

## UPORABNOST LESNIH OSTANKOV TUJERODNIH INVAZIVNIH DREVESNIH VRST ZA PROIZVODNJO PELETOV

### USEFULNESS OF NON-NATIVE INVASIVE TREE SPECIES WOOD RESIDUES FOR PELLET PRODUCTION

Dominika Gornik Bučar<sup>1\*</sup>, Peter Prislan<sup>2</sup>, Pavel Smolnikar<sup>1</sup>, Darja Stare<sup>2</sup>, Nike Krajnc<sup>2</sup>, Bojan Gospodarič<sup>1</sup>

UDK 630\*839.813:662.71

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 14. 5. 2021

Sprejeto / Accepted: 25. 5. 2021

#### Izvleček / Abstract

**Izvleček:** Na laboratorijski peletirni napravi smo izdelali pelete iz petih izbranih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst, ki rastejo na območju Slovenije in sicer: divjega kostanja (*Aesculus hippocastanum*), ameriškega javora (*Acer negundo*), robinije (*Robinia pseudoacacia*), trnate gledičevke (*Gleditsia triacanthos*) in velikega pajesena (*Ailanthus altissima*) ter mešanic surovine omenjenih tujerodnih invazivnih vrst s smrekovino (*Picea abies*) v razmerjih 70 : 30 in 50 : 50. Pod enakimi proizvodnimi pogoji smo skupno izdelali 15 različnih vrst peletov. Izdelanim peletom smo določili pomembnejše fizikalne in mehanske lastnosti (vsebnost vode, gostoto nasutja, mehansko obstojnost in vsebnost pepela). Rezultate smo primerjali z mejnimi vrednostmi, opredeljenimi v standardu SIST EN ISO 17225-2:2014. Vsebnost vode in gostota nasutja vseh izdelanih vrst peletov sta zadostili zahtevam standarda za razvrstitev v najvišji kakovostni razred A1. Mehanske obstojnosti izdelanih peletov niso dosegale zahtev standarda in niso presegle 96,5% (kar je mejna vrednost za B razred). Rezultati kažejo, da imajo med izbranimi tujerodnimi invazivnimi drevesnimi vrstami največji potencial za nadaljnjo optimizacijo peletirnega postopka robinija, trnata gledičevka in visoki pajesen.

**Ključne besede:** lesni ostanki, trdna biogoriva, tujerodne invazivne drevesne vrste, peletiranje, kakovost peletov

**Abstract:** We produced pellets from five invasive non-native tree species growing in Slovenia on a laboratory pelleting device, namely: wild chestnut (*Aesculus hippocastanum*), boxelder maple (*Acer negundo*), black locust (*Robinia pseudoacacia*), thorny locust (*Gleditsia triacanthos*) and tree of heaven (*Ailanthus altissima*), as well as mixtures of the raw material from the above non-native invasive species and spruce (*Picea abies*) in the ratios 70:30 and 50:50. Under the same production conditions, we produced a total of 15 different types of pellets. The most important physical and mechanical properties (water content, bulk density, mechanical stability and ash content) were determined for the pellets produced. The results were compared with the limits defined in the standard SIST EN ISO 17225-2:2014. The water content and bulk density of all produced pellet types met the requirements of the standard for the highest quality class A1. The mechanical durability of the pellets produced did not meet the requirements of the standard and did not exceed 96.5% (which is the limit value for quality class B). The results suggest that black locust, thorny locust and tree of heaven have the highest potential for further optimization of the pelleting process.

**Keywords:** wood residues, solid biofuels, non-native invasive tree species, pelleting, pellet quality

## 1 UVOD

### 1 INTRODUCTION

Vse večja skrb za čisto okolje in zmanjševanje emisij toplogrednih plinov ter hkrati vse večje potrebe po energiji se kažejo v povečani rabi obnovljivih virov energije. Proizvodnja in poraba lesnih peletov iz leta v leto narašča tako v svetovnem kot tudi evropskem merilu in po podatkih European

Pellet Council je proizvodnja peletov v EU-28 v letu 2019 za 5 % preseгла proizvodnjo v letu 2018 in je tako dosegla 18 milijonov ton (EPC, 2021). Po podatkih Gozdarskega inštituta Slovenije konstantno narašča tudi letna proizvodnja peletov v Sloveniji in se je med letom 2010 in 2019 povečala iz 60.000 ton na 134.000 ton (GIS, 2021).

Zaradi vse večjega obsega proizvodnje in rabe peletov se bo tudi v prihodnjih letih potreba po vhodni surovini konstantno povečevala (Stelte et al., 2012; Lauri et al., 2014; Puig-Arnavat et al., 2016; Whittaker & Shield, 2017; García, 2019; Picchio et al., 2020), kar ima vpliv tudi na ceno vhodne suro-

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Rožna dolina, Cesta VIII/34, 1000 Ljubljana, SLO  
\* e-pošta: dominika.gornik@bf.uni-lj.si

<sup>2</sup> Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, SLO

vine. Zato je potrebno raziskati dodatne možnosti uporabe in potencialne različnih lesnih kot tudi nelesnih virov biomase. Zelo podroben pregled raziskav o kakovosti peletov, izdelanih iz različnih virov gozdno-lesne in kmetijske biomase iz obdobja zadnjih petih let, podajajo Picchio et al. (2020).

Težave, povezane z rabo biomase za proizvodnjo peletov v energetske namene, se nanašajo na neprimerno obliko vstopne surovine, nizko nasutno gostoto in visoko vlažnost, kar povzroča probleme v obdelavi in lahko privede do degradacije med transportom in skladiščenjem ter posledično višje stroške proizvodnje (Puig-Arnavat et al., 2016). Na gospodarnost izdelave trdnih biogoriv ključno vpliva tudi razpršenost virov surovin, zato je nujno učinkovito in okolju prijazno obvladovanje sicer kompleksne biomasne oskrbovalne verige (Puig-Arnavat et al., 2016).

S procesom peletiranja ali zgoščevanja biomase dosegamo homogeno trdno gorivo z visoko gostoto, nizko vsebnostjo vlage in povišano kurilno vrednostjo. Enostaven transport, manjši skladiščni prostor, enostavna uporaba (ogrevanje s peleti je popolnoma avtomatizirano) so dodatne prednosti peletov. Med trdnimi biogorivi je povpraševanje po lesnih peletih največje. Uporabljajo se tako v industrijskih napravah za proizvodnjo toplotne in električne energije, termičnih napravah za toplotno uplinjanje, kot tudi za neindustrijsko rabo v gospodinjstvih v majhnih kurilnih napravah (Stelte et al., 2012). Pri neindustrijski rabi morajo peleti imeti najvišjo kakovost.

Na končno kakovost peletov odločilno vpliva vrsta in lastnosti vhodne surovine (npr. kemijska sestava, vlažnost, velikost gradnikov in njihova porazdelitev); način priprave surovine in pogoji pri proizvodnji peletov (npr. temperatura matrice, dimenzije matrice, podajalna hitrost, tlak pri peletiranju, itd.) (Obernberger & Thek, 2010).

Proces proizvodnje lesnih peletov lahko v grobem razdelimo na tri dele in sicer: (I) dobava in priprava vhodne surovine, (II) izdelava peletov in (III) distribucija proizvoda (GIS, 2020). Vsi deli imajo svoje značilnosti, ki jih je za doseganje ustrezne kakovosti potrebno poznati, obvladovati in dosledno upoštevati. Obdelavo oz. postopek izdelave peletov razdelimo na več faz (npr. mletje, sušenje, kondicioniranje, stiskanje oz. peletiranje, hlajenje, sejanje in embalaranje), katerih zaporedje je odvis-

no predvsem od vrste in oblike uporabljene vhodne surovine za proizvodnjo peletov (npr. hlodovina slabe kakovosti, sečni ostanki, kosovni ostanki iz predelave lesa, žagovina, lesni ostružki, oblanci, lesni sekanci ...).

V proizvodnji peletov se danes največ uporablja les oziroma lesni ostanki iz žagarske in lesno-predelovalne industrije (npr. lesni prah, žagovina in drobni oblanci), saj je takšen les neoporečen in kemijsko neobdelan. Za žagovino so značilni majhni delci lesa, zato priprava surovine za nadaljnje peletiranje ni energetska potratna. Velikokrat je žagovina iz žagarskih obratov brez lubja (ali drugih nečistoč), kar omogoča proizvodnjo visokokakovostnih peletov. Uporaba manj znanih drevesnih vrst za proizvodnjo peletov je povsem smiselna, pri čemer je ključno doseganje podobne ravni kakovosti peletov kot jo imajo peleti, izdelani iz lesnih vrst, ki se običajno uporabljajo v Evropi (npr. smreka, jelka, bukev) (Castellano et al., 2015).

Tujerodne invazivne drevesne vrste (TIDV) in grmovne vrste predstavljajo določen potencial za izdelavo peletov, še posebej tiste, ki so rasle v urbanem okolju (npr. mestni parki, drevoredi, vrtovi ...) in imajo zaradi rastiščnih pogojev pogosto nižjo kakovost lesa in s tem omejeno področje uporabe.

Cilj pričujoče študije je oceniti primernost manjvrednih lesnih ostankov izbranih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst za peletiranje. Čistim lesnim ostankom divjega kostanja, ameriškega javora, robinije, trnate gledičevke in velikega pajesena smo določili gostoto, jih zmleli in kondicionirali na ciljno vlažnost, primerno za peletiranje v laboratorijskih pogojih. Pelete smo izdelali tako iz omenjenih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst kot tudi mešanice TIDV in smreke v razmerjih 70 : 30 in 50 : 50. Vse postopke priprave surovine in peletiranja smo izvedli pod enakimi pogoji in parametri. Izdelanim peletom smo izmerili pomembnejše kazalnike kakovosti, ki jih določa standard SIST EN ISO 17225-2:2014 in sicer mehansko obstojnost, vsebnost vode, gostoto nasutja in vsebnost pepela. Postavili smo tri hipoteze; (I) lastnosti surovine se razlikujejo glede na izbrano TIDV in mešanico, (II) lastnosti izdelanih peletov se med izbranimi vrstami in mešanicami razlikujejo, (III) peleti, izdelani iz mešanice tujerodnih invazivnih drevesnih vrst in smrekovine bodo imeli boljše lastnosti kot peleti, izdelani izključno iz lesa tujerodne invazivne drevesne vrste.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2 MATERIALS AND METHODS

#### 2.1 VHODNA SUROVINA

##### 2.1 RAW MATERIALS

V raziskavi smo uporabili kosovne ostanke izbranih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst, ki so bile proučevane v okviru projekta Applause (UIA02-228). Kot surovino za izdelavo peletov smo uporabili les divjega kostanja (*Aesculus hippocastanum*), ameriškega javora (*Acer negundo*), robinije (*Robinia pseudoacacia*), trnate gledičevke (*Gleditsia triacanthos*) velikega pajesena (*Ailanthus altissima*) in smrekovine (*Picea abies*). Značilnosti lesa uporabljenih drevesnih vrst so opisane v literaturi (Torelli, 2002; Gorišek et al., 2018; Gorišek et al., 2019; Merhar et al., 2020; Smolnikar, 2020). Lesne ostanke smrekovine smo uporabili za pripravo mešanic TIDV v dveh razmerjih.

#### 2.2 PRIPRAVA SUROVINE

##### 2.2 SAMPLE PREPARATION

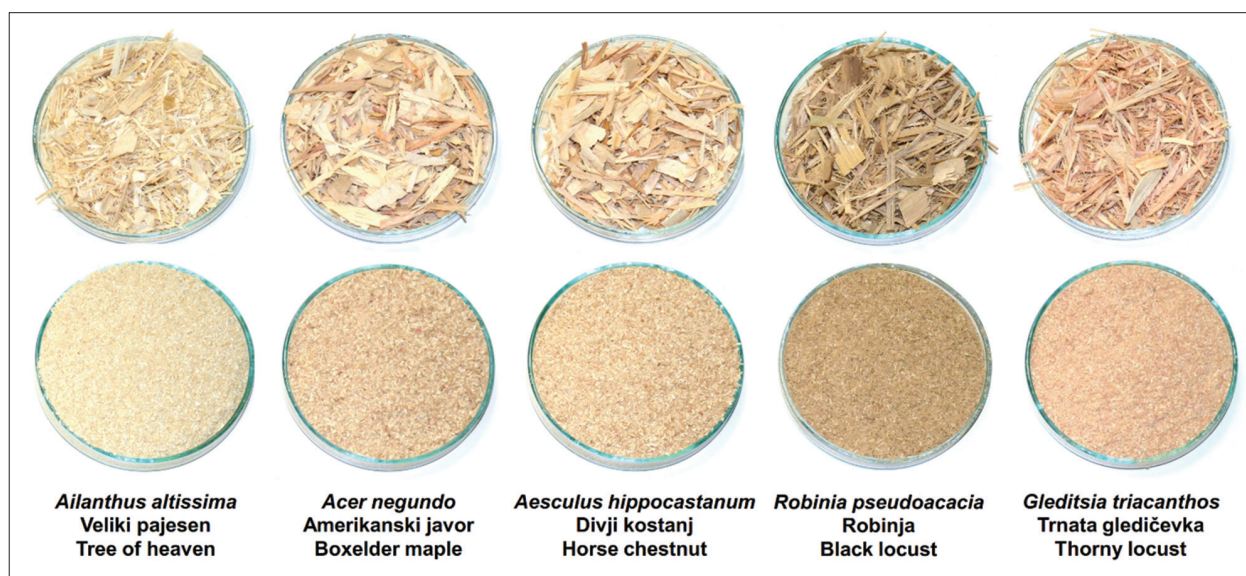
Ostanke masivnega lesa brez lubja vseh naštetih vrst smo razžagali na kose okvirnih dimenzij 20 mm × 20 mm × 30 mm in jih zmleli v dveh korakih (slika 1). Po opravljenem grobem mletju na laboratorijskem mlinu CONDUX CSK 350/N1 smo fino mletje izvedli na mlinu Retsch SM200. Pri finem mletju smo uporabili 2 mm sito za 2/3 volumna in 4 mm sito za 1/3 volumna vsake drevesne vrste. Me-

šanice tujerodnih invazivnih drevesnih vrst in smrekovine smo pripravili v dveh različnih volumskih razmerjih (50 % TIDV / 50 % smrekovine in 70 % TIDV / 30 % smrekovine) (preglednica 1). V nadaljevanju navajamo mešanice glede na delež tujerodne invazivne drevesne vrste. Mešanje zmlete surovine TIDV in smrekovine je potekalo ročno, v 10 l plastičnih vedrih. V vseh mešanicah smo uporabili enako volumsko razmerje velikosti gradnikov.

Vsem preučevanim TIDV smo volumetrično določili gostoto v absolutno suhem stanju pred fazo mletja na desetih naključno izbranih vzorcih in podali rezultat kot povprečje meritev.

Analizo vsebnosti pepela v pripravljenih mešanicah (preglednica 1) smo izvedli skladno s SIST EN ISO 14775:2010 z uporabo peči Nabertherm LE 14/22 B 300. Segrevanje vzorcev smo izvedli po naslednjem temperaturnem režimu: 50 min enakomerno segrevanje do 250 °C, 60 min gretje na 250 °C, enakomerno povišanje temperature na 500 °C v 30 min intervalu in vzdrževanje temperature 500 °C nadaljnjih 120 min. Za vsako mešanico smo naredili po štiri meritve in podali povprečje meritev deleža pepela.

Pripravljenim kombinacijam surovin smo določili vsebnost vode na merilniku vlažnosti BEAMA110-1 in po potrebi surovino navlažili do ciljne vsebnosti vode med 13 % in 15 %, kar je optimalna vrednost za peletiranje na uporabljeni peletirni napravi. Pred izdelavo peletov smo izvedli tudi fazo



Slika 1. Vzorci tujerodnih invazivnih drevesnih vrst po grobem in finem mletju.

Figure 1. Chipped and ground samples of non-native invasive tree species.

Preglednica 1. Surovinska sestava peletov.

Table 1. Raw material composition of pellets.

Lesna vrsta / Species	Tujerodna invazivna vrsta : Smrekovina / Non-native invasive Species: Spruce		
	100 % : 0 %	70 % : 30 %	50 % : 50 %
Veliki pajesen / Tree of heaven	✓	✓	✓
Divji kostanj / Horse chestnut	✓	✓	✓
Trnata gledičevka / Thorny locust	✓	✓	✓
Robinija / Black locust	✓	✓	✓
Amerikanski javor / Boxelder maple	✓	✓	✓

kondicioniranja in sicer tako, da smo mešanice 20 min pred peletiranjem enakomerno poškopili z vodo, jih temeljito ročno premešali in tako dosegli navlažitev površine gradnikov.

## 2.2 PROIZVODNJA PELETOV

### 2.2 PELLET PRODUCTION

Pelete smo izdelali na laboratorijski peletirni napravi Kahl 14-175 (slika 2a) z matrico v obliki diska (plošče), s kanali premera 6 mm, dolžine 22 mm, oziroma s stiskalnim razmerjem 0,27 (slika 2b). Podroben postopek peletiranja je opisal Smolnikar (2020). Med peletiranjem smo natančno beležili pogoje peletiranja (temperaturo matrice, vrtilno hitrost dozirnega polža in maso izdelanih peletov v časovnih intervalih). Pelete smo po vsakem stiskanju ohladili na rešetki (slika 2c).

## 2.3 ANALIZA PELETOV

### 2.3 ANALYSIS OF PELLETS

Vsem izdelanim peletom smo skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2:2014 določili naslednje lastnosti:

- Vsebnost vode po standardni gravimetrični metodi, opredeljeni v standardu SIST EN ISO 18134-1:2015 ter z merilnikom vlažnosti BEAMA110-1.
- Gostoto nasutja, skladno s postopkom, opredeljenim v standardu SIST EN ISO 15103:2010, s tem, da smo namesto 5 l posode uporabili posodo z volumnom 0,5 l.
- Mehansko obstojnost skladno s standardom SIST EN ISO 15210:2010. Postopek določanja mehanske obstojnosti temelji na kontrolirani obrabi pelet. Med testiranjem peleti trkajo



Slika 2. Laboratorijska peletirna naprava Kahl 14-175 (a), proizvodnja peletov (b) in ohlajevanje peletov (c).  
Figure 2. Laboratory pellet press Kahl 14-175 (a), pellet production (b) and cooling of the pellets (c).

drug ob drugega ter ob stene testirne naprave, katere delovanje in oblika je natančno opredeljena v standardu SIST EN ISO 15210-1:2010. Manjša obraba peletov pomeni manjšo količino nastalih finih delcev in posledično boljšo mehansko obstojnost. Za vsako vrsto (mešanico) peletov (preglednica 1) smo mehansko obstojnost določili dvema vzorcema, in sicer peletom, ki smo jih izdelali po približno 10 min peletiranja, in peletom, ki smo jih naredili na koncu peletiranja. Rezultati mehanske obstojnosti za posamezno mešanico so podani kot povprečje obeh meritev.

### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

#### 3 RESULTS AND DISCUSSION

V raziskavi smo ugotavljali, ali so lesni ostanki tujerodnih invazivnih drevesnih vrst primerni za peletiranje in kakšna je kakovost peletov, če ne spreminjamo pogojev priprave surovine in peletiranja glede na drevesno vrsto. Peletiranje smo izvajali v laboratorijskih pogojih na laboratorijski peletirni napravi in kakovost peletov določali s standardnimi metodami.

#### 3.1 LASTNOSTI IN PRIPRAVA VHODNE SUROVINE

##### 3.1 PROPERTIES AND PREPARATION OF RAW MATERIALS

Eden ključnih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost peletov, je homogena in ustrezno pripravljena vhodna surovina. V raziskavi smo različne oblike lesnih ostankov tujerodnih invazivnih drevesnih vrst razžagali na enotne kose in jih nato v dveh korakih zmleli do želene velikosti gradnikov. S sejalno analizo smo določili velikostne razrede gradnikov, kar je predstavil Smolnikar (2020). Ciljna velikost gradnikov je odvisna od načina peletiranja oziroma izvedbe matrice in peletirne naprave (Oberberger & Thek, 2010; Döring, 2013). V naši raziskavi so bile ciljne dimenzije gradnikov v velikostnem razredu med 2 mm in 4 mm.

V raziskavi smo izdelali pelete iz 15 različnih vhodnih surovin oziroma mešanic (preglednica 1). Za vsako mešanico smo pripravili cca 16 dm<sup>3</sup> surovine s ciljno vsebnostjo vode 13 % (realno izmerjene med 13 % in 15 %) in ustrezno sestavo gradnikov ter s temeljitim mešanjem in uravnovešanjem zagotovili homogenost vzorca. Različni raziskovalci

navajajo različne ciljne vlažnosti za različne vrste vstopne surovine: med 8 % - 12 % (Oberberger & Thek, 2010) med 6 % - 13 % (Whittaker & Shield, 2017), Lehtinkangas (2001) navaja za smrekovino vlažnost med 13 % - 15 %. Optimalno vlažnost je potrebno določiti za vsako vrsto vhodne surovine, saj pomembno vpliva na lastnosti izdelanih peletov kot je npr. mehanska obstojnost. Višja vlažnost surovine namreč zmanjšuje trenje v procesu peletiranja in povečuje relaksacijo peletov po izdelavi in s tem negativno vpliva na mehansko obstojnost. Po drugi strani pa višja vlažnost znižuje temperaturo steklastega prehoda (T<sub>g</sub>) lignina, kar pospešuje povezovanje gradnikov. Glede na dejstvo, da je T<sub>g</sub> pri listavcih na splošno nekoliko višja kot pri iglavcih, ima višja vlažnost surovine lahko pozitiven vpliv na mehansko obstojnost peletov (Stelte, 2011), kar smo upoštevali v naši raziskavi.

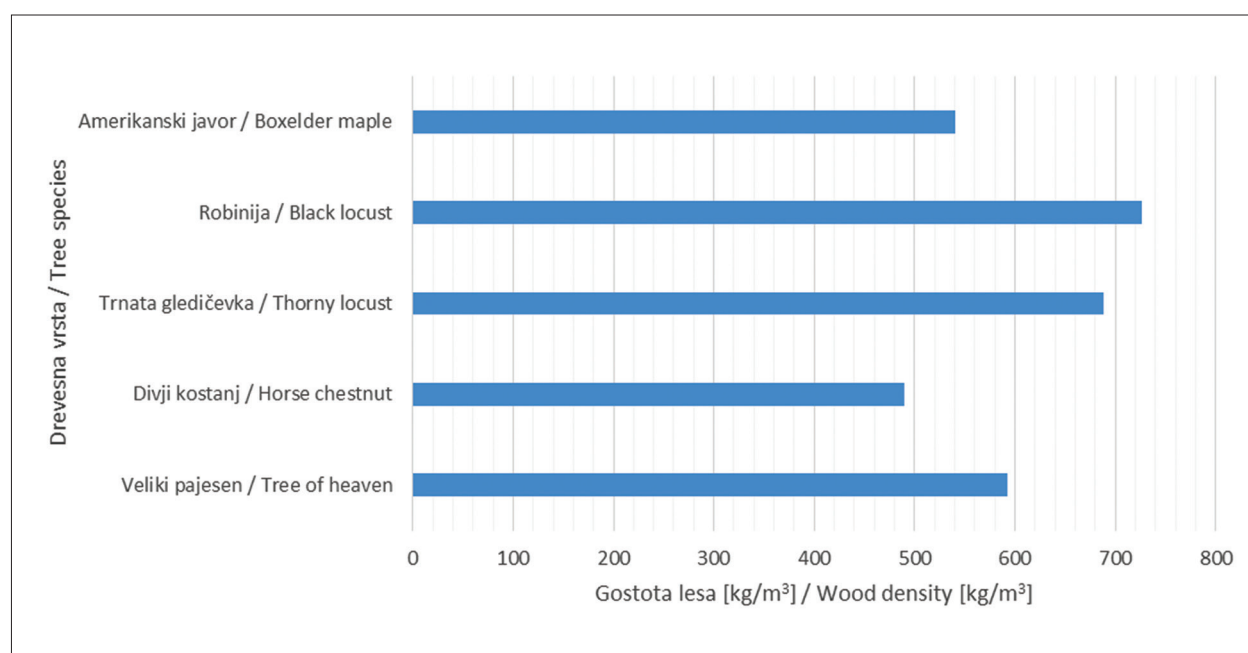
Raziskali smo tudi vpliv gostote lesa na potek peletiranja. Variabilnost gostote med izbranimi invazivnimi vrstami je razmeroma velika, najvišje gostote so imeli vzorci robinije (726 kg/m<sup>3</sup>), najnižje pa divjega kostanja (490 kg/m<sup>3</sup>) (slika 3). Vpliv gostote lesa na hitrost doziranja in temperaturo matrice komentiramo v poglavju 3.2.

Rezultati analize vsebnosti pepela v pripravljene surovini za izdelavo peletov kažejo, da imajo najnižjo vsebnost pepela peleti, izdelani iz 100 % lesa robinije (delež pepela je 0,30 %) ter njeni 70 % in 50 % mešanici s smrekovino (slika 4). Omenjeni peleti izpolnjujejo kriterije standarda za uvrstitve v najvišji kakovostni razred A1, ki predpisuje zgornjo mejo 0,7 %. Najvišjo vsebnost pepela pa imajo peleti, izdelani iz lesa ameriškega javorja, in sicer 1,35 % ter njegova 70 % mešanica s smrekovino (slika 4).

#### 3.2 ANALIZA POGOJEV PELETIRANJA

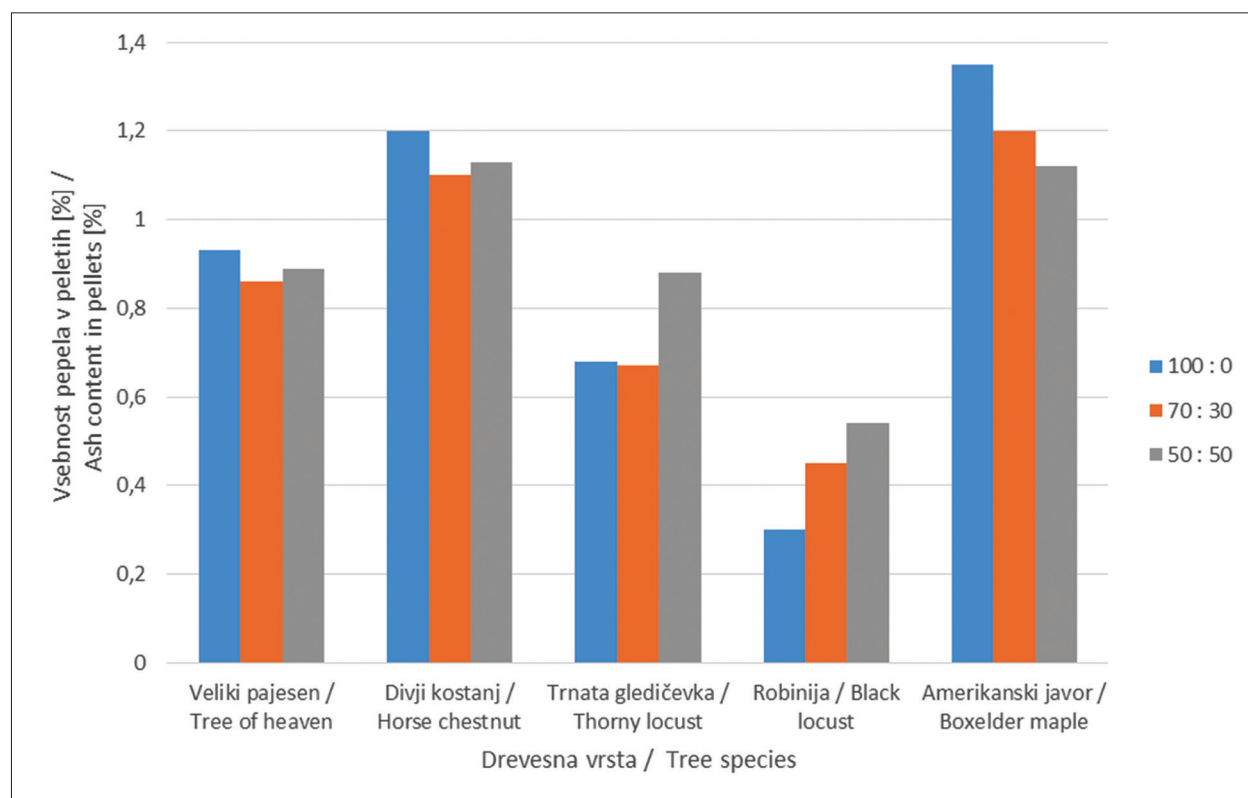
##### 3.2 CONDITIONS OF PELLET ANALYSIS

Za kakovost peletov je ključnega pomena ustrezna hitrost peletiranja, ki jo uravnavamo s hitrostjo doziranja vhodne surovine in vrtilno hitrostjo gnanih valjev. Vrtilna hitrosti valjev na matrici je bila v naši raziskavi konstantna, spreminjali pa smo vrtilno hitrost dozirnega polža. To smo konstantno nadzorovali in jo prilagajali glede na potek peletiranja. Vrtilno hitrost dozirnega polža smo postopno povečevali iz začetnih 50 vrt/min po 10 vrt/min do končnih 260 vrt/min. V primeru, da je poraba električnega toka



Slika 3. Gostote lesa izbranih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst.

Figure 3. Density of selected non-native invasive tree species.



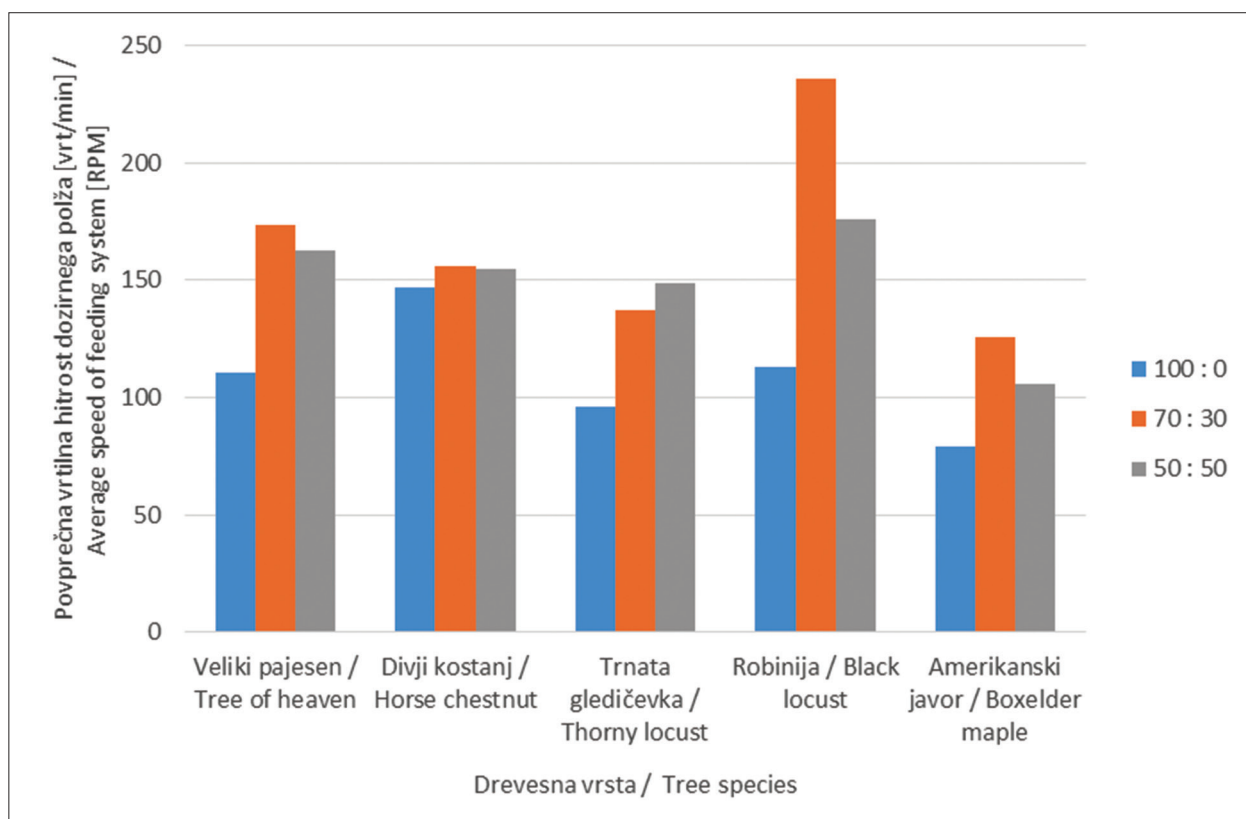
Slika 4. Vsebnost pepela v peletih izbranih TIDV in mešanica.

Figure 4. Ash content in pellets of selected non-native invasive species in mixtures.

presešla normalno (nazivno) vrednost, smo vrtilno hitrost dozirnega polža zmanjšali in na ta način preprečili zabitje matrice. Povprečne hitrosti doziranja pri posameznih mešanica prikazuje slika 5. Pri 100 % TIDV je prišlo do najvišje povprečne vrtilne hitrosti dozirnega polža pri divjem kostanju, kar bi lahko pripisali nizki gostoti surovine. Po zgornji trditvi bi pričakovali, da bo vrtilna hitrost z večanjem deleža smreke v mešanica (70 % in 50 %) višja, kar lahko potrdimo pri mešanica lesnih vrst divjega kostanja, trnate gledičevke in ameriškega javorja.

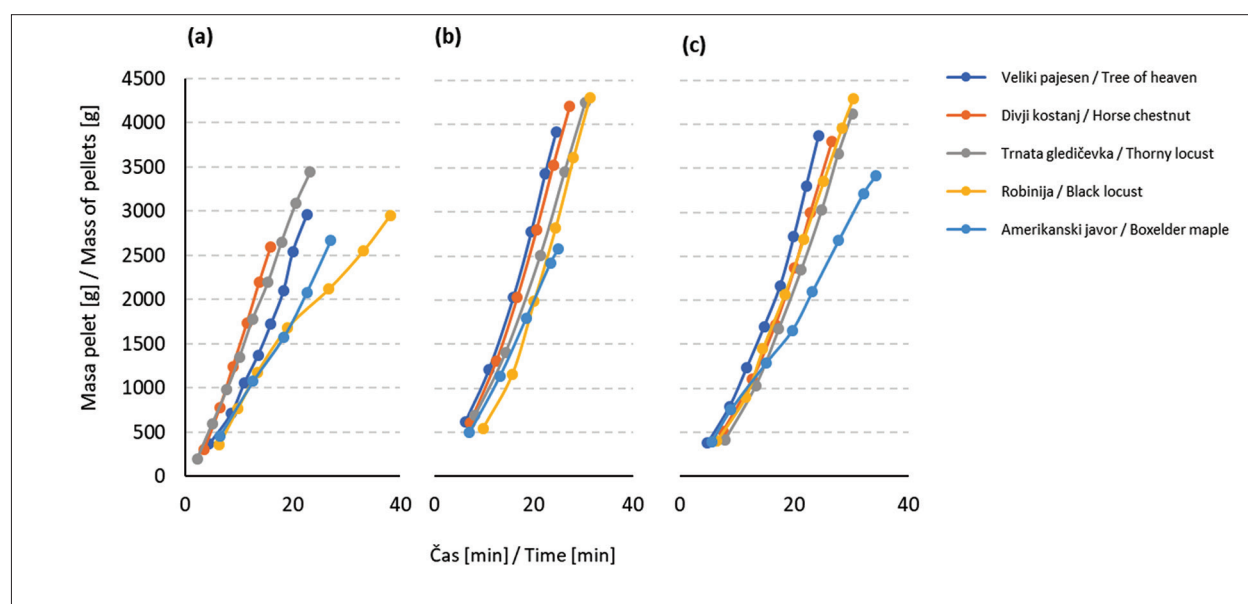
Na sliki 6 je prikazana količina proizvedenih peletov v odvisnosti od časa, kar smo v naši raziskavi opredelili kot hitrost peletiranja različnih vrst surovine. Ta parametra nam lahko služita za kvalitativno primerjavo poteka peletiranja različnih surovin (Gornik Bučar et al., 2019). Iz vsake mešanice surovine smo naredili med 2,5 in 4,5 kg peletov. Hitrost peletiranja je vsekakor odvisna od uporabljene peletirne naprave, značilnosti vstopne surovine in pogojev peletiranja, in nikakor ne sme biti razumljena kot absolutna vrednost.

Na podlagi hitrosti peletiranja lahko sklepamo o »enostavnosti« oziroma »težavnosti« peletiranja določene surovine. Če smo pri določeni vrtilni hitrosti dozirnega polža zaznali preobremenitve elektromotorja gnanih valjev, smo dotok surovine zmanjšali in s tem preprečili zamašitev matrice, kar je vplivalo tudi na količino proizvedenih peletov v določenem časovnem intervalu. Pri peletiranju čiste (100 % TIDV) surovine (slika 6a), smo najvišjo hitrost peletiranja (proizvedena masa peletov v enoti časa) dosegli pri divjem kostanju (167 g/min) najnižjo pa pri robiniji (78 g/min), kljub temu, da ima največjo gostoto med izbranimi vrstami. V primeru peletiranja 70 % mešanice (slika 6b) je bila največja hitrost peletiranja pri visokem pajesenu (160 g/min), sledi divji kostanj, najnižjo pa ima ameriški javor (104 g/min), ki odstopa od ostalih. Zanimivo je, da je ob mešanju TIDV s smrekovino pri nekaterih primerih prišlo do povišanja hitrosti peletiranja (visoki pajesen, robinija in ameriški javor) pri nekaterih pa do znižanja (divji kostanj in trnata gledičevka). Podobna opa-



Slika 5. Povprečna vrtilna hitrost dozirnega polža pri peletiranju izbranih TIDV in mešanica.

Figure 5. Average speed of feeding system for pelleting of selected non-native invasive tree species in mixtures.



Slika 6. Količina proizvedenih peletov, izdelanih iz: (a) 100 % lesa TIDV, (b) 70 % mešanic in (c) 50 % mešanic.  
 Figure 6. Quantity of produced pellets during pelletization produced from: (a) 100% of non-native invasive tree species, (b) 70% of non-native invasive tree species and (c) 50% of non-native invasive tree species.

žanja kot pri 70 % mešanicah opazimo tudi pri 50 % mešanicah (slika 6c). Najvišjo hitrost peletiranja ima ponovno veliki pajesen (160 g/min), najnižjo pa ameriški javor (100 g/min).

Med peletiranjem oz. zgoščevanjem (ang. densification) biomasne surovine se med gradniki in stenami matrice zaradi trenja generira toplota, ki je ključnega pomena za kakovost peletov. Optimalna temperatura, ki omogoča izdelavo najkakovostnejših peletov, je odvisna od vrste biomase in načina priprave biomase, njene kemijske sestave in vsebnosti vode kot tudi značilnosti peletirne naprave. Zgoščevanje biomase je torej zelo kompleksen proces, na katerega imajo vpliv številni dejavniki, ki se v večini primerov določajo s poskušanjem (ang. »Trial and error«) in izkustvenimi spoznanji, kar je časovno zelo potratno (Pugi-Arnavat, 2016). Temperature peletiranja se glede na vrsto biomase in peletirne naprave gibljejo v širokem območju med 20 °C in 120 °C (Pugi-Arnavat, 2016). Kot je razvidno iz slike 7, se je povprečna temperatura matrice oz. peletiranja v naši raziskavi gibala med 50 °C in 67 °C, kar se odraža tudi v relativno nizki mehanski obstojnosti peletov (slika 11). Naj pri tem poudarimo, da je raziskava preliminarna in da smo želeli proizvesti pelete iz različnih TIDV oziroma mešanic, pod kar se da enakimi pogoji, tako pri pripravi su-

rovine kot peletiranju. Glede na to bi bilo smiselno v nadaljnjih raziskavah izvajati peletiranje pri višjih temperaturah matrice.

### 3.3 LASTNOSTI PELETOV 3.3 PROPERTIES OF PELLETS

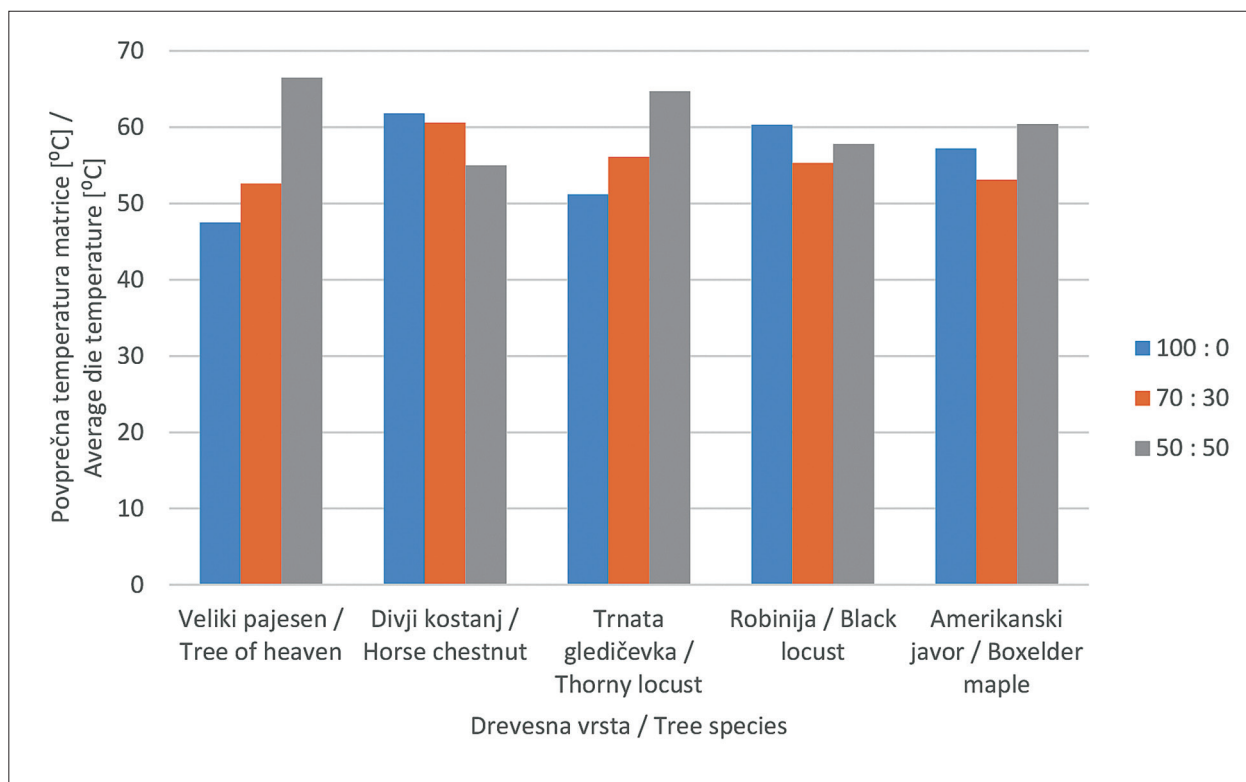
Pri lesni biomasni se vlažnost običajno podaja kot voda v lesu (preračunana glede na mokro maso), kar pomeni, da govorimo o absolutni vlažnosti (Prislan et al., 2020). Vsebnost vode odločilno vpliva na potek peletiranja kot tudi na kalorične vrednosti peletov. Vsi izdelani peleti (slika 8) so imeli povprečno vsebnost vode pod 10 % (slika 9), kar izpolnjuje kriterije standarda za uvrstitev v najvišji kakovostni razred peletov A1. Meritve povprečne vsebnosti vode, izmerjene po metodi, opisani v standardu SIST EN ISO 18134-1:2015, se gibajo med 5,8 % in 7,8 %. Najnižjo vsebnost vode smo izmerili za čisto mešanico trnate gledičevke, najvišjo pa pri 50 % mešanici robinije.

Povprečne gostote nasutja izdelanih peletov (slika 10) variirajo od 611 kg/m<sup>3</sup> do 703 kg/m<sup>3</sup> in ustrezajo zahtevam za kakovostni razred pelet A1, kot je določeno v standardu SIST EN ISO 17225-2:2014, ki navaja mejno vrednost 600 kg/m<sup>3</sup>. Najvišjo gostoto nasutja je imela 70 % mešanica trnate gledičevke, najnižjo pa 70 % mešanica ameriški-



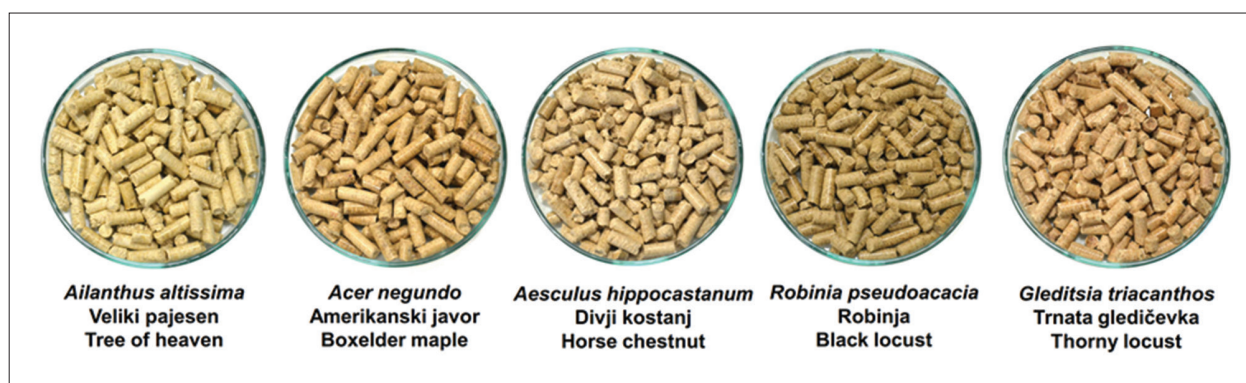
skega javorja. Gostota nasutja peletov je odvisna tako od gostote peletov kot tudi velikosti vmesnih prostorov med posameznimi peleti. Večja kot je gostota nasutja peletov, večja je količina akumulirane energije na prostorninsko enoto, posledično pa so transportni in skladiščni stroški nižji (Obernberger & Thek, 2010).

Mehanska obstojnost je eden ključnih kakovostnih kazalcev peletov. Na mehansko obstojnost ima odločilen vpliv tako vhodna surovina, njena sestava in priprava kot tudi postopek peletiranja. Najvišjo povprečno mehansko obstojnost, ki je znašala 95 %, so dosegli peleti iz čiste (100 %) surovine trnate gledičevke, odstotek nižjo pa peleti,



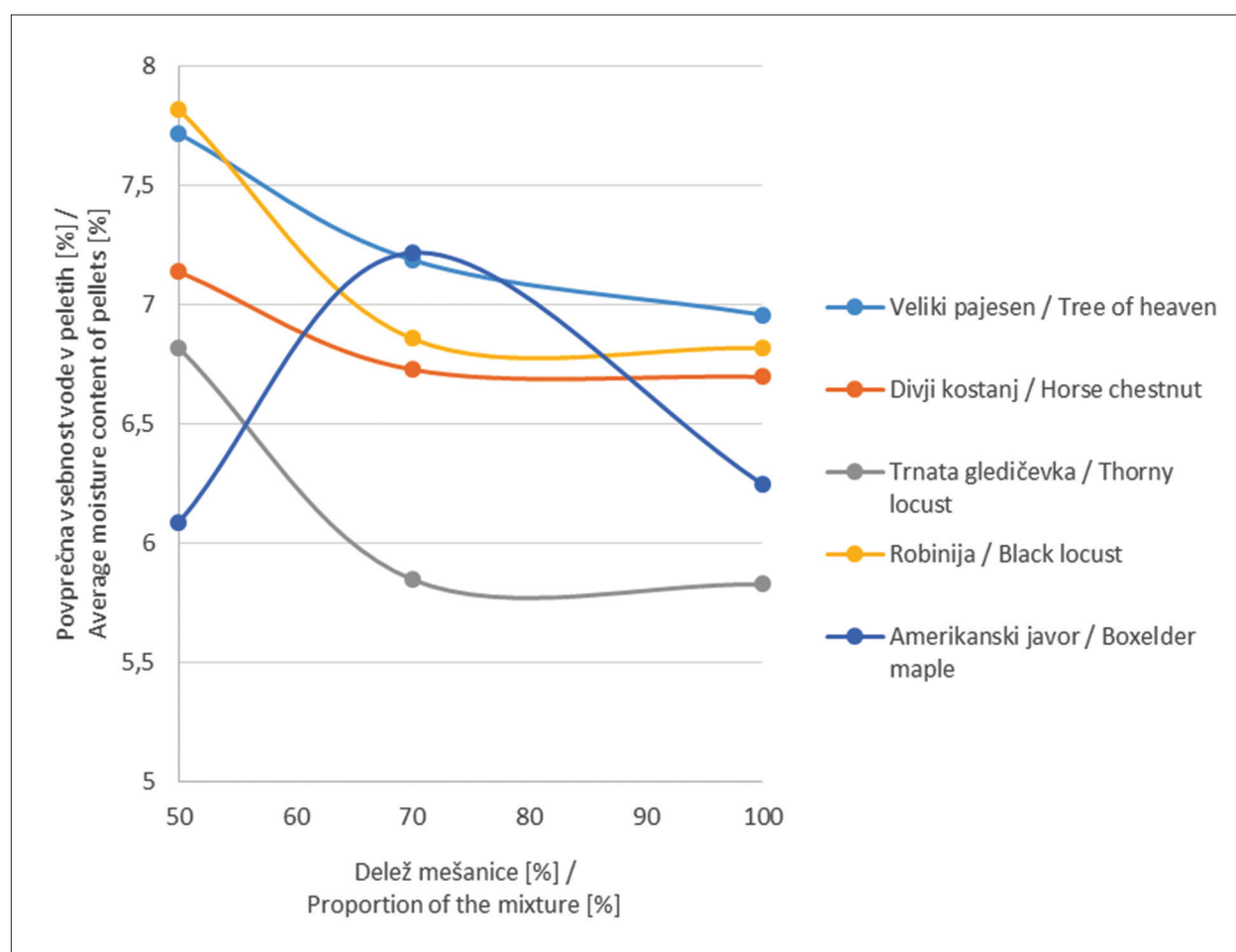
Slika 7. Povprečna temperatura matrice med peletiranjem izbranih TIDV in mešanic.

Figure 7. Average die temperature for pelleting of selected non-native invasive species and mixtures.



Slika 8. Peleti, izdelani iz izbranih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst.

Figure 8. Pellets from selected non-native invasive tree species.

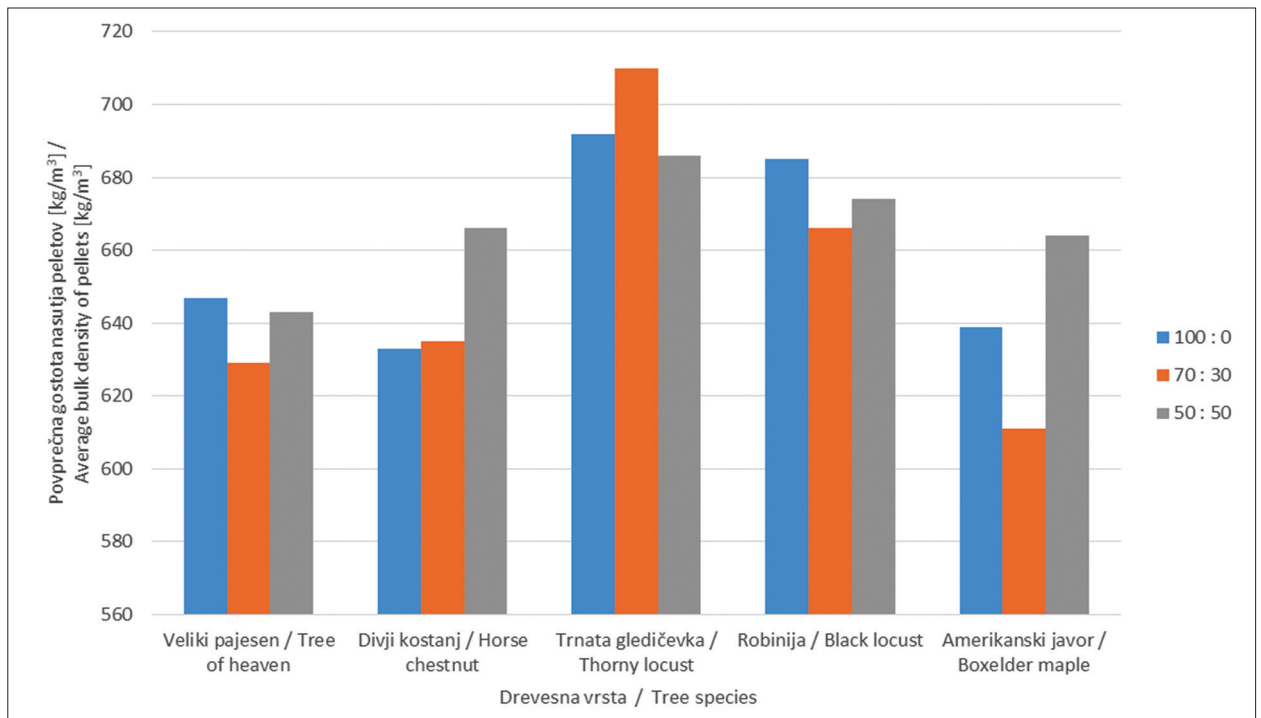


Slika 9. Povprečna vsebnost vode v peletih izbranih TIDV in mešanicah.

Figure 9. Average water content of pellets of selected non-native invasive species and mixtures.

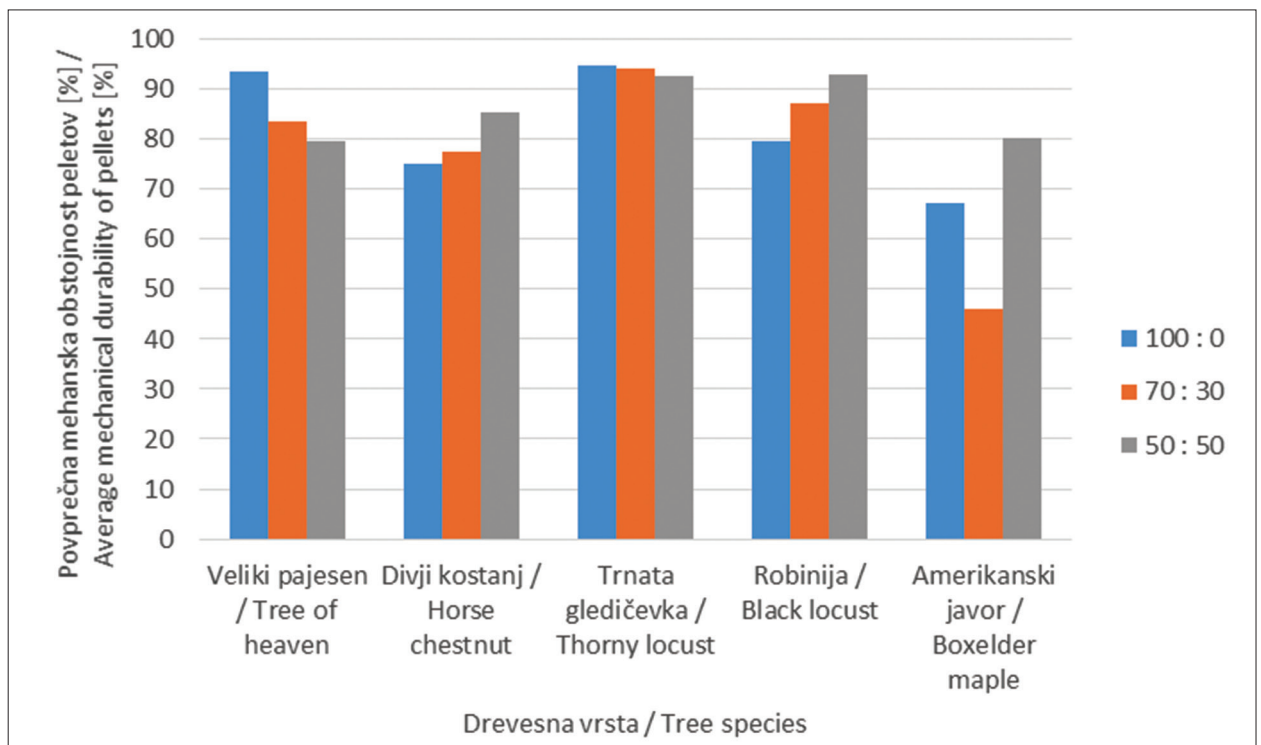
izdelani iz velikega pajesena. Najslabšo mehansko obstojnost (46 %) so imeli peleti, izdelani iz 70 % mešanice amerikanskega javorja (slika 11). Mehanska obstojnost mešanic s smrekovino je bila v primeru velikega pajesena in trnate gledičevke z večanjem deleža smrekovine manjša; v primeru divjega kostanja in robinije pa večja kot pri čisti surovini. Takšni rezultati mehanske obstojnosti kot enega ključnih kazalnikov kakovosti peletov potrjujejo navedbe raziskovalcev (Stelte, 2011; Puig-Arnavat et al., 2016; Picchio et al., 2020), da je peletiranje zelo kompleksen proces, na katerega imajo vpliv tako surovina kot postopek, in mora biti optimiziran za posamezno vrsto biomasne surovine. Nizka mehanska obstojnost vodi do številnih nezaželenih dogodkov že med samo proizvodnjo peletov kot tudi med distribucijo, transportom, skladiščenjem in uporabo. Velike emisije

prahu tako povzročajo moteno delovanje avtomatiziranih sistemov kot tudi nevarnost požara in eksplozije med prevozom ter skladiščenjem in imajo negativen vpliv na zdravje. Relativno nizko doseženo mehansko obstojnost izdelanih peletov lahko pripišemo tudi relativno nizki temperaturi matrice pri peletiranju, saj se med postopkom zgoščevanja ni generirala zadostna toplota, ki bi pozitivno vplivala na tvorjenje vezi med delci. Predvidevamo, da bi višja temperatura peletiranja imela pozitiven vpliv na mehansko obstojnost peletov. Izboljšanje mehanske trdnosti bi poleg povišane temperature peletiranja najverjetneje dosegli tudi z optimizacijo vrtilne hitrosti gnanih valjev in stiskalnim razmerjem, ki bi ga dosegli z izbiro druge debeline matrice.



Slika 10. Povprečna gostota nasutja peletov izbranih TIDV in mešanic.

Figure 10. Average bulk density of pellets of selected non-native invasive species and mixtures.



Slika 11. Povprečna mehanska obstojnost peletov izbranih TIDV in mešanic

Figure 11. Average mechanical durability of pellets made from selected non-native invasive species and mixtures.

## 4 ZAKLJUČKI

### 4 CONCLUSIONS

Raba lesne biomase v energetske namene še vedno predstavlja določen izziv, tako iz okoljskega kot tudi gospodarsko-ekonomskega stališča. Z zgoščevanjem lesne biomase (peletiranjem) dosegamo večjo gostoto energije, izboljšamo pa tudi enostavnost transporta, skladiščenja in rokovanja s trdnim gorivom. Pri izdelavi peletov je nujno upoštevati pogoj, da se za ta namen uporabi samo lesna masa, ki nima druge možnosti uporabe, kajti raba v druge namene podaljšuje krožni gospodarski cikel (Zule et al., 2017), poleg tega pa je potencialna dodana vrednost v nadaljnjih predelavah v primeru rabe lesa kot energenta nizka (Kropivšek & Gornik Bučar, 2017). Zaradi vse večje rabe peletov, katerih vstopna surovina je les in pa ostanki iz lesnopredelovalne industrije, se iščejo možnosti uporabe različnih drevesnih in grmovnih lesnih vrst, saj povečana raba lesa v energetske namene negativno vpliva tudi na ceno vhodne surovine. Eden od potencialnih virov je tudi manjvreden les tujerodnih invazivnih drevesnih vrst, ki rastejo predvsem v urbanem okolju in ima zaradi rastiščnih pogojev in slabše kakovosti omejeno področje uporabe. Tovrstna raba lesa TIDV bi lahko imela tudi pozitiven vpliv na omejevanje intenzivnosti širjenja le-teh, ker ogrožajo avtohtone drevesne vrste.

V laboratorijskih pogojih smo izdelali pelete iz izbranih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst: divjega kostanja (*Aesculus hippocastanum*), ameriškega javora (*Acer negundo*), robinije (*Robinia pseudoacacia*), trnate gledičevke (*Gleditsia triacanthos*) in velikega pajesena (*Ailanthus altissima*) ter avtohtone smreke (*Picea abies*), ki smo jo dodajali TIDV v različnih razmerjih. Izdelanim peletom smo določili nekatere pomembnejše fizikalne in mehanske lastnosti (vsebnost vode, nasipno gostoto, vsebnost pepela in mehansko obstojnost). Na osnovi rezultatov lahko zaključimo, da imajo od preučevanih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst potencial za energetske izrabo v obliki peletov predvsem robinija, trnata gledičevka in veliki pajesen. Ugotavljamo, da se nekatere uporabljene vrste »lažje« peletirajo (t.j. z višjo hitrostjo peletiranja ob nižjih temperaturah) in da to ni odvisno od gostote lesne vrste. Tako lahko na osnovi rezultatov prvo in drugo zastavljeno hipotezo potrdimo. Za potrditev oziroma zavrnitev hipoteze, da imajo peleti, izdelani

ni iz lesnih ostankov izbranih tujerodnih invazivnih drevesnih vrst in smrekovine boljše lastnosti kot izdelani samo iz lesa TIDV, bi morali izvesti obsežnejšo raziskavo in optimizirati postopke izdelave.

Ker smo nekatere uporabljene tujerodne invazivne drevesne vrste za izdelavo pelet uporabili prvič in tudi v nam dostopni literaturi nismo našli podatkov o rabi v tovrstne namene, smo želeli pridobiti okvirne informacije o možnosti rabe izbranih TIDV za proizvodnjo peletov. Raziskava je preliminarna, zato naš cilj ni bil proizvesti peletov, ki izpolnjujejo zahteve standardov, kar tudi pomeni, da postopkov priprave surovine in peletiranja nismo optimizirali. Dobljeni rezultati in pridobljene izkušnje so zagotovo dragocene za nadaljnje raziskovanje možnosti rabe tovrstnega vira lesnih ostankov za proizvodnjo peletov.

## 5 POVZETEK

### 5 SUMMARY

The energetic use of wood biomass remains a challenge, both from an ecological and economic point of view. With the densification of wood biomass (pelletization), a higher energy density can be achieved, which can lead to optimized transport, storage and handling conditions of solid fuels. It should be emphasized that only low-quality wood biomass should be considered for this purpose in order to meet the requirements of a sustainable circular economy.

As the use of pellets continues to increase, the possibility of using various tree and shrub wood species is being explored in addition to traditional sources of raw materials such as the wood processing industry. One of the potential sources is also low-quality wood of invasive tree species, growing mainly in urban environments.

The objective of this preliminary study is to evaluate the suitability of low-quality wood residues from invasive non-native tree species for pelleting. We produced pellets from five selected invasive non-native tree species growing in Slovenia on a laboratory pelleting device, namely: wild chestnut (*Aesculus hippocastanum*), boxelder maple (*Acer negundo*), black locust (*Robinia pseudoacacia*), thorny locust (*Gleditsia triacanthos*) and tree of heaven (*Ailanthus altissima*), as well as mixtures of the raw materials from the above invasive alien

species and spruce (*Picea abies*) in the ratios 70:30 and 50:50. Raw material preparation and pelleting procedures were carried out under the same conditions and parameters. The laboratory Kahl press (flat die with 0.27 press ratio) was used for pelleting, and the feed rate as well as the temperature at the die were continuously recorded during the pelleting process.

The main quality parameters of the pellets produced were measured (i.e., water content, bulk density and mechanical durability). The methods and procedures for determining the properties of the pellets were carried out according to the relevant standards.

The results of the tested pellet properties were compared with the limits for quality class A1, A2 and B defined in the international standard SIST EN ISO 17225-2:2014. All types of pellets produced met the requirements of the standard for classification in the highest quality class A1 in terms of water content and bulk density. The mechanical durability of the pellets did not meet the requirements of the standard and did not exceed 96.5% (which is the limit for class B). We conclude that the reason for the low mechanical durability is the relatively low temperature of the die during pelleting. We find that the type of input raw material and the pelleting conditions affect the quality of the pellets, especially the mechanical durability. The results suggest that black locust, thorny locust and tree of heaven have the highest potential for further optimization of the pelleting process. We have observed that some of the wood species studied have a higher pelletization rate at lower temperatures, but this is not related to the density of the wood species.

Since we used some of the non-native invasive tree species for the first time for pellet production and did not find data on their use in the relevant literature, we evaluated the possibility of using selected invasive species for pellet production. As this is a preliminary study, it was not our aim to produce pellets that meet the requirements of the standards, which also means that we have not optimized the raw material preparation and the pelleting process. The results obtained and the experience gained are certainly valuable for further research into the possibilities of using such a source of wood residues for pellet production.

## ZAHVALA

## ACKNOWLEDGEMENTS

Izvedbo raziskave je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), Programske skupine P4-0015 Les in lignocelulozni kompoziti, P4-0107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija in P2-0182 Razvojna vrednotenja, projekti V4-2016, ki ga financirata ARRS in Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP), Applause (UIA02-228), ki nam je prijazno odstopil ostanke tujerodnih invazivnih drevesnih vrst in LIFE ARTEMIS (LIFE15 GIE/SI/000770). Za tehnično pomoč pri izdelavi vzorcev se zahvaljujemo tehničnemu sodelavcu Dragu Vidicu.

## VIRI

## REFERENCES

- Castellano, J. M., Gómez, M., Fernández, M., Eseban, L. S., & Carrasco, J. E. (2015). Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*, 139, 629-636. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.033>
- EPC (2021). <https://epc.bioenergyeurope.org/about-pellets/pellets-statistics/>
- García, R., Gil, M. V., Rubiera, F., & Pevida, C. (2019). Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. *Fuel*, 251, 739-753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.141>
- GIS (2020). <http://www.s4q.si/datoteka/navigacija/Prirocnik-S4Q.pdf> (15. jun. 2020)
- GIS (2021). <http://www.s4q.si/proizvodnja-pelet-v-sloveniji>
- Gorišek, Ž., Plavčak, D., Straže, A., & Merela, M. (2018). Tehnološke lastnosti in uporabnost lesa velikega pajesena v primerjavi z lesom velikega jesena. *Les/Wood*, 67 (2), 29-44. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2018.v67n02a03>
- Gorišek, Ž., Merela, M., Straže, A., Krže, L., Planinšič, J., Čufar, K., & Plavčak, D. (2019). Laboratory analysis of suitability for processing into wood product for 17 woody IAPS: physical-mechanical properties & drying characteristics. Ljubljana: UIA02-228 APPLAUSE.
- Gornik Bučar, D., Gospodarič, B., Smolnikar, P., Stare, D., Kranjc, N., & Prislán, P. (2019). Invasive species as raw material for pellets production. Proceedings: 70 th Anniversary of Drvna Industrija Journal. Zagreb: University of Zagreb, 61-68.
- Kropivšek, J., & Gornik Bučar, D. (2017). Dodana vrednost v izdelkih v gozdno-lesni verigi. *Les/Wood*, 66 (1), 62-71. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n01a06>
- Lauri, P., Havlík, P., Kindermann, G., Forsell, N., Böttcher, H., & Obersteiner, M. (2014). Woody biomass energy potential in 2050. *Energy Policy*, 66, 19-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.033>

- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20 (5), 351-360. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1)
- Merhar, M., Gornik Bučar, D., & Merela, M. (2020). Machinability research of the most common invasive treespecies in Slovenia. *Forests*, 11 (7), 752 (13). DOI: <https://doi.org/10.3390/f11070752>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook. The production and Thermal utilisation of pellets*. London, Washington: Earthscan.
- Piccchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., & Pari, L. (2020). Pellet Production from Woody and Non-Woody Feedstock: A Review on Biomass Quality Evaluation. *Energies*, 13 (11), 2937 (20); DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112937>
- Prislan, P., Arnič, D., Ščap, Š., Kranjc, N., & Straže, A. (2020). Določanje vlažnosti drv z električnim uporovnim merilnikom. *Gozdarski vestnik*, 78 (2), 68-76.
- Puig-Arnavat, M., Shang, L., Sárossy, Z., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2016). From a single pellet press to a bench scale pellet mill – Pelletizing six diferent biomass feedstocks, *Fuel Processing Technology*, 142, 27-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.022>
- SIST (2010a). Trdna biogoriva. Metoda določevanja pepela (EN 14775:2010)
- SIST (2010b). Trdna biogoriva - Metode za določevanje prostorninske mase (EN 15103:2010)
- SIST (2010c). Trdna biogoriva. Metode za določanje mehanske trdnosti pelet in briketov 1. del: Peleti (EN 15210-1:2010)
- SIST (2014). Trdna biogoriva. Specifikacije goriv in razredi 2. del: Razvrščeni lesni peleti (EN ISO 17225-2:2014)
- SIST (2015). Trdna biogoriva. Določevanje vlage - Metoda sušenja v peči 1. del: Celotna vlaga - Referenčna metoda (EN ISO 18134-1:2015)
- Smolnikar, P. (2020). Izdelava peletov iz invazivnih tujerodnih lesnih vrst. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo.
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization - A review. *BioResources*, 7(3), 4451-4490. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.7.3.4451-4490>
- Stelte, W., Barsberg, S. T., Clemons, C., Morais, J. P. S., de Freitas Rosa, M., & Sanadi, A. R. (2019). Coir Fibers as Valuable Raw Material for Biofuel Pellet Production. *Waste and Biomass Valorization*, 10 (11), 3535-3543. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0362-2>
- Torelli, N. (2002). Robinija (*Robinia pseudoacacia* L.) in njen les. *Les/Wood*, 54,1-2, 6-10.
- Zule, J., Gornik Bučar, D., & Kropivšek, J. (2017). Inovativna raba bukovine slabše kakovosti in ostankov. *Les/Wood*, 66(1), 41-51. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n01a04>
- Whittaker, C., & Shield, I. (2017). Factor affecting wood, energy grass and straw pellet durability - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>