i kod mjerenja na ligno-testeru. Kod mjerenja na pelet-testeru pad mehaničke izdržljivosti s porastom sadržaja vode je blaži nego kod mjerenja na ligno-testeru što se može jasno vidjeti na grafu 13.



Graf 13. Usporedba ovisnosti mehaničke izdržljivosti o sadržaju vode za ligno-tester i pelet-tester

5.2. Rezultati mjerenja dimenzijske stabilnosti peleta

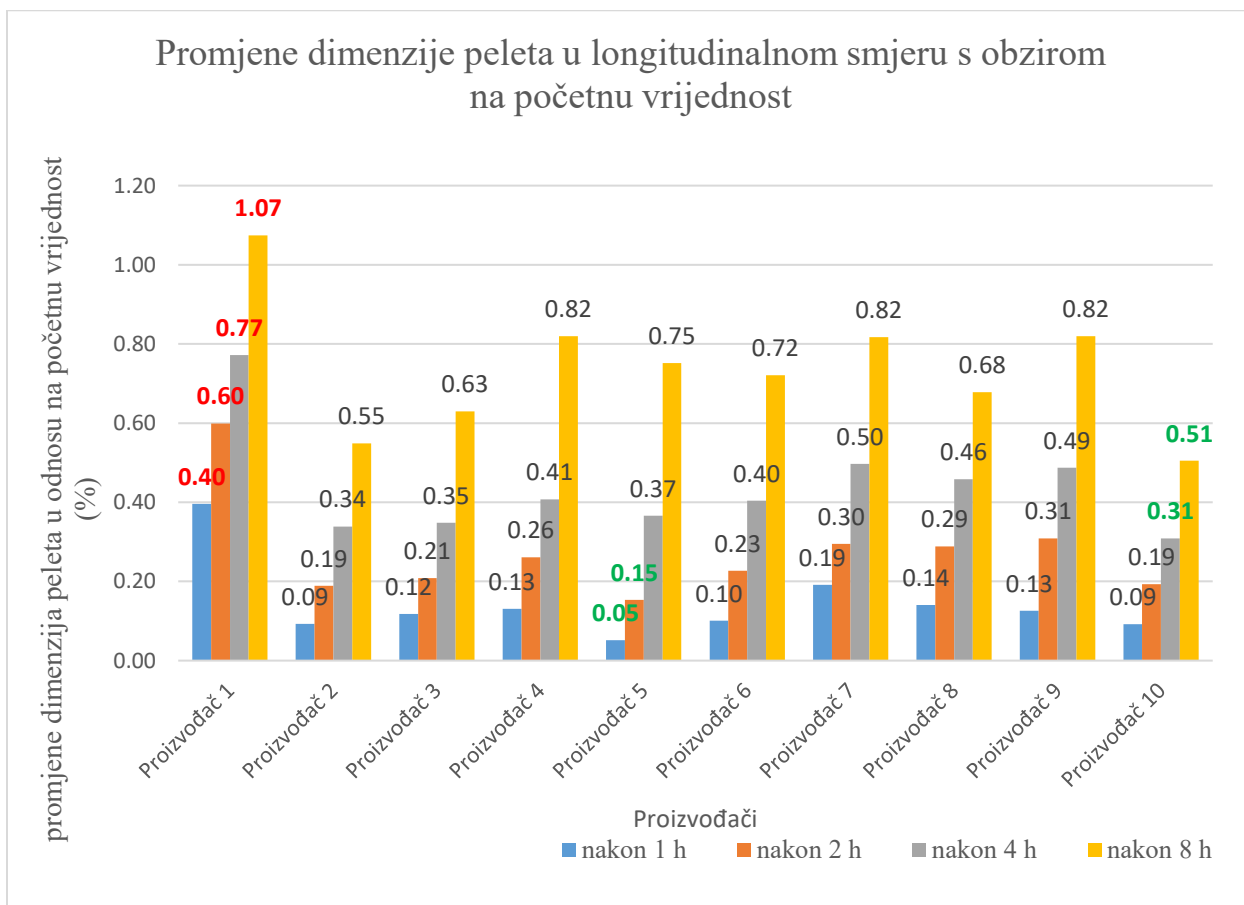
Za određivanje dimenzijske stabilnosti peleta kao što je navedeno u poglavlju 4 Materijali i metode uzeto je 10 uzoraka od svakog proizvođača. Na uzorcima je mjerena duljina i promjer, a rezultati će biti prikazani u nastavku.



Graf 14. Promjene dimenzija peleta u radialnom smjeru s obzirom na početnu vrijednost

Na grafu 14 prikazana je postotna promjena dimenzija peleta kod svih 10 proizvođača s obzirom na početnu vrijednost mjerenja. Crvenim brojkama označene su maksimalne vrijednosti mjerenja za pojedino vađenje iz klima komore, a zelenim brojkama su označene minimalne vrijednosti kod pojedinih proizvođača. Ukupno je izvršeno 5 mjerenja za pojedinog proizvođača, jedno početno mjerenje i ostala 4 mjerenja za svako vađenje iz klima komore nakon 1, 2, 4 i 8 h. Može se uočiti da su kod proizvođača 1 izmjerene 3 maksimalne vrijednosti i to kod prva tri vađenja iz klima komore. Četvrta maksimalna vrijednost za zadnje vađenje iz klima komore zabilježena je kod proizvođača 9. Što se tiče minimalnih vrijednosti one su zabilježene kod proizvođača 3, 4 i 5

s tim da su kod proizvođača 4 izmjerene dvije minimalne vrijednosti nakon 2 i 8 h provedenih u klima komori. Kod proizvođača 4 zabilježene su najmanje razlike promjena dimenzija u radijalnom smjeru s obzirom na početnu vrijednost mjerenja. Proizvođač 1 i 9 imali su najveće promjene dimenzija u radijalnom smjeru s obzirom na početnu vrijednost mjerenja s tim da je kod proizvođača 1 ta promjena dimenzija bila ravnomjernije raspoređena s obzirom na vrijeme provedeno u klima komori dok su se kod proizvođača 9 javljali nagli porasti u promjenama dimenzija. Nakon 8 h provedenih u klima komori ni jedan uzorak nije prešao vrijednost od 3,16 % promjene u donosu na početnu vrijednost mjerenja. ENplus certifikat propisuje promjer peleta 6 ± 1 mm što je dopušteno odstupanje od 16 do 17 %. Iz grafa se može zaključiti da ni kod jednog proizvođača nije postignuta tolika vrijednost.

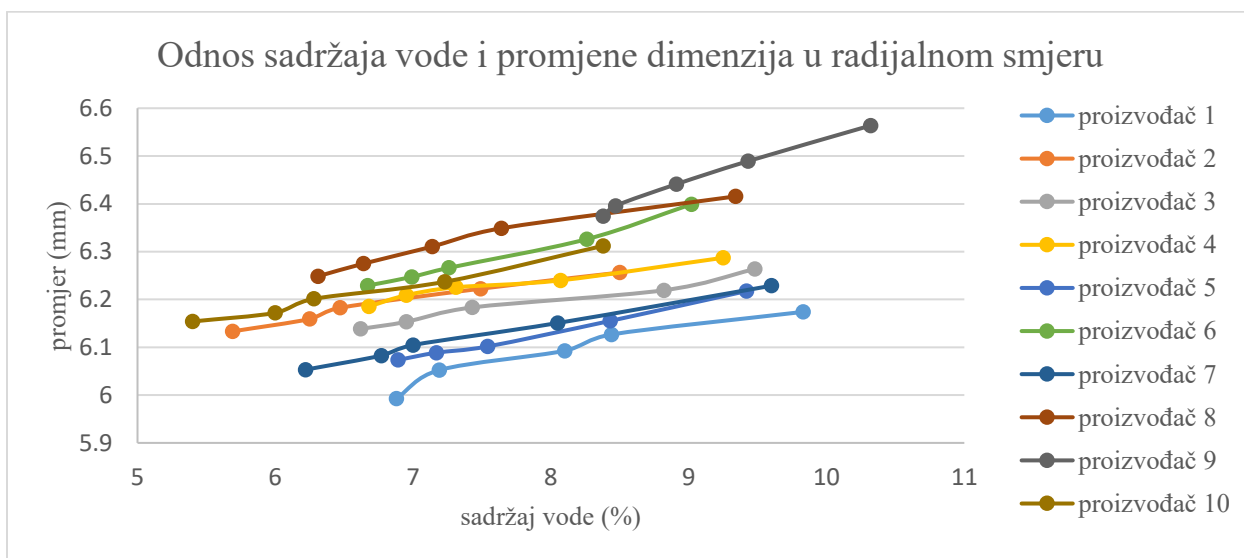


Graf 15. Promjene dimenzija peleta u longitudinalnom smjeru s obzirom na početnu vrijednost

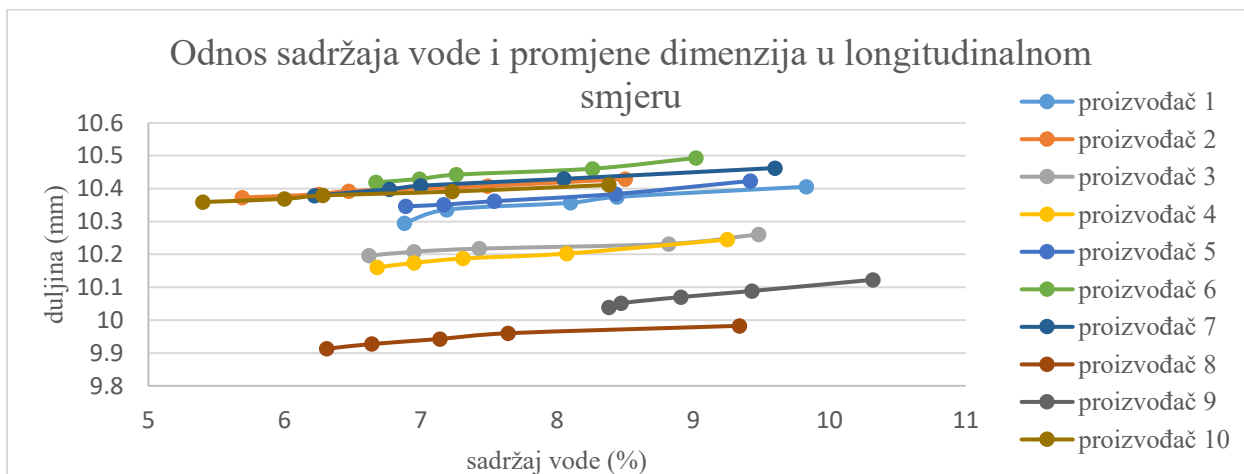
Na grafu 15 kao i kod mjerenja promjena dimenzija u radijalnom smjeru i u longitudinalnom smjeru kod proizvođača 1 javljaju se maksimalne vrijednosti. Kod proizvođača

5 izmjerene su minimalne vrijednosti na uzorcima nakon 1 i 2 h provedenih u klima komori, a kod proizvođača 10 nakon 4 i 8 h. Kod proizvođača 2, 3 i 10 javljaju se najmanje promjene dimenzija s obzirom na početnu vrijednost.

Iz grafa 14 i 15 može se zaključiti da su promjene dimenzija u longitudinalnom smjeru manjih vrijednosti od onih u radijalnom. Maksimalna vrijednost u longitudinalnom smjeru iznosi 1,07 % dok kod radijalnog smjera ona iznosi 3,16 % promjene u odnosu na početnu vrijednost mjerenja.



Graf 16. Odnos sadržaja vode i promjene dimenzija u radijalnom smjeru



Graf 17. Odnos sadržaja vode i promjene dimenzija u longitudinalnom smjeru

Na grafu 16 i 17 prikazana je promjena dimenzija u radijalnom i longitudinalnom smjeru s obzirom na povećanje sadržaja vode. Može se zaključiti da su kod radijalnog smjera tj promjera

izraženije promjene dimenzija s obzirom na sadržaj vode što će reći da su peleti više bubrili u radijalnom nego longitudinalnom smjeru.

U programu Microsoft Excel izračunato je apsolutno povećanje sadržaja vode s obzirom na početni sadržaj vode te apsolutno smanjenje mehaničke izdržljivosti s obzirom na početnu vrijednost mjerenja na ligno-testeru i pelet-testeru. Apsolutno povećanje sadržaja vode se kretalo od 1,94 do 3,38 %. Kod pelet-testera zabilježen je manji raspon apsolutnog smanjenja mehaničke izdržljivosti (0,15-1,21) nego kod ligno-testera (0,10-2,20). U poglavlju 6 dobivene vrijednosti u ovom radu biti će uspoređene s vrijednostima drugih radova.

6. RASPRAVA

Prema Golser i sur. (2006) istraživana je utjecaj sadržaja vode na mehaničku izdržljivost peleta, uzorci su bili osušeni ili ovlaženi kako bi se prilagodio sadržaj vode između 4 i 14 %. Dobiveni rezultati pokazivali su da je uzorak jedan povećanjem sadržaja vode imao povećanu abraziju za 1,47 %, a uzorak dva 2,77 % kod sadržaja vode od 10 %. Kod oba uzorka je mehanička izdržljivost padala povećanjem sadržaja vode, a nakon vrijednosti od 10 % sadržaja vode mehanička izdržljivost peleta počela je naglo padati. Navedeni rezultati se podudaraju s istraživanjem u ovom radu gdje je također do sadržaja vode od 10 % mehanička izdržljivost padala s tim da u ovom radu peleti nisu postigli vrijednosti sadržaja vode veću od 10,32 %.

Prema Golser i sur. (2006) istraživana je utjecaj skladištenja peleta na mehaničku izdržljivost i zaključili su da promjene između 50 i 70 % relativne vlage zraka nisu imale značajni utjecaj na mehaničku izdržljivost peleta. Peleti skladišteni u relativnoj vlazi zraka od 95 % imali su prosječni uravnoteženi sadržaj vode od 16,5 %, ali im se pad mehaničke izdržljivosti uveliko razlikovao i varirao je između 3,6 i 9,1 % s tim da su uzorci koji su imali najmanji početni sadržaj vode imali najmanju mehaničku izdržljivost zato jer su u istom periodu upili veću količinu vlage nego uzorci koji su imali veći početni sadržaj vode. U ovom radu uzorci su bili podvrgnuti relativnoj vlazi zraka od 90 %, ali u vremenskom intervalu od 8 h gdje su postignuti manji konačni sadržaji vode od 8,38 do 10,32 %, a u skladu s tim i manje apsolutno smanjenje mehaničke izdržljivosti od 0,15 do 1,21 % (pelet-tester) odnosno od 0,10 do 2,20 % (ligno-tester).

Lee i sur. (2020) su testirali mehaničku izdržljivost na peletima koji su bili izloženi prskanjem vode koje je simuliralo kišu. Mehanička izdržljivost kod peleta s početnim sadržajem vode od 5,5 % bila je 99,6 %, a kod peleta koji su dosegli sadržaj vode od 12 % vrijednost mehaničke izdržljivosti iznosila je 95 %. Kod sadržaja vode od 10 % mehanička izdržljivost iznosila je $96,5 \pm 0,5$ %. Kada je postignut konačni sadržaj vode od 20 % vrijednost mehaničke izdržljivosti pala bi na 80 %. Kada je konačni sadržaj vode bio veći od 10 % peleti bi imali vrijednost mehaničke izdržljivosti manju od 96,5 %. Navedeni rezultati se također podudaraju s rezultatima navedenim u ovom radu. Jedini uzorak (proizvođač 9) s konačnim sadržajem vode većim od 10 % (10,32 %) imao je vrijednost mehaničke izdržljivosti mjerenu na ligno-testeru manju od 96,5 % (95,24 %), svi ostali uzorci s konačnim sadržajem vode manjim od 10 % imali su vrijednost mehaničke izdržljivosti veću od 96,5 % (97,5 % ili više) osim kod proizvođača 6

gdje su dva uzorka imala vrijednost manju od 96,5 % (96,39 i 95,33 %) uz konačni sadržaj vode od 9,02 %. Treba napomenuti da je kod uzoraka proizvođača 6 i 9 i početna vrijednost mehaničke izdržljivosti bila manja u usporedbi s ostalim uzorcima te je kod njih zabilježeno i najveće apsolutno smanjenje vrijednosti mehaničke izdržljivosti (1,21 % mjereno na pelet-testeru za proizvođača 6 i 2,20 % mjereno na ligno-testeru za proizvođača 9).

Prema Lee (2021) testirana je ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta s porastom sadržaja vode. Uzorci su bili osušeni na 0 % sadržaja vode, a porast sadržaja vode odvijao se prskanjem vode po peletima. Navodi da je vrijednost mehaničke izdržljivosti između 6 i 9 % ostala relativno nepromijenjena tj. ostala je iznad vrijednosti od 97,5 % što je minimalna vrijednost koju peleti moraju zadovoljiti prema CANplus standardu koji je Kanadski ekvivalent za ISO 17225 standard (Wood Pellet Association of Canada 2016, prema: Lee 2021). Navedeni rezultati poklapaju se s ovim radom gdje između 6 i 9 % vrijednost mehaničke izdržljivosti nije pala ispod 97,5 % (osim kod ranije spomenutih proizvođača 6 i 9) što je također ekvivalent za ENplus A2 klasu.

Hartmann 2004 (prema: Obernberger i Thek 2010) navodi da je abrazivnost peleta blago rasla povećanjem sadržaja vode do 8 %, a kad bi sadržaj vode bio veći od 10 % abrazivnost bi naglo rasla. Navedeni rezultati podudaraju se s ovim radom gdje je abrazivnost rasla odnosno mehanička izdržljivost peleta je blago padala povećanjem sadržaja vode s tim da u ovom radu nisu postignute vrijednosti sadržaja vode veće od 10,32 %.

U ovom radu vrijednosti mehaničke izdržljivosti negdje su bile veće kod peleta izrađenih iz crnogoričnog drva, a negdje kod peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva. Nije zapažen trend da je konstantno mehanička izdržljivost bolja kod jedne ili druge vrste peleta. Kod proizvođača 2 i 8 gdje su peleti bili izrađeni iz bjelogoričnog drva zabilježeno je najmanje apsolutno smanjenje mehaničke izdržljivosti (0,10 i 0,15 %). Kod proizvođača 6 gdje su peleti bili izrađeni iz bjelogoričnog drva zabilježeno je najveće apsolutno smanjenje mehaničke izdržljivosti kod peleta izrađenih iz bjelogoričnog drva od 1,90 %.

Kod proizvođača 1 i 5 gdje su peleti bili izrađeni iz crnogoričnog drva vrijednosti mehaničke izdržljivosti bile su iznad 98 % što zadovoljava kriterije za ENplus A1 klasu (iznimka je vrijednost mehaničke izdržljivosti od 97,87 % kod sadržaja vode od 9,83 % kod proizvođača 1). Istraživanja koje su proveli Nielsen i sur. 2009 (prema: Deng i sur. 2019) pokazuje negativnu korelaciju između sadržaja vode i mehaničke izdržljivosti za drvo bukve dok je za drvo bora

sadržaj vode imao pozitivan učinak na mehaničku izdržljivost. Stelte i sur. 2011 (prema: Whittaker i Shield 2017) tvrde da peleti izrađeni iz drva smreke i prešani na temperaturi od 100 °C imaju veću mehaničku izdržljivost od peleta izrađenih iz drva bukve. Također tvrde da je kod drva visoke gustoće (hrast, bukva) veća potrebna temperatura prešanja za promjenu agregatnog stanja lignina stoga sadržaj vode može pozitivno utjecati na mehaničku izdržljivost peleta jer vlaga smanjuje temperaturu u matrici na kojoj lignin mijenja agregatno stanje.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivani su peleti 10 različitih proizvođača. Određivala se mehanička izdržljivost na pelet-testeru i ligno-testeru te su se mjerili duljina i promjer peleta za potrebe određivanja dimenzijske stabilnosti peleta.

Mehanička izdržljivost jedan je od najvažnijih parametara u proizvodnji peleta. Niska mehanička izdržljivost može prouzrokovati visok udio finih čestica što negativno utječe na kvalitetu peleta, ali i zadovoljstvo samog kupca. Visoka mehanička izdržljivost peleta predstavlja prednost kod transportiranja peleta krajnjem kupcu ili kod transportiranja u proizvodnom pogonu.

U ovom radu mehanička izdržljivost peleta padala je s porastom sadržaja vode peleta. Kod mjerenja na pelet-testeru pad mehaničke izdržljivosti s porastom sadržaja vode je blaži nego kod mjerenja na ligno-testeru. Kod svih proizvođača (osim proizvođača 6 i 9) vrijednost mehaničke izdržljivosti bila je iznad donje granice od 97,5 % za sve klase prema ENplus certifikaciji. Kod proizvođača 6 (ENplus A1) vrijednosti mehaničke izdržljivosti kod pelet-testera zadovoljava donju granicu mehaničke izdržljivosti samo za A2 klasu kod sadržaja vode od 6,67 % (97,6 %) i kod sadržaja vode od 7,26 % (97,63 %) kod ostalih sadržaja vode vrijednost mehaničke izdržljivosti je ispod 97,5 %. Vrijednosti mehaničke izdržljivosti kod ligno-testera za proizvođača 6 ne zadovoljavaju donju granicu mehaničke izdržljivosti za A2 klasu od 97,5 %. Kod proizvođača 9 (ENplus A1) vrijednosti mehaničke izdržljivosti i kod pelet-testera i kod ligno-testera ne zadovoljavaju donju granicu mehaničke izdržljivosti za ENplus A2 klasu od 97,5 %.

Vrijednosti sadržaja vode kod devet proizvođača ne prelaze gornju granicu sadržaja vode od 10 % prema ENplus certifikatu. Jedino je kod proizvođača 9 sadržaj vode prešao 10 % (10,32 %) s tim da je kod tog proizvođača zabilježen i najveći početni sadržaj vode od 8,38 %.

Možemo zaključiti da navlaživanje u klima komori u vremenskom intervalu od 8 h u ovom ispitivanju nije bilo dovoljno da se postignu sadržaji vode veći od 10 % osim kod proizvođača 9. Postignuti sadržaji vode nisu bitno narušili mehaničku izdržljivost peleta jer većina proizvođača zadovoljava donju granicu mehaničke izdržljivosti za ENplus A2 klasu od 97,5 %. Oni koji ne zadovoljavaju (proizvođači 6 i 9) imali su već od početnog mjerenja nisku mehaničku izdržljivost.

Vrijednosti mehaničke izdržljivosti mjerene na pelet-testeru bile su veće od vrijednosti mjerenih na ligno-testeru kod svih proizvođača osim kod proizvođača 10 gdje je vrijednost mehaničke izdržljivosti bila veća kod mjerenja na ligno-testeru. Za sadržaje vode veće od 10 % potrebno je duže navlaživanje peleta u klima komori. Za pretpostaviti je da bi se s većim sadržajem vode (iznad 10 %) mehanička izdržljivost peleta značajnije narušila što je potvrđeno spomenutom literaturom u poglavlju 6.

Vremenski interval u klima komori od 8 h nije bio dovoljan da peleti upiju dovoljno vlage koja bi im narušila dimenzijsku stabilnost iznad 16-17 % postotne promjene u odnosu na početnu vrijednost koja je propisana ENplus certifikatom. U ovom radu najveća vrijednost postignuta je od 3,16 % u radijalnom smjeru. Kod određivanja duljine i promjera peleta u ovom radu može se zaključiti da su kod radijalnog smjera tj promjera izraženije promjene dimenzija s obzirom na povećanje sadržaja vode što će reći da su peleti više bubrili u radijalnom nego longitudinalnom smjeru.

Podaci u ovom radu pokazuju da bi se mogli spriječiti visoki energetske trošci na sušenje peleta do niskih sadržaja vode i da bi se peleti mogli proizvoditi s većim postotkom sadržaja vode jer do određenog postotka mehanička izdržljivost nije znatno narušena. Također je bitno napomenuti da je jedna od bitnijih stavki vezana za drvene pelete njihovo skladištenje. Pravilno skladištenje peleta može očuvati njihovu trajnost odnosno kvalitetu. Pravilnim skladištenjem peleta smanjuje se gubitak energetske vrijednosti peleta koji može nastati zbog povećane količine sadržaja vode.

8. LITERATURA

1. Alakoski, E., Jämsén, M., Agar, D., Tampio, E., Wihersaari, M. 2016: From wood pellets to wood chips, risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass – A short review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, February 2016: 376-383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.021> (Pristupljeno: 20.8.2022.)
2. Brkić, M., Janić, T., Gluvakov, Z. 2012: Oblici i veličine otvora na matricama peletirki u zavisnosti od vrste sirovine za presovanje, *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 38 Br. 2: 75-86. <https://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0350-29531202075B> (Pristupljeno 17.8.2022.)
3. Deng, T., Alzahrani, A.M., Bradley, M.S. 2019: Influences of Environmental Humidity on Physical Properties and Attrition of Wood Pellets, 185: 126-138. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.12.010>. (Pristupljeno: 21.8.2022.)
4. Dujmović, M., Šafran, B., Jug, M., Radmanović, K., Antonović, A. 2022: Biomass Pelletizing Process: A Review, *Drvna industrija*, Vol. 73 No.1, 2022. <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2139> (Pristupljeno: 20.8.2022.)
5. Golser, M., Greinöcker, C., Pichler, W. 2006: HYGROSCOPICITY OF WOOD PELLETS Test method development – Influence on pellet quality – Coating of wood pellets, In: *Proceedings of the 2nd World Conference on Pellets 2006*, Jönköping, Sweden, p 199 – 202. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.3826.6886> (Pristupljeno: 15.8.2022.)
6. Graham, S., Eastwick, C., Snape, C., Quick, W. 2017: Mechanical degradation of biomass wood pellets during long term stockpile storage, *Fuel Processing Technology* 160 (2017), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.02.017> (Pristupljeno: 19.8.2022.)
7. Janić, T., Jelić, D., Tot, I., Stojković, I., Igić, S. 2013: Uticaj vlažnosti i sastava biomase na osobine peleta, *Savremena poljoprivredna tehnika*, Vol. 39, No. 4: 205-268. <http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0350-29531304205J> (Pristupljeno 18.8.2022.)
8. Japhet, J., Tokan, A., Kyauta E. 2019: A Review of Pellet Production from Biomass Residues as Domestic Fuel, *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, Vol-4, Issue-3: 835-842. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/4.3.34> (Pristupljeno 17.8.2022.)

9. Kaliyan, N., Vance Morey, R. 2009: Factors affecting strength and durability of densified biomass products, *Biomass and Bioenergy* 33, Vol. Issue 33: 337-359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005> (Pristupljeno 19.8.2022.)
10. Labudović, B., Grđan, M., Hrešč, I., Jelinić Lakušić, B., Lovrak, Ž., Uran, V. 2012: Osnove primjene biomase, *Energetika marketing*, Zagreb.
11. Lee, J. S. 2021: Moisture-related physical properties and self-heating of wood pellets, The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies - The University of British Columbia, Vancouver, Canada. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0395603> (Pristupljeno: 15.8. 2022.)
12. Lee, J. S., Lim J. C., Sokhansanj, S., Lau, A.K. 2020: The Impact of Rain Exposure During Loading of Wood Pellets for Ocean Shipment – An Experimental Study, *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 64: 253-258. <https://doi.org/10.13031/trans.13905> (Pristupljeno: 16.8.2022.)
13. Lehtikangas, P. 2000: Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark, *Biomass and Bioenergy* 19 (2000) 287–293. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00046-5) (Pristupljeno: 14.8.2022.)
14. Muramatsu, K., Massuquetto, A., Dahlke, F., Maiorka, A. 2015: Factors that Affect Pellet Quality: A Review, *Journal of Agricultural Science and Technology* 5: 717-722. DOI: 10.17265/2161-6256/2015.09.002 (Pristupljeno 18.8.2022.)
15. Obernberger, I., Thek, G. 2010: The pellet handbook – The Production and thermal Utilisation of Pellets, Earthscan London, Washington DC. <https://fdocuments.net/document/the-pellet-handbook.html?page=1> (Pristupljeno: 14.8.2022.)
16. Oveisi-Fordiie, E. 2011: Durability of wood pellets, The faculty of graduate studies, Chemical and Biological Engineering, The University of British Columbia, Vancouver. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0059152> (Pristupljeno 20.8.2022.)

17. Pradhana, P., Mahajan, S.M., Arora, A. 2018: Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review, *Fuel Processing Technology* Vol. 181, No. 1: 215-232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021> (Pristupljeno 14.8.2022)
18. Pirc Barčić, A., Grošel, P., Oblak, L., Motik, D., Kaputa, V., Glavonjić, B., Bego, M., Perić, I. 2020: Possibilities of Increasing Renewable Energy in Croatia, Slovenia and Slovakia – Wood Pellets, *Drvna industrija*, Vol. 71 No. 4: 395-402. <https://doi.org/10.5552/drwind.2020.2024> (Pristupljeno: 20.8.2022.)
19. Risović, S., Đukić, I., Vučković, K. 2008: Energy Analysis of Pellets Made of Wood Residues, Vol. 29 No.1, 95-108, Fakultet Šumarstva i drvne tehnologije, Zagreb, <https://hrcak.srce.hr/28933> (Pristupljeno 16.8.2022.)
20. Samuelsson, R., Thyrel, M., Sjöström, M., Torbjörn, A., Lestander. 2009: Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality, *Fuel Processing Technology*, Vol. 9, Issue 9: 1129-1134. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.007> (Pristupljeno: 18.8.2022.)
21. Souza H. J. P., Muñoz, F., Mendonça, R. T., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., Souza, D.P.L., Protásio, T. Rodríguez-Soalleiro, T.P.R. 2021: Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass, *Renewable Energy* Vol. 163, 2021: 1802-1816. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120316311> (Pristupljeno: 22.8.2022.)
22. Šegon, V., Šimek, T., Oradini, A., Marchetti, M. 2014 Priručnik za učinkovito korištenje biomase (prijevod izvornika 'Manual for Effective Utilisation of Biomass', 2014), Hrvatski šumarski institut, Zagreb, Hrvatska. <https://www.sumins.hr/wp-content/uploads/2017/08/Prirucnik.Biomasa-hrv.pdf> (Pristupljeno: 18.8.2022.)
23. Tumuluru, J. S., Wright C. T., Kenny, K. L., Hess, J. R. 2010: A Review on Biomass Densification for Energy Applications, Idaho National Laboratory, Idaho, USA. https://www.researchgate.net/publication/236941299_A_Review_on_Biomass_Densification_for_Energy_Applications (Pristupljeno 23.8.2022.)

24. Ungureanu, N., Vladut V., Biris, S.S., Dinca M. 2016: A review on the durability of biomass pellets, 5th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, GoldenSands, Bulgaria.
https://www.researchgate.net/publication/304996695_A_REVIEW_ON_THE_DURABILITY_OF_BIOMASS_PELLETS (Pristupljeno 14.8.2022.)
25. Ungureanu, N., Vladut, V., Voicu, G., Dinca, M. 2018: Influence of biomass moisture content on pellet properties – review, 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Jelgava, Latvia
https://www.researchgate.net/publication/325313502_Influence_of_biomass_moisture_content_on_pellet_properties_-_review (Pristupljeno: 14.8.2022.)
26. Whittaker, C. Shield, I. F., 2017: Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 71 (May,2011): 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119> (Pristupljeno 18.8.2022.)
27. Wolfgang, S., Sanadi, A.R., Shang, L., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B. 2012: Recent developments in biomass pelletization – a Review, Bioresources, Vol. 7, No. 3, 4451-4490. DOI: 10.15376/biores.7.3.4451-4490 (Pristupljeno 16.8.2022.)

9. POPIS SLIKA

Slika 1. Drvni peleti	4
Slika 2. Prstenasta matrica	6
Slika 3. Ravna matrica	6
Slika 4. Dural tester.....	13
Slika 5. Silos za skladištenje peleta	13
Slika 6. Potrošačke vreće za pelete	14
Slika 7. Navlaživanje (kondicioniranje) uzoraka peleta u klima komori.....	17
Slika 8. Prosijavanje peleta u situ okruglih otvora 3,15 mm	18
Slika 9. Analitička vaga	18
Slika 10. Uzorci u sušioniku	19
Slika 11. Uzorci u eksikatoru.....	19
Slika 12. Uređaj za određivanje mehaničke izdržljivosti peleta (pelet-tester).....	20
Slika 13. Vaganje prosijanih peleta	21
Slika 14. Ligno-tester.....	22
Slika 15. Vaganje uzoraka za ispitivanje na ligno-testeru	23
Slika 16. Mjerenje promjera i duljine peleta s mikrometrom	24
Slika 17. Uzorci za određivanje dimenzijske stabilnosti raspoređeni u posudice	24

10. POPIS GRAFOVA

Graf 1. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 1	25
Graf 2. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 2	26
Graf 3. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 3	27
Graf 4. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 4	28
Graf 5. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 5	29
Graf 6. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 6	30
Graf 7. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 7	31
Graf 8. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 8	32
Graf 9. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 9	33
Graf 10. Ovisnost mehaničke izdržljivosti peleta o sadržaju vode kod proizvođača 10 ..	34
Graf 11. Ovisnost mehaničke izdržljivosti mjerene na ligno-testeru o sadržaju vode kod svih 10 proizvođača	35
Graf 12. Ovisnost mehaničke izdržljivosti mjerene na pelet-testeru o sadržaju vode kod svih 10 proizvođača	35
Graf 13. Usporedba ovisnosti mehaničke izdržljivosti o sadržaju vode za ligno-tester i pelet-tester	36
Graf 14. Promjene dimenzija peleta u radijalnom smjeru s obzirom na početnu vrijednost	37
Graf 15. Promjene dimenzija peleta u longitudinalnom smjeru s obzirom na početnu vrijednost	38
Graf 16. Odnos sadržaja vode i promjene dimenzija u radijalnom smjeru	39
Graf 17. Odnos sadržaja vode i promjene dimenzija u longitudinalnom smjeru	39

11. POPIS TABLICA

Tablica 1. Granične vrijednosti najvažnijih parametara peleta.....	15
--	----

12. DODACI

Proizvođač	Početni sadržaj vode (%)	Konačni sadržaj vode (%)	apsolutno povećanje vode s obzirom na početni sadržaj (%)	Početna meh. Izdržljivost-pelet tester (%)	Konačna meh. Izdržljivost-pelet tester (%)	Početna meh. Izdržljivost-ligno tester (%)	Konačna meh. Izdržljivost-ligno tester (%)	apsolutno smanjenje meh. Izdržljivosti-pelet tester (%)	apsolutno smanjenje meh. Izdržljivosti-ligno tester (%)
Proizvođač 1	6.88	9.83	2.95	98.81	98.45	98.50	97.87	0.37	0.63
Proizvođač 2	5.69	8.50	2.81	99.10	98.95	99.27	98.63	0.15	0.63
Proizvođač 3	6.62	9.48	2.86	99.14	98.92	98.90	98.27	0.22	0.63
Proizvođač 4	6.68	9.25	2.58	98.91	98.47	98.67	97.50	0.44	1.17
Proizvođač 5	6.89	9.42	2.52	98.91	98.57	98.73	98.43	0.33	0.30
Proizvođač 6	6.67	9.02	2.34	97.60	96.39	97.23	95.33	1.21	1.90
Proizvođač 7	6.22	9.60	3.38	98.87	98.54	98.27	97.93	0.33	0.34
Proizvođač 8	6.31	9.34	3.03	99.28	99.05	99.23	99.13	0.23	0.10
Proizvođač 9	8.38	10.32	1.94	97.45	96.78	97.44	95.24	0.67	2.20
Proizvođač 10	5.40	8.38	2.99	98.55	98.01	98.83	98.27	0.53	0.57
Minimalna vrijednost	5.40	8.38	1.94	97.45	96.39	97.23	95.24	0.15	0.10
Maksimalna vrijednost	8.38	10.32	3.38	99.28	99.05	99.27	99.13	1.21	2.20