

DOPRINOS ISTRAŽIVANJU SVOJSTAVA PELETA OD DRVA TUROPOLJSKOG KRAJA

CONTRIBUTION TO THE RESEARCH ON WOOD PELLET CHARACTERISTICS FROM TUROPOLJE AREA

Branimir ŠAFRAN¹, Matija JUG¹, Kristijan RADMANOVIĆ¹, Marin HASAN², Kristijan AUGUSTINOVIĆ¹, Krešimir VUČKOVIĆ³, Stjepan RISOVIĆ¹

Sažetak

U ovome radu analiziraju se kvalitativna svojstva peleta izrađenih iz vrsta drva turopoljskog kraja – sadržaj pepela, ogrjevna vrijednost, gustoća peleta i tlačna čvrstoća. Prikupljeni su uzorci hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), običnoga graba (*Carpinus betulus* L.), poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl.), crne johe (*Alnus glutinosa* L.) i crne topole (*Populus nigra* L.). Prikupljeni i okorani uzorci usitnjeni su na mlinu s noževima na granulaciju 2,00 mm. Na uzorcima je ispitan sadržaj vode, pepela i ogrjevna vrijednost. Sadržaj pepela određen je zasebno za koru i drvo. Sadržaj pepela u kori pokazuje visok udio kod hrasta lužnjaka koji iznosi 13,64 % i graba sa 11,91 %, dok je kod ostalih vrsta udio pepela u kori između 7 i 10 %. Sadržaj pepela okoranog drva pokazuje vrijednosti 0,63 % za hrast, 0,50 % za jasen, 0,46 % za grab. Vrijednosti sadržaja pepela kod johe i topole bile su oko 0,4 %. Rezultati ukazuju na potrebu okoravanja u proizvodnji peleta s ciljem postizanja kvalitete peleta klase A1 i A2. Određivanjem ogrjevnosti najbolji rezultati utvrđeni su kod uzorka drva crne topole koja iznosi 19,63 MJ/g, a najmanja vrijednost izmjerena je kod uzorka graba 18,94 MJ/g. Nadalje, navedeni uzorci pomiješani su te su formirane 3 grupe mješavina. Udio tvrdih vrsta listača hrasta, graba i jasena u svakoj pojedinoj mješavini bio je 60 % dok su u preostalom udjelu od 40 % jednoliko sudjelovale joha (20 %) i topola (20 %). Formirane mješavine materijala JTJ (jasen 60 : topola 20 : joha 20), HTJ (hrast 60 : topola 20 : joha 20) i GTJ (grab 60 : topola 20 : joha 20) prešane su u pelete uz pomoć hidrauličke laboratorijske preše pri 2 veličine sile (3,0 i 6,0 kN) i 2 temperature (150 i 200 °C). Po isprešanju, peleti su ostavljeni 15 dana da se dimenzijski stabiliziraju te su im određene dimenzije i gustoća. Peleti su potom ispitani na tlačnu čvrstoću u radijalnom smjeru pomoću kidalice. Peleti iz svih mješavina, prešani silom 6,0 kN kod temperature 200 °C pokazali su visoku gustoću koja je bila u rasponu 1 207 – 1 234 kg/m³. Peleti osnovne mješavine jasena dali su kod sile 3,0 kN i temperature 200 °C vrlo visoku gustoću od ≈ 1200 kg/m³, dok su općenito najmanju gustoću imali peleti osnovne mješavine graba kod svih režima prešanja. Rezultati tlačne čvrstoće u radijalnom smjeru pokazuju najbolje rezultate kod peleta prešanih pri 6,0 kN i 200 °C i to 13,59 MPa kod osnovne mješavine jasena, 11,1 MPa mješavine hrasta i 9,06 MPa mješavine graba.

Ako se tlačna čvrstoća peleta promatra zbirno prema mješavini, značajno bolje rezultate daju peleti izrađeni iz mješavine jasena, topole i johe u usporedbi s ostale dvije mješavine.

KLJUČNE RIJEČI: drvni peleti, sadržaj pepela, ogrjevna vrijednost, gustoća peleta, tlačna čvrstoća

¹ Dr. sc. Branimir Šafran, dr. sc. Matija Jug, dr. sc. Kristijan Radmanović, Kristijan Augustinović, mag. ing. teh. lign., prof. dr. sc. Stjepan Risović, srisovic@sumfak.hr, Department of Processes Engineering, Faculty of Forestry, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

² Doc. dr. sc. Marin Hasan, Department of Wood Science, Faculty of Forestry, University of Zagreb, Zagreb, Croatia

³ Doc. dr. sc. Krešimir Vučković, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Croatia

1. UVOD INTRODUCTION

Svjetske energetske potrebe rastu iz dana u dan, a milijuni kubnih metara stakleničkih plinova ispuštaju se u atmosferu, od čega 80 % nastaje izgaranjem fosilnih goriva. Budući da je biomasa CO₂ neutralni energent, ona ne povećava emisiju stakleničkih plinova, a CO₂ oslobođen tijekom izgaranja biomase reciklira se kao dio ugljikova ciklusa. Primjena biomase u proizvodnji toplinske i električne energije značajna je zbog potrebe smanjenja emisija stakleničkih plinova, kao i zbog ovisnosti o uvozu sve skupljih fosilnih goriva, koja uglavnom dolaze s politički nestabilnih područja i njihova dobava često je upitna. Domac i dr. (2015) u svome radu propituju može li biomasa pokrenuti energijsku tranziciju u Hrvatskoj i zemljama Jugoistočne Europe. Glavni cilj istraživanja u radu je prepoznavanje prepreka i upravljačkih programa za projekte na biomasu te preporuka nekih praktičnih smjernica. U istom radu je prepoznat velik broj potencijalnih skupina prepreka za korištenje šumske biomase; gospodarska ograničenja, financijska ograničenja kao ozbiljna prepreka za mnoge lokalne samouprave, društvena ograničenja, ograničenja u ljudskim resursima, ograničenja zbog transparentnosti te na kraju tehnička ograničenja.

Iskorištavanje energije šumske biomase, uglavnom ogrjevnog drva, u Hrvatskoj ima dugu tradiciju. Potencijal Hrvatske vidljiv je iz podataka pokrivenosti šumom od 48 %, drvene zalihe ≈ 550 mil. m³, godišnjeg prirasta ≈ 11 mil. m³ te sječivog etata hrvatskih šuma od gotovo 8 mil. m³ čime je osigurana potrajnost gospodarenja (Risović, 2003). U svome radu Drvodelić i Oršanić (2016) naglašavaju važnost poljskog jasena u posavskim nizinskim šumama zbog brzine rasta i kratke ophodnje u usporedbi s hrastom lužnjakom.

Šumska biomasa potječe iz proizvoda šumarstva i drvno-prerađivačke industrije. Posljednje godine prošloga stoljeća Risović i Domac (1999) opisali su stanje korištenja i energijski potencijala biomase iz drvno-prerađivačke industrije u Zagrebačkoj županiji, a 2002. godine u članku „Burza drvnog ostatka u Hrvatskoj“, navode da bi do uspostave uspješnog sektora korištenja energije iz biomase u Hrvatskoj, izvozom drvnoga ostatka mogla biti ostvarena višestruka korist. Bez obzira na to radi li se o otpacima ili ostacima iz šumarstva (drvnu, granju, kori, lišću, korijenju) ili pak o proizvodima ciljanog uzgoja (brzorastuće drveće) i ona se pojavljuje u četiri osnovna uporabna oblika: cjepanice, sječka, briketi i peleti (Labudović, 2012). Da bi se šumska biomasa mogla koristiti u automatiziranim sustavima proizvodnje toplinske i električne energije, mora se najprije usitniti, kako bi se dobila homogena smjesa prikladna za automatizirane sustave doziranja u ložište. Nasipna gustoća komercijalne drvene sječke u rasponu je

između 150 i 200 kg/m³ i uglavnom je niža od čvrstog drva iz kojega je proizvedena (Robbins, 1982). Udaljenosti između mjesta sakupljanja biomase i lokacije na kojoj se ona prerađuje ili koristi u proizvodnji energije često su velike, što dovodi do skupe logistike (Stelte, 2011a). Zbog navedenog razloga utvrđena je ekonomski prihvatljiva udaljenost transporta rasute biomase od 50 do 60 km od mjesta sakupljanja do mjesta prerade ili spaljivanja.

Usitnjavanjem drva i njegovim prešanjem u pelete stvoreno je gorivo koje je doseglo razinu automatizirane uporabe kao i fosilna goriva, a time i svu lagodnost koju pri korištenju osiguravaju tekuća i plinovita goriva (Risović, 2008). Prosječna gustoća peleta kreće se u rasponu 1000 – 1400 kg/m³ dok je nasipna gustoća peleta do 700 kg/m³ (Stelte, 2011b). Glavne prednosti peleta u usporedbi s rasutim (neprešanim) čvrstim gorivima su visoka nasipna i energijska gustoća, što rezultira manjim skladišnim prostorom, manjim transportnim troškovima, visokom energijskom učinkovitošću i većom strukturnom homogenošću. Uz to, smanjen sadržaj vode (8 – 10 %) povećava mogućnost dugotrajnog skladištenja (Holm, 2006). Navedena pozitivna svojstva peleta sve se više koriste u malim i velikim kogeneracijskim postrojenjima. Burkhardt (2017) u svome radu opisuje kogeneracijski uređaj (50 kW_{el} i 110 kW_{th}) s vrlo visokim električnim stupnjem korisnosti od 25 %. Ohrabrujući električni stupanj korisnosti od 15 % na malom Stirling motoru, 30 kW toplinske snage i 5 kW električne dobio je Aigenbauer (2017) koristeći pelete kao nositelja energije.

2. MATERIJALI I METODE MATERIALS AND METHODS

2.1. Priprema uzoraka – *Sample preparation*

S područja gospodaraske jedinice Turopoljski lug prikupljeni su uzorci pet vrsta drva: hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.), običnog graba (*Carpinus betulus* L.), poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl.), crne johe (*Alnus glutinosa* L.) i crne topole (*Populus nigra* L.). Prikupljeni uzorci okorani su te potom usitnjeni na mlinu s noževima *Retsch SM 300*, pomoću sita četvrtastog otvora 2,00 mm. Osim drva usitnjena je i kora svih uzoraka. Frekvencija vrtnje noža bila je 1 500 min⁻¹.

2.2. Određivanje sadržaja vode i pepela prema HRN ENISO 18122:2015 – *Determining water and ash content according to HRN EN ISO 18122:2015*

Usitnjenim uzorcima drva i kore određen je sadržaj vode. S obzirom da su uzorci prikupljeni na različitim mjestima i u različitim uvjetima, sadržaj vode u drvu nije bio ujednačen kod svih uzoraka, a postojala su i određena odstupanja unutar pojedine vrste drva. Postupak određivanja sa-

držaja vode u drvu vršio se istovremenim vaganjem i sušenjem 1 g uzorka pomoću IC vage Sartorius MA 150 zagrijavanjem uzorka na temperaturu 103 ± 2 °C.

Određivanje sadržaja pepela provodilo se žarenjem uzoraka u mufolnoj peći Nabertherm L9/13/B180 prema normi HRN EN ISO 18122:2015. Zagrijavanje započinje jednolikim podizanjem temperature do 250 °C u vremenu 30 min. Postignuta temperatura zadržava se sljedećih 60 min radi isparavanja hlapivih komponenti drva. Nakon 60 min slijedi daljnje zagrijavanje do temperature 550 ± 10 °C, tj. počinje žarenja uzorka kroz idućih 30 min. Postignuta temperatura zadržava se sljedećih 120 min.

Sadržaj pepela određuje se prema formuli (1):

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (1)$$

gdje je:

A_d – sadržaj pepela – *ash content*, %

m_1 – masa posude – *vessel mass*, g

m_2 – masa posude i uzorka prije žarenja – *vessel and sample mass before annealing*, g

m_3 – masa posude i uzorka nakon žarenja – *vessel and sample mass after annealing*, g

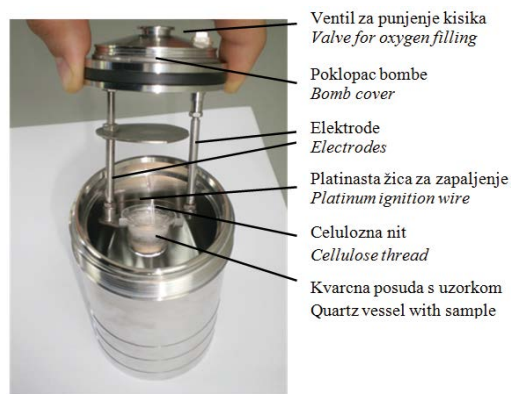
m_u – masa uzorka – *sample mass*, g

M_{ad} – sadržaj vode – *water content*, %

2.3. Određivanje gornje ogrjevne vrijednosti – Determining higher calorific value

Ispitivanje ogrjevne vrijednosti odvija se u 2 faze. Prva je priprema uzoraka za mjerenje, prešanjem tableta minimalne mase $1 \pm 0,1$ g. Tablete promjera 13 mm prešane su silom 40 kN pomoću hidraulične preše i kalupa za izradu tableta. Vrijeme prešanja iznosilo je oko 10 s.

Druga faza je samo mjerenje gornje ogrjevne vrijednosti koja je ispitana kalorimetrom IKA C200. Osnovni dijelovi kalorimetra su: kalorimeterska bomba, posuda kalorimetra, mješalica i temperaturni osjetnik. Ispitivanje počinje pripremom kalorimeterske bombe (slika 1). U kalorimetersku bombu ulije se 5 ml destilirane vode. Za neposredno zapaljenje tablete, koristi se celulozna nit koja se u obliku omče pričvrsti za platinastu žicu spojenu s elektrodom na poklopcu bombe. Celulozna nit mora se namjestiti u kvarcnu posudu, jer uzorak u obliku tablete mora biti u kontaktu s niti, kako bi prilikom ispitivanja došlo do zapaljenja i sagorijevanja tablete. Nakon što se bomba pripremi i zatvori poklopcem s navojem, puni se kisikom čistoće 99,5 % pod tlakom od 3 MPa. U kalorimetar se potom odlaže bomba i puni spremnik za vodu. U spremnik za vodu ulije se 3 l vode temperature 18 – 25 °C radi određivanja promjene temperature tijekom izgaranja. Prije početka ispitivanja, zatvara se poklopac kalorimetra i unosi se prethodno izvagana masa uzorka (tablete) na digitalni zaslon uređaja.



Slika 1. Priprema kalorimeterske bombe
Figure 1. Preparation of a calorimeter bomb

Mjerenje traje približno 15 min, a odvija se u 3 slijeda: **a**) miješanje i stabilizacija temperature vode, **b**) paljenje i izgaranje, **c**) izjednačavanje temperature vode

Princip mjerenja ogrjevne vrijednosti može se prikazati izrazom (2).

$$H_g = (C \times dT - Q_1 - Q_2) / m_g \quad (2)$$

pri čemu je:

H_g – gornja ogrjevna vrijednost uzorka – *higher calorific value of a sample*, J/g

dT – povećanje temperature vode tijekom mjerenja - *water temperature increase during measurement*

Q_1 – korekcijska vrijednost topline dobivene iz celulozne niti (50 J) - *heat correction value obtained from a cellulose thread (50 J)*

Q_2 – korekcijska vrijednost topline iz drugih gorivih dodataka (npr. kapsula za izgaranje...) - *correction heat value from other burning supplements (e.g. ignition capsules...)*

m_g – masa uzorka - *sample mass*, g

C – 'C' vrijednost' kalorimeterske bombe - *bomb calorimeter value*, J/K

2.4. Priprema smjese i kondicioniranje – Mixture preparation and conditioning

Pripremljeni i usitnjeni uzorci drva pomiješani su i fomi-rane su 3 grupe mješavina. Udio tvrdih vrsta listača hrasta, graba i jasena u svakoj pojedinoj mješavini bio je 60 %, dok su u preostalom udjelu od 40 % jednoliko sudjelovale joha (20 %) i topola (20 %). Formirane su mješavine materijala JTJ (jasen 60 : topola 20 : joha 20), HTJ (hrast 60 : topola 20 : joha 20) i GTJ (grab 60 : topola 20 : joha 20). Omjeri miješanja odredili su se prema prethodno stečenim iskustvima i prema preporukama iz literature s ciljem dobivanja što kvalitetnijih peleta. U obzir je uzeta zastupljenost vrsta drva lokaliteta s kojeg su uzeti uzorci. Uzorci su prikupljeni



Slika 2. Posuda za kondicioniranje uzoraka s ugrađenim termo-higrometrom

Figure 2. A vessel for sample conditioning with installed thermo-hygrometer

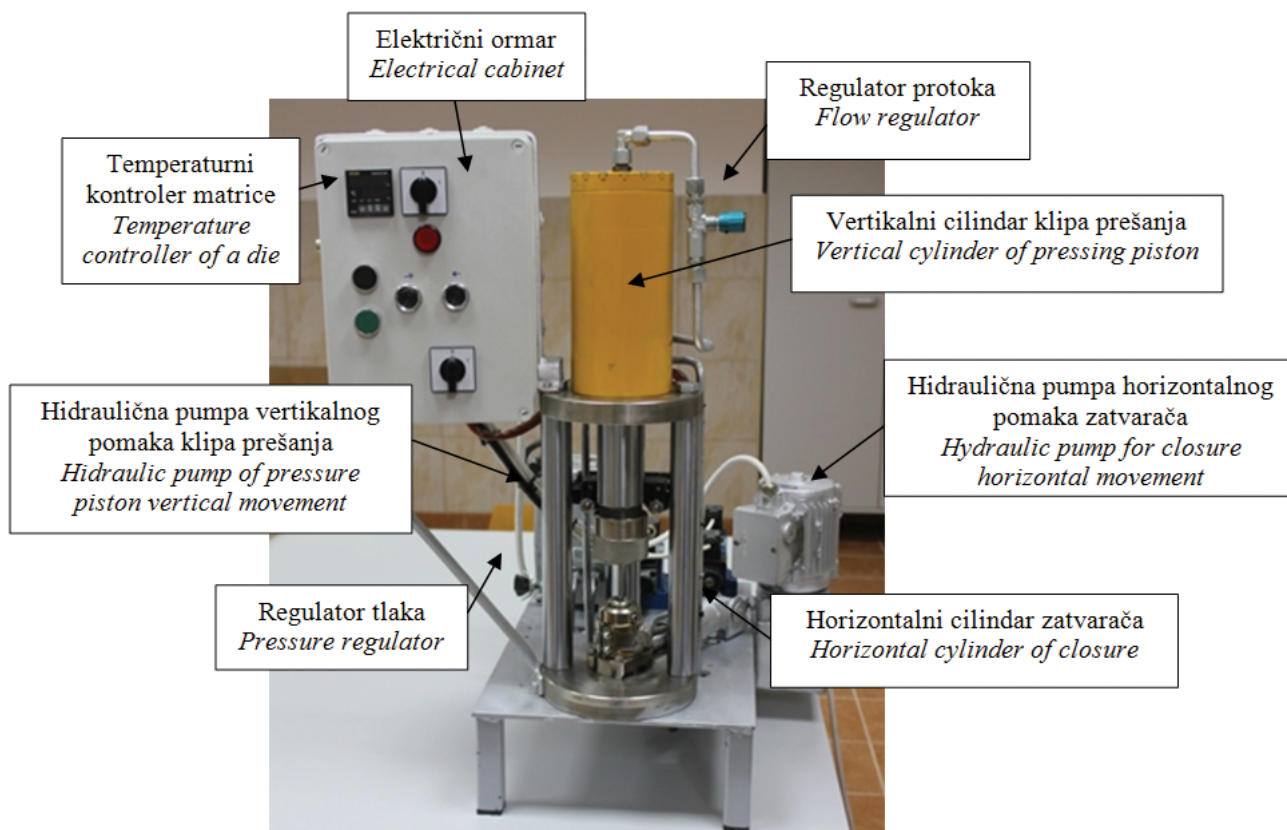
s različitim mjestima na navedenom području te su bili različitog sadržaja vode pa je bilo potrebno izvršiti kondicioniranje. Ono je provedeno u određenom periodu pomoću otopine prezasićene soli amonijevog nitrata (NH_4NO_3) do postizanja ravnotežnog sadržaja vode u uzorcima oko 12 %. Zadani uvjeti temperature i relativne vlage zraka postigli

su se i kontrolirali u zatvorenim posudama (slika 2) i pratili pomoću uređaja za mjerenje temperature i relativne vlage zraka (termo-higrometra).

2.5. Izrada peleta laboratorijskom prešom – *Pellet making by a laboratory press*

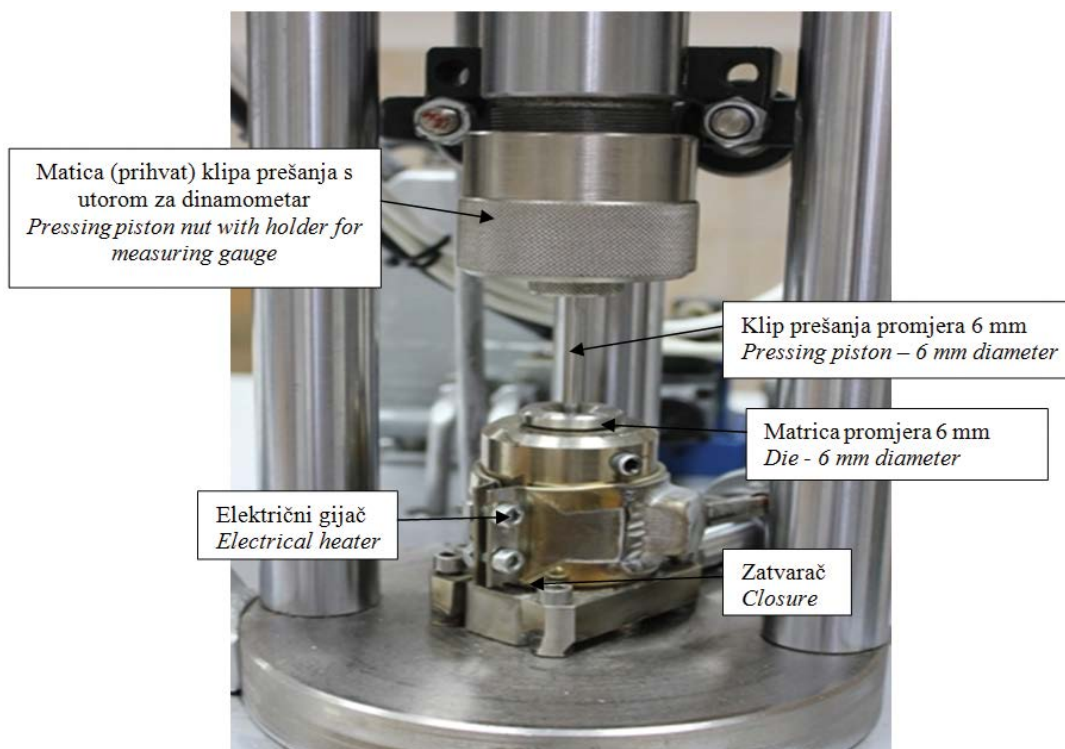
Prešanje je vršeno na hidrauličnoj laboratorijskoj preši koja se sastoji od dva odvojena hidraulična sklopa pokretana hidrauličnom pumpom: **a)** vertikalnog kojim se ostvaruje tlak prešanja **b)** horizontalnog koji služi za pomak zatvarača. Vertikalni i horizontalni sklop neovisni su jedan o drugome, tako da je kod vertikalnog sklopa moguće regulirati tlak. Preša je također opremljena električnim grijačem snage 300 W te regulatorom temperature matrice - *Sestos PID* temperaturnim kontrolerom. U svrhu ovog eksperimenta preša je dodatno opremljena mjernom opremom za mjerenje sile (dinamometrom) *HBM C9C / 20 kN* koji se ulaže u utor matice klipa prešanja. Vrijednosti sile mjerene su uz pomoć mjernog pojačala *HBM Spyder 8* i softvera *Catman 4.0*.

Glavni dijelovi jedinice za peletiranje prikazani su na slici 4. Pomoću grijača i regulatora temperature matrica se zagrije i održava na željenoj temperaturi, dok je pomoću regulatora pomaka i tlaka prešanja moguće definirati brzinu pomaka i silu (tlak) prešanja peleta.



Slika 3. Glavni konstrukcijski dijelovi laboratorijske preše za pelet

Figure 3. Main construction parts of the pellet laboratory press



Slika 4. Glavni konstrukcijski dijelovi jedinice za peletiranje
Figure 4. Main construction parts of the pelleting uni

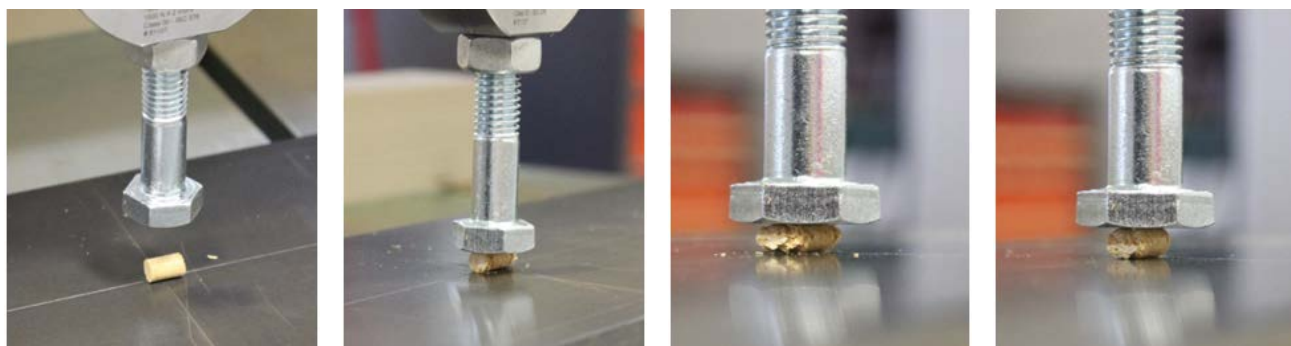
Pripremljene mješavine kondicionirane na 12 % sadržaja vode, odvagane su na analitičkoj vagi za svaku skupinu 10 uzoraka mase 0,25 g, te na opisanoj opremi prešane u pelete.

Prije prešanja matrica je zagrijana na željenu temperaturu (150 i 200 °C). Sila prešanja se mijenjala i iznosila je najviše 3,0 i 6,0 kN uz vrijeme prešanja 30 s. Poslije prešanja pelet je nakon kratkog hlađenja odložen u plastične posudice s poklopcem, kako bi se zadržali stalni klimatski uvjeti. Tako spremljeni i označeni peleti stabilizirani su 15 dana kako bi se dimenzijski ujednačili. Dimenzije i masa isprešanih peleta mjerene su i zabilježene nakon 15 dana, a podaci statistički obrađeni.

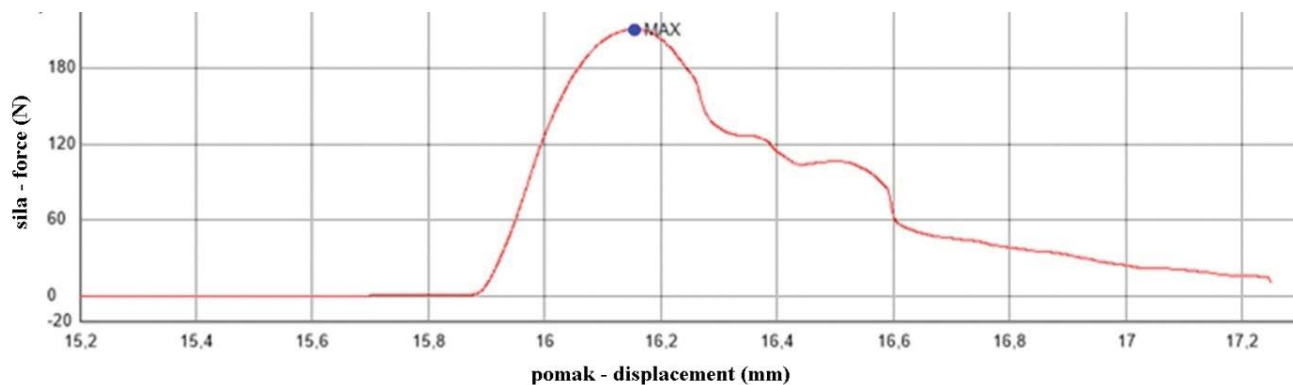
2.6. Određivanje tlačne čvrstoće peleta u radialnom smjeru – *Determining pellet pressure strength in a radial direction*

Tlačna čvrstoća maksimalno je naprezanje koje pelet može izdržati prije pojave loma. Ona se određuje testovima tlačenja u radialnom smjeru. Tlačni testovi predstavljaju brze metode ispitivanja u proizvodnji radi podešavanja parametara proizvodnje i povećanja kakvoće peleta.

Nakon mjerenja dimenzija i mase peleta, određivana je maksimalna vrijednosti sile pri tlačnom ispitivanju peleta na kidalici *Shimadzu Autograph AG - X plus*. Za ispitivanje je bilo pripremljeno 120 uzoraka peleta, po 10 uzoraka za svaku mješavinu. Nakon pripreme uzoraka, uslijedio je po-

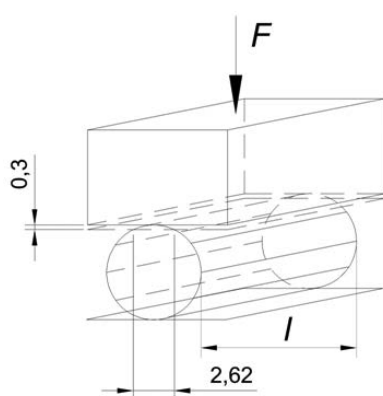


Slika 5. Ispitivanje tlačne čvrstoće peleta u radialnom smjeru – tijekom ispitivanja
Figure 5. Examining pellet pressure strength in a radial direction – examination course



Slika 6. Hookeov dijagram prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće

Figure 6. Hooke's diagram while examining pressure strength

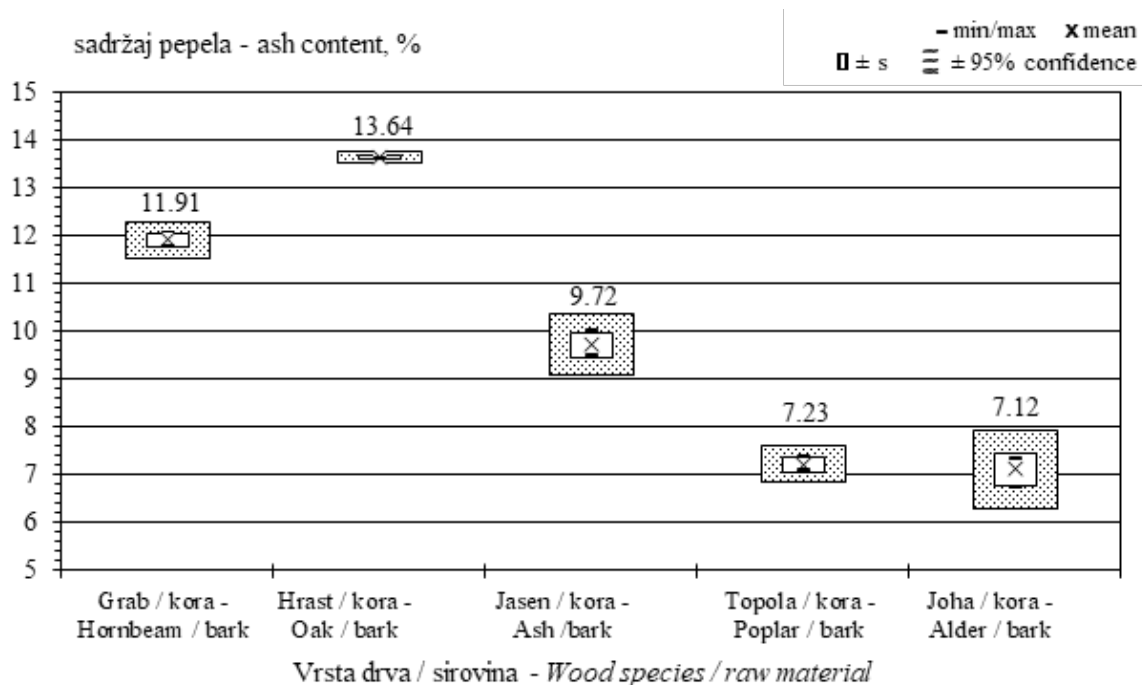


stupak tlačnog ispitivanja na kidalici opremljenoj mjernom dozom (dinamometrom) 1 000 N i pripadajućim softverom *Trapezium X* (slika 5) pomoću kojega je programiran tijek ispitivanja.

Naknadnom analizom i obradom podataka određene su vrijednosti naprezanja pri maksimalnoj sili prema projiciranoj površini koja je definirana grafičkom analizom Hookeovih dijagrama (slika 6). Dubina utiskivanja tlačnog elementa kod postizanja maksimalne sile kretala se u rasponu 0,25 – 0,35 mm, stoga je u proračun uzeta prosječna dubina 0,3 mm koja definira tlačnu površinu kao umnožak utisnute širine 2,62 mm i izmjerene duljine peleta (slika 7).

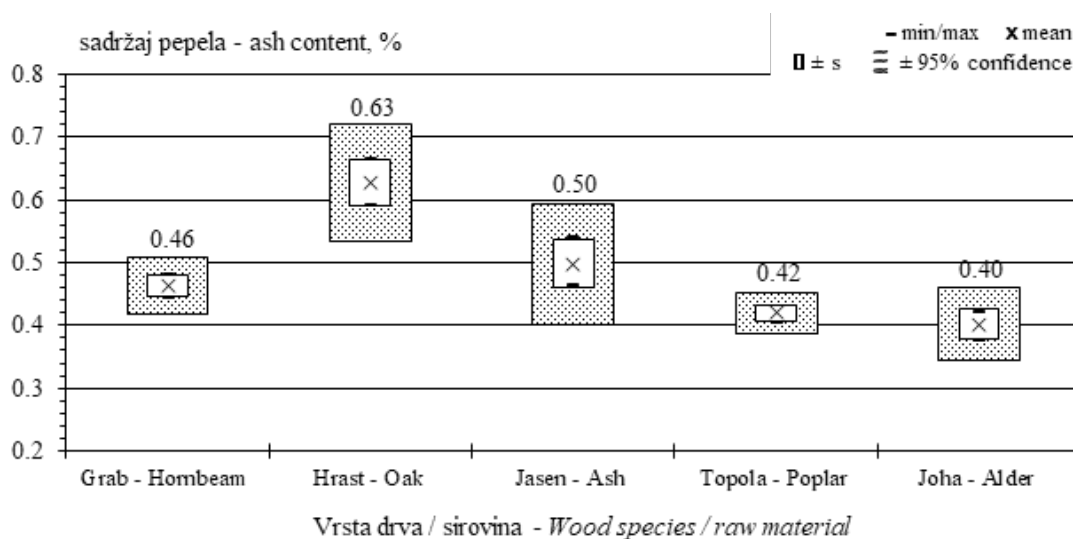
Slika 7. Definiranje tlačne površine prilikom ispitivanja peleta

Figure 7. Defining pressure area during pellet testing



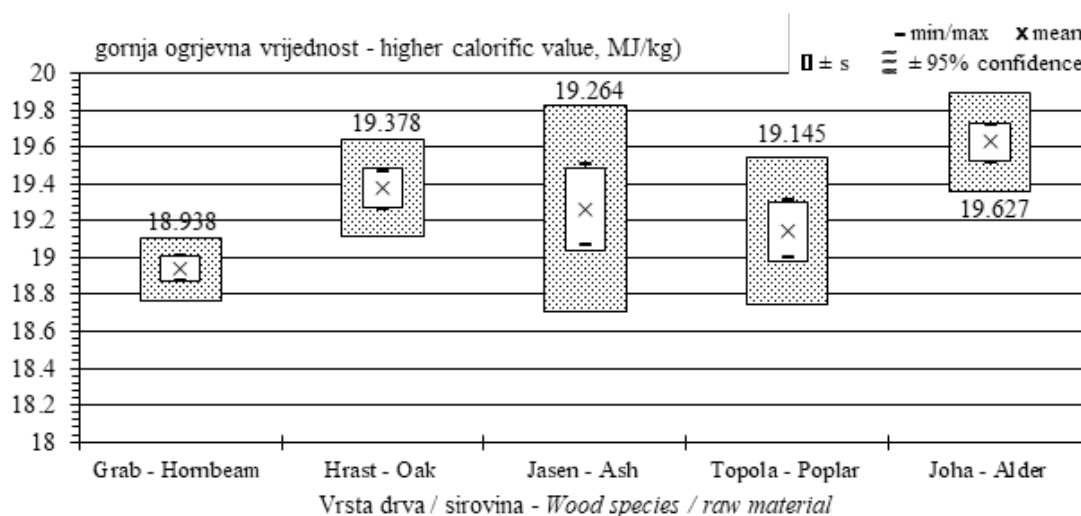
Slika 8. Prikaz sadržaja pepela kore osnovne sirovine

Figure 8. Overview of bark ash content of the basic raw material



Slika 9. Prikaz sadržaj pepela osnovne sirovine

Figure 9. Overview of ash content of the basic raw material



Slika 10. Prikaz ogrjevna vrijednost uzoraka drva pri 0 % sadržaja vode

Figure 10. Overview of calorific value of wood samples at 0 % of water content

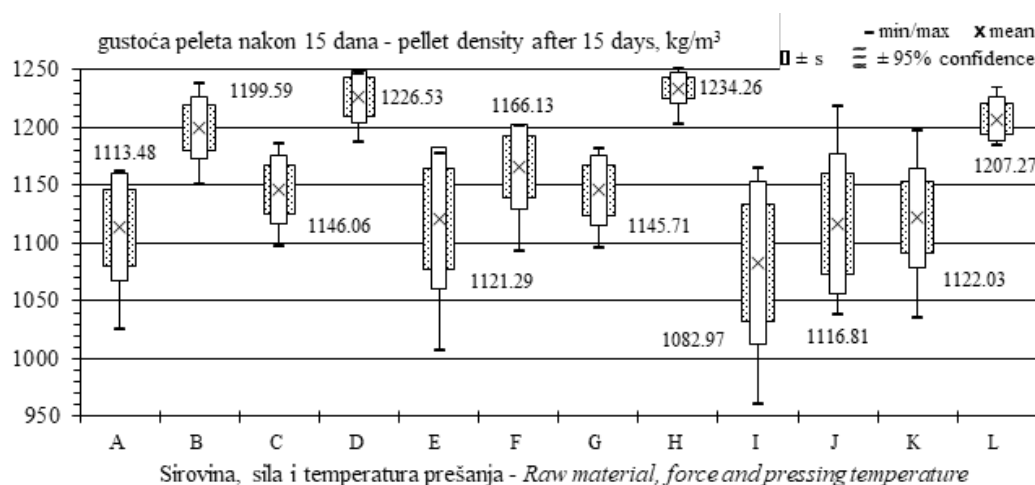
3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA RESEARCH RESULTS

3.1 Rezultati istraživanja sadržaja pepela – Ash content research results

Na slici 8 prikazan je udio sadržaja pepela kore istraživanih vrsta. Iz dijagrama je vidljiv visok udio pepela uzoraka kore hrasta, a on prosječno iznosi 13,64 % dok kod kore graba prosječno iznosi 11,91 %. Sadržaj pepela relativno je nizak kod kore johe i topole, a kreće se prosječno oko 7 %. U prethodnim istraživanjima (Šafran, 2015) analiziran je maseni udio kore johe i graba. Analiza je pokazala da maseni udio kore kod drva johe iznosi 10 – 12 %, a graba 5-7 %, zbog čega se ukupna količina pepela kod izgaranja obje vrste neće značajno razlikovati bez obzira na udio pepela u kori.

Iz navedenih razloga vidi se potreba okoravanja drvene sirovine prije usitnjavanja na mlinu zbog velike količine pepela sadržanog u kori, a često i zbog visokog udjela kore u ukupnoj masi drva. Pripremljeni uzorci bili su posječeni u sastojini te izneseni i manipulirani ručno. Zbog strojne manipulacije i izvlačenja trupaca iz šume koja se najčešće provodi, u koru se zabiju zemlja, kamenje te ostale nečistoće koji kasnije stvaraju velike probleme u proizvodnji. Nadalje, problemi također nastaju zbog nedovoljne higijene stovarišta, gdje se često mogu vidjeti neuređena stovarišta te trupci koji prije prerađivanja leže u blatu.

Na slici 9 prikazan je udio sadržaja pepela korištenih vrsta drva, a uzorci su prije usitnjavanja okorani. Iz dijagrama je vidljivo da sve vrste imaju nizak sadržaj pepela manji od 0,7 %, što zadovoljava A1 klasu kvalitete peleta. Vidljivo je da



Slika 11. Prikaz gustoće peleta nakon 15 dana stabilizacije dimenzija
Figure 11. Overview of pellet density after 15 days of dimension stabilisation

drvo hrasta među ispitanimima ima prosječno najviši sadržaj pepela 0,63 %, a približno jednako nizak sadržaj pepela imaju drvo graba, topole i johe, koji je nešto viši od 0,4 %.

3.2 Rezultati istraživanja ogrjevne vrijednosti – Calorific value research results

Na slici 10 prikazani su rezultati gornje ogrjevne vrijednosti uzoraka drva pri 0 % sadržaja vode. Prilikom određivanja gornje ogrjevne vrijednosti, uzorci drva imali su određen sadržaj vode koji umanjuje gornju ogrjevnu vrijednost. Hrast i jasen imali su oko 9 % sadržaja vode, a ostale vrste imale su između 11 i 12 % sadržaja vode. Veći sadržaj vode u drvu daje manju ogrjevnu vrijednost uzoraka zbog udjela vode u ukupnoj masi drva te utroška energije potrebne za isparavanje prisutne vode. Dijagram gornje ogrijevanje vrijednosti pri 0 % sadržaja vode pokazuje najbolju vrijednost kod drva johe koji iznosi 19,627 MJ/kg, dok je najniži rezultat bio kod uzorka drva graba \approx 18,938 MJ/kg.

3.3 Rezultati istraživanja gustoće i tlačne čvrstoće peleta – Research results of density and pellet pressure strength

Po određivanju osnovnih svojstava sirovine, korištene u ovom istraživanju, uzorci promatranih vrsta drva pomije-

šani su na način opisan u prethodnom poglavlju te su stvorene mješavine koje su kondicionirane. Kondicionirani materijal prešan je u pelete koji su potom stabilizirani 15 dana, nakon čega im je određena gustoća i mehanička čvrstoća u radialnom smjeru.

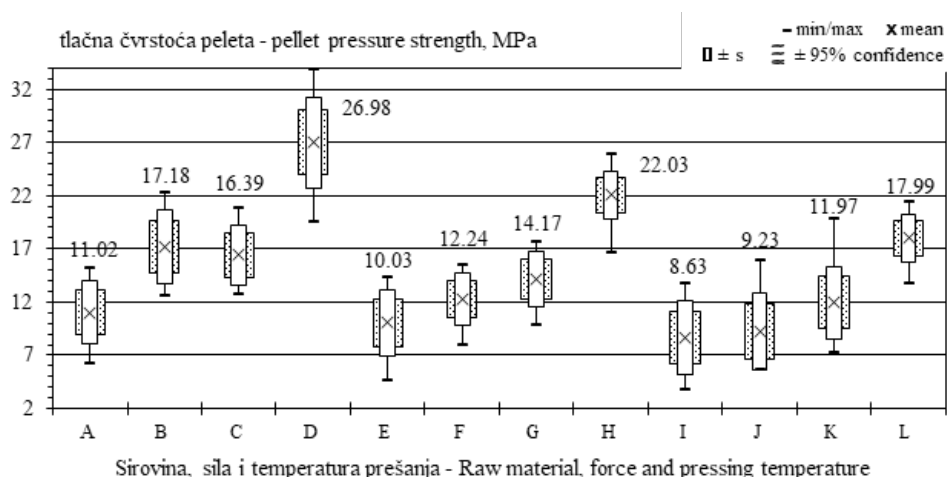
Oznake mješavina koje su korištene u istraživanju:

- A – JTJ 3,0 kN, 150 °C, B – JTJ 6,0 kN, 150 °C,
 C – JTJ 3,0 kN, 200 °C, D – JTJ 6,0 kN, 200 °C,
 E – HTJ 3,0 kN, 150 °C, F – HTJ 6,0 kN, 150 °C,
 G – HTJ 3,0 kN, 200 °C, H – HTJ 6,0 kN, 200 °C,
 I – GTJ 3,0 kN, 150 °C, J – GTJ 6,0 kN, 150 °C,
 K – GTJ 3,0 kN, 200 °C, L – GTJ 6,0 kN, 200 °C.

Iz dijagrama na slici 11 vidljivo je da peleti prešani većom silom i višom temperaturom imaju veću gustoću. Iz dijagrama se vidi da je gustoća gotovo svih peleta prešanih silom 6,0 kN i temperaturom 200 °C veća od 1200 kg/m³. Općenito, svi peleti osnovne mješavine graba pokazuju manju gustoću od ostalih peleta pri istim režimima prešanja. Značajnost utjecaja mješavine, sile i temperature prešanja na gustoću prikazan je u tablici 1. Razlike pri usporedbi peleta osnovne sirovine jasena i graba pri sili 6,0 kN i temperaturi prešanja 150 °C (B-J) te u usporedbi peleta hrasta i graba pri sili 6,0 kN i temperaturi prešanja 200 °C (H-L) su značajne (p

Tablica 1. Ovisnost gustoće peleta o sirovini, sili prešanja i temperaturi
Table 1. Dependence of pellet density on raw material, pressing force and temperature

Utjecaj mješavine na gustoću – Influence of mixture on density												
Usporedba – Comparison	A-E	B-F	C-G	D-H	A-I	B-J	C-K	D-L	E-I	F-J	G-K	H-L
t-vrijednost – t-value	0,612	1,204	0,012	1,126	1,085	3,007	0,678	1,215	0,471	1,924	0,709	2,523
p-vrijednost – p-value, %	55,58	25,94	99,08	28,94	30,60	1,48	51,45	25,54	64,87	8,65	49,64	3,26
Utjecaj sile prešanja na gustoću – Influence of pressing force on density						Utjecaj temperature prešanja na gustoću – Influence of pressing temperature on density						
Usporedba – Comparison	A-B	E-F	I-J	C-D	G-H	K-L	A-C	E-G	I-K	B-D	F-H	J-L
t-vrijednost – t-value	0,283	0,117	1,219	2,088	3,124	0,409	0,381	0,927	1,8	2,315	3,98	4,109
p-vrijednost – p-value, %	78,36	90,91	25,39	6,64	1,22	69,24	71,23	37,84	10,54	4,59	0,32	0,26



Slika 12. Tlačna čvrstoća peleta
Figure 12. Pellet pressure strength

= 1,47 % odnosno $p = 3,26$ %). Također je značajna razlika gustoće peleta hrasta prešanih pri temperaturi 200 °C i silama 3,0 i 6,0 kN (**G-H**) ($p = 1,22$ %). Značajnost u gustoći peleta uočava se usporedbom temperature prešanja 150 i 200 °C kod svih mješavina, prešanih silom 6,0 kN (**B-D**; **F-H**; **J-L**) ($p = 4,59$ %; $p = 0,32$ %; $p = 0,26$ %).

Iz dijagrama na slici 12 vidljivo je da su najbolji rezultati tlačne čvrstoće postignuti kod peleta koji su prešani silom 6,0 kN i pri temperaturi 200 °C, a iznosili su 18 – 27 MPa. Najlošije rezultate postigli su peleti koji su prešani silom 3,0 kN i pri temperaturi 150 °C, a iznosili su 8,5 - 11 MPa. Također je vidljivo da peleti osnovne sirovine jasena daju najbolje rezultate u usporedbi s preostale dvije sirovine u svim režimima prešanja. Peleti iz osnovne sirovine jasena prešani silom 6,0 kN i temperaturom 150 °C daju bolje rezultate od istih prešanih pri 3,0 kN i 200 °C, što nije slučaj kod peleta izrađenih iz osnovnih sirovina hrasta i graba.

Značajnost utjecaja mješavine, sile i temperature prešanja na tlačnu čvrstoću prikazan je u tablici 2. Usporedbom peleta osnovne sirovine jasena u usporedbi s hrastom i grabom pri sili 6,0 kN i temperaturi prešanja 150 °C (**B-F** i **B-J**) vidljiva je značajna razlika ($p = 0,53$ % odnosno $p = 0,58$ %). P-vrijednost 1,17 % pokazuje također značajnu razliku u mehaničkoj čvrstoći peleta osnovne sirovine jasena i graba

pri sili 3,0 kN i temperaturi prešanja 200 °C (**C-K**), dok razlika između peleta hrasta i graba u istim uvjetima nije značajna. Razlika između svih mješavina pri sili 6,0 kN i temperaturi prešanja 200 °C pokazuje značajnu razliku, čime možemo zaključiti da kod navedenih uvjeta prešanja peleti jasena daju najveću čvrstoću, dok su nešto lošiji peleti hrasta, a peleti graba najlošiji.

Analiza utjecaja sile na tlačnu čvrstoću peleta pokazuje značajnu razliku kod peleta mješavine jasena (**A-B** i **C-D**) prešanih pri 150 i 200 °C pri obje sile prešanja ($p = 0,21$ % odnosno 0,01%), dok ta razlika kod hrasta i graba (**E-F** i **I-J**) prešanih pri 150 °C nije značajna ($p = 10,98$ % odnosno $p = 71,78$ %), ali razlika sile prešanja postaje značajna kod temperature 200 °C (**G-H** i **K-L**) ($p = 0,01$ % odnosno $p = 0,12$ %).

Analiza utjecaja temperature na mehaničku čvrstoću peleta pokazuje značajnu razliku kod svih mješavina i sile prešanja, osim kod peleta mješavine graba (**I-K**) prešanih pri 3,0 kN ($p = 5,63$ %).

4. ZAKLJUČAK CONCLUSION

Na temelju dobivenih rezultata možemo zaključiti, da kora svih analiziranih vrsta ima visok udio pepela i prosječno se

Tablica 2. Utjecaj mješavine, sile prešanja i temperature na tlačnu čvrstoću
Table 2. Influence of mixture, pressing force and temperature on pressure strength

Utjecaj mješavine na tlačnu čvrstoću – Mixture influence on pressure strength												
Usporedba - Comparison	A-E	B-F	C-G	D-H	A-I	B-J	C-K	D-L	E-I	F-J	G-K	H-L
t-vrijednost - t-value	0,737	3,658	1,821	3,242	1,673	4,959	3,154	5,904	0,957	2,160	1,618	3,947
p-vrijednost - p-value, %	47,98	0,53	10,19	1,01	12,86	0,08	1,17	0,02	36,35	5,91	14,01	0,34
Utjecaj sile prešanja na tlačnu čvrstoću – Pressing force influence on pressure strength						Utjecaj temperature prešanja na tlačnu čvrstoću – Pressing temperature influence on pressure strength						
Usporedba - Comparison	A-B	E-F	I-J	C-D	G-H	K-L	A-C	E-G	I-K	B-D	F-H	J-L
t-vrijednost - t-value	4,251	1,774	0,373	6,555	7,138	4,648	4,143	3,235	2,19	5,64	9,222	6,415
p-vrijednost - p-value, %	0,21	10,98	71,78	0,01	0,01	0,12	0,25	1,02	5,63	0,03	0,00	0,01

kreće od 7,12 % kod johe pa sve do 13,63 % kod hrasta. Ovako visok udio kore zahtjeva okoravanje, trupaca jer u proizvodnji peleta kvalitete A1 i A2 udio pepela ne smije biti veći od 1,5 %. Usporedbom sadržaja pepela čistog drva, rezultati pokazuju najviši udio pepela kod drva hrasta, dok je on niži kod johe, topole i graba. Najvišu ogrjevnu vrijednost po jedinici mase (MJ/kg) ima drvo johe, dok najnižu od promatranih vrsta ima grab. Analiza gustoće peleta nakon 15 dana stabilizacije, pokazuje da pri istim režimima prešanja peleti mješavina jasena i hrasta daju bolje rezultate od mješavine graba. Također je vidljivo da sila prešanja značajnije utječe na gustoću peleta od temperature prešanja. Analizom tlačne čvrstoće peleta najbolji rezultati dobiveni su kod peleta mješavine jasena, dok je nešto lošiji rezultat kod hrasta, a najlošiji kod graba. Iz dobivenih rezultata mjerenja razvidno je da na tlačnu čvrstoću najviše utječe temperatura i tlak prešanja. Najbolji rezultati tlačne čvrstoće postignuti kod peleta koji su prešani silom 6,0 kN i pri temperaturi 200 °C, gdje je tlačna čvrstoća iznosila od 17,99 Mpa, pa sve do 26,98 MPa.

LITERATURA REFERENCES

- Aigenbauer, S., 2017: Experimental evaluation of a biomass pellet combustion concept developed for a 5 kWel Stirling module. 5. Central European Biomass Conference 18th to 20th January 2017 Graz, Austria: 146
- Burkhardt, C., A. Roskan, 2017: Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplung mit Holzpellets. 5. Central European Biomass Conference 18th to 20th January 2017 Graz, Austria: 161
- Domac, J., M. Jakopović, S. Risović, 2002: BURZA DRVNOG OSTATKA U HRVATSKOJ, Šumarski list, 126(7–8): 401–406., Zagreb.
- Domac, J., S. Risović, V. Šegon, T. Pentek, B. Šafran, I. Papa, 2015: MOŽE LI BIOMASA POKRENUTI ENERGIJSKU TRANZICIJU U HRVATSKOJ I JUGOISTOČNOJ EUROPI?, Šumarski list, 139(11–12): 561–569., Zagreb.
- Drvodelić, D., M. Oršanić, 2016: PROCJENA VITALITETA SVJEŽEG I PRELEŽALOG SJEMENA POLJSKOG JASENA (*Fraxinus angustifolia* Vahl), Šumarski list, 140(11–12): 539–547., Zagreb
- 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* 20: 2686–2694.
- Anon. 2009: HRN EN 14775: Čvrsta biogoriva – Određivanja udjela pepela (EN 14775:2009).
- Labudović, B. 2012: Osnove primjene biomase, Energetika marketing Zagreb, 36–73.
- Risović, S., J. Domac, 1999: STANJE KORIŠTENJA I ENERGETSKI POTENCIJAL BIOMASE IZ DRVNO-PRERAĐIVAČKE INDUSTRIJE U ZAGREBAČKOJ ŽUPANIJU, Šumarski list, 123(9–10): 453–459., Zagreb.
- Risović, S., I. Đukić, K. Vučković, 2008: Energy analysis of pellets made of wood residues. *Croatian journal of forest engineering*. 29(1): 95–108
- Risović, S. 2003: Briketi i pelete – novi energent na hrvatskome tržištu; 123–141 - Risović, S., Figurić, M. 2003: Šumska biomasa 2003.
- Robbins, W.C. 1982: Density of wood chips. *J Forest*, 80: 567.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., Sanadi, A. 2011a: Thermal transitions of the amorphous polymers in wheat straw. *Ind Crop Prod* 2011; 34 (1): 1053–1056.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. S., Barsberg, S.; Ahrenfeldt, J.; Henriksen, U.B. 2011b: A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass & bioenergy* 35 (2011); 910–918.
- Šafran, B., 2015: Ovisnost mehaničkih svojstava peleta o ulaznim veličinama drvene sirovine, Šumarski fakultet Zagreb: 58–60

Summary

The paper deals with some quality characteristic of wood pellets from Turopolje area. The samples of pedunculate oak (*Quercus robur* L.), European hornbeam (*Carpinus betulus* L.), narrow-leaved ash (*Fraxinus angustifolia* Vahl.), European alder (*Alnus glutinosa* L.) and black poplar (*Populus nigra* L.) were collected. Collected and debarked samples were crushed by a mill with knives to 2.00 mm granulation. The content of water, ash and calorific value were examined on samples. The ash content was determined separately for the bark and the wood. The ash content in the barks shows a high rate in pedunculate oak which is 13.64 % and hornbeam with 11.91 %, while in other species the ash content in a bark is between 7 and 10 %. The ash content of a debarked wood shows the following values: 0.63 % for the oak, 0.50 % for the ash, 0.46 % for the hornbeam. Values of the ash content in the alder and the poplar were 0.4 %. Results indicate the need for debarking in pellet production in order to obtain the quality of class A1 and A2 pellet. By determining the calorific value the best results were determined in the black poplar sample which is 19.63 MJ/kg, and the lower value was measured in hornbeam sample 18.94 MJ/kg. Furthermore, the mentioned samples were mixed and 3 mixture groups were formed. The share of hard broad-leaved trees of oak, hornbeam and ash in each individual mixture was 60 %, while in the remaining 40 %, alder (20 %) and poplar (20 %) equally participated. Formed material mixtures APA (ash 60 : poplar 20 : alder 20), OPA (oak 60 : poplar 20 : alder 20) and HPA (hornbeam 60 : poplar 20 : alder 20) were pressed into pellets by hydraulic laboratory press in 2 forces

(3.0 and 6.0 kN) and 2 temperatures (150 and 200 °C). After pressing, pellets were left for 15 days to stabilise in dimension and their dimension and density were determined. Then, pellets were checked for pressure strength in a radial direction by a testing machine. Pellets from all the mixtures, pressed by a force of 6.0 kN at 200 °C showed a high density in the range from 1 207 – 1 234 kg/m³. Pellets of basic ash mixture at force of 3.0 kN and at 200 °C gave high density ≈ 1200 kg/m³, while the smallest density was generally given by pellets of basic hornbeam mixture in all pressing regimes. The results of pressure strength in radial direction give best results in pellets pressed at 6.0 kN and 200 °C which is 13.59 MPa with the basic ash mixture, 11.1 MPa with the basic oak mixture and 9.06 MPa of basic hornbeam mixture.

If the pressure strength of a pellet is considered collectively according to the mixture, pellets made from the mixture of ash, poplar and alder give significantly better results in comparison to other two mixtures.

KEY WORDS: wood pellets, ash content, calorific value, pellet density, pressure strength