



PRIMEROST OSTANKOV MLETE KAVE ZA PROIZVODNJO PELETOV SUITABILITY OF SPENT GROUND COFFEE FOR PELLET PRODUCTION

Dominika Gornik Bučar^{1*}, Peter Prislan², Dejan Verhovšek³, Bojan Gospodarič¹

UDK članka: 630*839.81:663.938.4

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 22.4.2024

Sprejeto / Accepted: 24.5.2024

Izvleček / Abstract

Izvleček: Za doseganje cilja evropske energetske-podnebné politike, da do leta 2050 dosežemo podnebno nevtralnost s prehodom na obnovljive vire energije, je potrebno aktivirati različne razpoložljive obnovljive vire, vključno z biološkimi ostanki oz. odpadki. Eden od takih bioloških odpadkov, ki nastaja v velikih količinah in se večinoma nepredelan odlaga v okolje, so ostanki mlete kave. Ker ostanke mlete kave sestavljajo celuloza, hemiceluloza, lignin in proteini, predstavljajo velik potencial tudi kot biogorivo, ki lahko delno nadomesti lesno biomaso pri proizvodnji peletov. V raziskavi smo v laboratorijskih pogojih izdelali pelete iz ostankov mlete kave, ki smo jim dodali različne deleže (0 %, 25 %, 50 %, 75 %) žagovine. Izdelanim peletom smo določili lastnosti in jih glede na izmerjene vrednosti razvrstili v kakovostne razrede po standardu SIST EN ISO 17225-6:2021. Ugotovili smo, da imajo peleti z večjim deležem ostankov mlete kave višjo kurilno vrednost, večjo vsebnost pepela ter nižjo mehansko obstojnost. Peleti, izdelani iz ostankov mlete kave in dodatkom žagovine (50 % ali več), izkazujejo obetavne lastnosti kot vhodna surovina za proizvodnjo peletov.

Ključne besede: peleti, ostanki mlete kave, žagovina, biološki odpadki, kurilna vrednost, kakovost peletov

Abstract: In order to achieve the European energy and climate policy goal of climate neutrality by 2050, it is necessary to activate various available renewable energy sources, including biological residues or waste. One such biological waste, which is produced in large quantities and usually enters the environment unprocessed, is spent ground coffee. As spent ground coffee consist of cellulose, hemicellulose, lignin and proteins, it has great potential as a biofuel, and could partially replace wood biomass in the production of pellets. In our research, we have produced pellets under laboratory conditions from spent ground coffee to which we have added different proportions (0%, 25%, 50%, 75%) of sawdust. We determined the properties of the pellets and categorized them into quality classes based on the measured values according to the SIST EN ISO 17225-6:2021 standard. We found that pellets with a higher proportion of spent ground coffee residues have a higher calorific value, higher ash content and lower mechanical durability. Pellets made from spent ground coffee residues with the addition of sawdust (50% or more) show promising properties for use as a raw material for pellet production.

Keywords: pellets, spent coffee grounds, sawdust, bio waste, calorific value, pellets quality

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Vse večja poraba energije, zaostreni pogoji za zagotavljanje zanesljivosti energetske oskrbe in tudi skrb za okolje v najširšem smislu zahtevajo vključevanje najrazličnejših virov energije. Z vidika varovanja okolja, trajnosti, krožnosti in gospodarnosti je

potrebno aktivirati predvsem rabo najrazličnejših bioloških odpadnih materialov, ki v procesu predelave ali izrabe ostajajo kot ostanki ali odpadki in lahko v veliki meri nadomestijo rabo lesne biomase kot energenta (Castellano et al., 2015; Škorkov, 2018; García et al., 2019; Anžič, 2021). Lesni peleti so v zadnjih letih zelo pomembna oblika trdih biogoriv,

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, Slovenia

² Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenia

³ Dejan Verhovšek, Krovles, 3230 Šentjur pri Celju, Slovenia

* e-mail: dominika.gornik@bf.uni-lj.si

namenjeni tako individualni rabi za pridobivanje toplotne energije kot tudi industrijski rabi za pridobivanje toplotne in električne energije (Döring, 2013; Obernberger & Thek, 2010). Iz tega razloga raba in posledično proizvodnja peletov konstantno narašča in se je v obdobju zadnjih desetih let na globalnem nivoju povečala za 2,6-krat. Tako je proizvodnja peletov v letu 2022 znašala $47,6 \cdot 10^6$ ton (v letu 2012 pa $18 \cdot 10^6$ ton) (FAO, 2023), pri čemer v EU porabimo skoraj polovico svetovne proizvodnje peletov. V letu 2022 je poraba peletov v EU znašala $24,2 \cdot 10^6$ ton, proizvodnja pa $24,5 \cdot 10^6$ ton (Timber-online, 2024). V prihodnjih letih se še vedno pričakuje rast porabe lesnih peletov, ki lahko učinkovito nadomestijo rabo fosilnih goriv in s tem pozitivno vplivajo na zmanjševanje izpustov toplogrednih plinov. Lesni peleti so trenutno izdelani predvsem iz ostankov lesnopredelovalne industrije in gozdne proizvodnje (de Souza et al., 2021). S principa krožnosti pa imajo tudi druge učinkovitejše možnosti rabe (Zule et al., 2017; Čufar et al., 2017; Kropivšek et al., 2023; Kropivšek et al., 2024), pri čemer se dosega tudi višja dodana vrednost proizvoda.

Po poročanju Mednarodne agencije za energijo IEA (IEA, 2021) je v scenariju Net Zero (NZE) do leta 2050 predvideno, da bo več kot 60 % svetovne oskrbe z bioenergijo, ki je ocenjena na velikost 100 EJ, leta 2050 izviralo iz trajnostnih tokov odpadkov, ki ne zahtevajo namenske rabe zemljišč. To vključuje kmetijske ostanke, organske komunalne odpadke in ostanke iz gozdarstva in lesne industrije. Po scenariju NZE v letu 2050 ostanki iz predelave lesa in sečnje gozdov zagotavljajo zgolj 20 % bioenergije, pridobljene iz trajnostnih tokov odpadkov, kar pomeni manj kot polovico od trenutnih najboljših ocen celotnega tehničnega potenciala sektorja (IEA, 2021). Zato je potrebno najti načine za aktivacijo in učinkovito izrabo odpadnega biomateriala z uporabo naprednih novih in tudi že znanih in/ali prilagojenih tehnologij. S temi viri bi lahko v dobršni meri nadomestili rabo lesne biomase v energetske namene.

V Sloveniji letno nastane nekaj več kot $1 \cdot 10^6$ ton komunalnih odpadkov, kar v letu 2022 pomeni 496 kg na prebivalca, pri čemer predstavljajo ostanki mlete kave (v nadaljevanju kavni ostanki) 1,2 % (Anžič, 2021). V hierarhiji ravnanja z odpadki (GOV, 2024) ima recikliranje in ponovna uporaba odpadkov višjo prioriteto kot energetska izraba odpadkov,

medtem ko ima odlaganje odpadkov najnižjo prioriteto. Kavni ostanek se večinoma odlaga v okolje brez kakršnekoli predelave, pri čemer ima to vpliv na prst in rast rastlin. Kavni ostanek vsebuje veliko ogljikovih hidratov, beljakovin, lipidov in bioaktivnih spojin, ki izboljšujejo kakovost tal s izboljšanjem fizikalno-kemijskih lastnosti tal in biološke rodovitnosti. Vendar pa kavni ostanek pri nizkih koncentracijah (1 %) v zemlji lahko zavira rast rastlin zaradi stimulacije mikrobne rasti talnih mikroorganizmov in posledično tekmovanja za talni dušik med mikroorganizmi in rastlinskimi koreninami, kot tudi zaradi prisotnosti fitotoksičnih spojin (npr. polifenolov) (Peraz-Burillo et al., 2022). Rešitev vidijo v vermikompostiranju (Peraz-Burillo et al., 2022).

Glede na dejstvo, da se kavni ostanki v obsegu 93 % še neobdelani odlagajo v okolje (Atabani et al., 2023), ostaja velik biomasni potencial z izredno pestro vsebnostjo različnih organskih spojin neizkoriščen. Atabani et al. (2023) podaja podrobno študijo poznanih rab kavnega ostanka za proizvodnjo peletov in njene kemijske sestave. Vsebnost posameznih komponent zavisi od vrste kave, načina predelave in priprave ter rokovanja z ostanki kave. Prevladuje celuloza (20–30 %), hemiceluloza (10–20 %) in lignin (10–20 %). Ostanki kave vsebujejo tudi 10–20 % lipidov (trigliceridov in maščobnih kislin), 10–15 % proteinov in manjše deleže mineralnih snovi, kofeina in taninov. Ta pestrost omogoča rabo ostankov kave v različne namene od proizvodnje biodizla, bioetanola, bioplina do uporabe v gradbeno-inženirske namene kot so npr. vključevanje v zvočno izolativni material (Nosek et al., 2019; Anžič, 2021; Colantoni et al., 2021; Atabani et al., 2023; Lee et al., 2023). Tudi elementarna sestava kavnega ostanka izkazuje velik potencial za rabo le-tega v energetske namene, saj v povprečju vsebuje več ogljika (vsebnost 46–71 %), vodika (vsebnost 6–9 %) in manj kisika kot številne vrste druge biomase (Atabani et al., 2023).

Kava velja za najpomembnejše kmetijsko trgovsko blago, saj se po obsegu trgovanja uvršča takoj za nafto. Največji proizvajalci kave so države Južne Amerike (Brazilija, Kolumbija) in jugovzhodne Azije (Vietnam). Svetovna proizvodnja kave je v letu 2022 znašala skoraj $10,3 \cdot 10^6$ ton in poraba $10,7 \cdot 10^6$ ton, pri čemer smo Evropejci z 31 % največji porabniki kave. Pri tem prevladujeta dve vrsti kavovca in sicer Arabica (60 % svetovne proizvodnje)



Slika 1. Faze predelave kave: (a) surova kava Arabica in Robusta, (b) vreča surove kave, (c) skladiščenje surove kave, (d) ohlajevanje pražene kave.

Figure 1. Stages of coffee processing: (a) raw Arabica and Robusta coffee, (b) bag of raw coffee, (c) storage of raw coffee (d) cooling of roasted coffee.

in Robusta (skoraj 40 % svetovne proizvodnje) in v majhnem obsegu še Liberica in Excelsa. Ocenjuje se, da letno nastane okrog $15 \cdot 10^6$ ton ostankov kave, ki se praviloma odlagajo na odlagališčih oz. ostane neizkoriščena. Količina ostankov kave je sicer odvisna od številnih dejavnikov (postopka priprave kave, granulacije kave ...) in se giblje nekje med 65 % (Colantoni et al., 2021; Atabani et al., 2023) pa vse do 91 % (Lee et al., 2023), oziroma na 1 kg kave dobimo okrog 2 kg vlažnega ostanka kave. Kavni ostanek, ki vsebuje različne organske spojine, za svojo razgradnjo potrebuje veliko kisika in pri kompostiranju nastaja kompost z veliko vsebnostjo dušika. Pri neustreznem odlaganju kavnega ostanka v prevelikih količinah obstaja zaradi fermentacije ostanka tudi nevarnost samovžiga in tvorba velikih količin metana, ogljikovega dioksida ter neprijetnih vonjav. Neprimerno odlaganje kavnega ostanka v okolje lahko vodi v njegovo onesnaženje (Lee et al., 2023) in povzroča toksičen vpliv na nekatere vodne organizme.

Po podatkih SiStat (SiStat, 2024 a) je Slovenija v letu 2023 skupno uvozila 22.100 ton kave (od tega s 75 % prevladuje nepražena kava), medtem ko je bil izvoz kave v obsegu 11.000 ton, iz česar lahko zaključimo, da smo v Sloveniji v letu 2023 popili 11.100 ton kave oziroma skoraj 5,3 kg na prebivalca (kavni nadomestki niso upoštevani). Tako lahko ocenimo, da je v letu 2023 nastalo med 6.600 ton in 10.000 ton kavnega ostanka.

Kava je ena izmed najbolj priljubljenih pijač zaradi raznolikega in aromatičnega okusa, ki ima zaradi kofeina zelo poživiljajoč učinek. Kavo proizvajamo iz plodov kavovca (*Coffea*), ki spada v družino Rubiaceae. Najpomembnejši vrsti za pridelavo kave sta *Coffea arabica* (Arabica) in *Coffea canephora* (Robusta) (slika 1 a). Arabica predstavlja skoraj dve tretjini svetovne pridelave kave in je cenjena po svojih bogatih okusih in aromah, medtem ko ima Robusta močnejši okus in večjo vsebnost kofeina in se pogosto uporablja v mešanicah espresso kave.

Postopek predelave kave obsega več faz in od njihove izvedbe je zelo odvisno, kakšen bo okus kave. Plodovom grma kavovca po ročnem obiranju najprej odstranijo ovoj, ki obdaja vsako zrno kave, zrna nato posušijo na zraku in sortirajo po kakovosti, velikosti in teži. Na ta način dobimo surovo kavo, ki se večinoma pakira v 60 kg vreče, ki so osnovna enota pri trgovanju s surovo kavo (slika 1 b, c). Surovo kavo nato pražijo, pri čemer so pogoji praženja (temperatura in trajanje praženja) ključnega pomena za okus in aromo kave. Temu sledi hlajenje pražene kave (slika 1 d). Nadaljnji postopki (mletje in pakiranje) so odvisni od načina priprave kave.

Po podatkih Gozdarskega inštituta Slovenije (GIS, 2023a) je v letu 2022 proizvodnja peletov pri nas znašala 164.000 ton, po podatkih SiStat-a (SiStat, 2024 b) smo uvozili 125.614 ton peletov in izvozili 164.679 ton. Stanje kakovosti lesnih peletov na slovenskem trgu periodično spremljajo na Goz-

darskem inštitutu Slovenije v sodelovanju z Zvezo potrošnikov Slovenije in ugotavljajo, da se kakovost peletov na slovenskem tržišču izboljšuje, saj prevladujejo peleti najvišje kakovosti A1 (GIS, 2023b). Kot kaže ena zadnjih raziskav (Pirc Barčič et al., 2020), v kateri so s pomočjo ankete raziskovali trenutno stanje rabe peletov in predvidevanja njihove rabe za naslednje petletno obdobje, se v Sloveniji na lesno biomaso ogreva 43 % gospodinjstev, v naslednjih petih letih pa namerava preiti na pelete še dobra petina gospodinjstev. V proizvodnji peletov se danes največ uporablja les oziroma ostanki iz žagarske in lesnopredelovalne industrije (npr. sekanci, žagovina in drobni oblanci), saj je takšen les neoporečen in kemijsko neobdelan (Gornik Bučar et al., 2021). Za žagovino so značilni majhni delci, zato priprava surovine za nadaljnje peletiranje ni energetskega potratna. Praviloma je žagovina iz žagarskih obratov brez lubja (ali drugih nečistoč), kar omogoča proizvodnjo visokokakovostnih peletov.

Kakovost nelesnih peletov in mejne vrednosti posameznih kriterijev opredeljuje standard SIST EN ISO 17225-6:2021, po katerem razvrčamo pelete, izdelane iz zelne, sadne in vodne biomase, ter njenih mešanic z lesno biomaso. Omenjeni standard sodi v serijo standardov SIST EN ISO 17225:2021, ki definirajo ključne parametre in njihove mejne vrednosti, ki jih nadziramo pri razvrščanju biogoriv v kakovostne razrede. Standardi v posameznih delih določajo kakovostne razrede trdih biogoriv in sicer peletov, sekancev, briketov, drv in nelesnih peletov in briketov. Mejne vrednosti posameznih lastnosti nelesnih peletov, ki jih opredeljuje standard SIST EN ISO 17225-6:2021, prikazuje preglednica 1.

Preglednica 1. Specifikacija peletov, izdelanih iz nelesne biomase po standardu SIST EN ISO 17225-6:2021.

Table 1. Specification of non-woody pellets according to the EN ISO 17225-6:2021.

	Mejna vrednost za kakovostni razred A	Mejna vrednost za kakovostni razred B
Vsebnost vode [%]	≤ 12	≤ 15
Mehanska obstojnost [%]	≥ 97,5	≥ 96
Gostota nasutja [kg/m ³]	≥ 600	≥ 550
Vsebnost pepela [%]	≤ 6,0	≤ 10
Kurilna vrednost [MJ/kg]	≥ 14,5	≥ 14,5

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALI

2.1 MATERIALS

Za proizvodnjo smo uporabili kavne ostanke z vsebnostjo vode okoli 60 %, ki smo jih dobili v gostinskem lokalu, pri čemer je prevladovala kava vrste Arabica. Kavni ostanek je preostanek kave po ekstrakciji pri temperaturi nad 95 °C in povišanem tlaku.

Žagovino smo dobili iz žagarskega obrata, ki razžaguje svežo, lupljeno hlodovino iglavcev. Žagovina je imela vlažnost med 50 % in 60 %.

2.2 METODE

2.2 METHODS

Postopek izdelave peletov je potekal v več fazah, pri čemer smo najprej analizirali vhodno surovino (kavni ostanek in žagovino), pripravili ustrezne mešanice za peletiranje, izvedli postopek peletiranja in nato določili lastnosti izdelanih peletov.

2.2.1 Analiza vhodne surovine in priprava mešanice surovine

2.2.1 Analysis of incoming raw material and preparation of raw material mixture

Vhodni surovini (žagovini in kavni usedlini) smo določili začetno vlažnost, jo posušili in s sejalno analizo določili velikost delcev. Dostavljeni surovini smo določili začetno vlažnost skladno s standardom SIST EN ISO 18134-2:2017 s sušenjem pri temperaturi 103 °C do konstantne mase. Na osnovi dobljenih podatkov o vlažnosti smo vso surovino posušili v sušilni komori Memmert UFP 600. Za izdelavo peletov smo žagovino pomleli z mlinom Retsch SM200 prek sita z velikostjo delcev 4 mm. Iz posušene in zdrobljene surovine smo pripravili štiri mešanice z različnimi volumskimi razmerji kavnega ostanka in žagovine (preglednica 2). Nasutna go-

Preglednica 2. Surovinska sestava peletov (volumska razmerja).

Table 2. Raw material composition of pellets (volume ratios).

Oznaka	25 K	50 K	75 K	100 K
Kavni ostanek (delež %)	25	50	75	100
Žagovina (delež %)	75	50	25	0

stota žagovine z vsebnostjo vode 11,7 % je znašala 174,6 kg/m³, nasutna gostota ostanka kave z vsebnostjo vode 1,7 % pa 321,6 kg/m³.

Po temeljitem mešanju s pomočjo električnega mešala smo vsako mešanico kondicionirali na ciljno vsebnost vode 11,5 %. Pred peletiranjem smo ponovno določili vlažnosti pripravljenih mešanic z merilnikom vlažnosti BEA-MA110-1.

2.2.2 Postopek peletiranja

2.2.2 Pelletization

Peletiranje smo izvedli na peletirnem stroju Kahl 14-175. Vse mešanice smo izdelali pod enakimi parametri peletiranja. Matrica je imela kanale premera 6 mm in dolžine 36 mm. Peletiranje smo izvedli pri ciljni temperaturi matrice 80 °C. Število vrtljajev mešalnika je bilo naravnano na nivo 3. Hitrost vrtenja podajalnega polža je bila 90 vrt/min, pritisnih valjev pa 1310 vrt/min. Izdelane pelete smo ohladili na pladnjih pri sobni temperaturi. Med peletiranjem smo merili porabo električne energije in kapaciteto peletiranja. Z vsako mešanico smo izdelali med 8 in 10 kg peletov s ciljno vsebnostjo vode pod 10 %.

2.2.3 Določanje kakovosti peletov

2.2.3 Pellet quality determination

Kakovost peletov smo določali po standardiziranih postopkih, prikazanih v preglednici 3. Podrobne postopke poteka določanja kakovosti peletov opisujejo Prislan et al. (2015).

Pri razvrščanju izdelanih peletov v kakovostne razrede smo upoštevali kriterije oziroma mejne

vrednosti, ki jih predpisuje standard za razvrščanje nelesnih peletov SIST EN ISO 17225-6:2021.

2.2.4 Poraba energije pri peletiranju

2.2.4 Energy consumption for pelletization

Pri določanju potrebne energije za proizvodnjo peletov smo se omejili na ugotavljanje porabe energije med postopkom peletiranja in pa potrebno energijo za sušenje oz. pripravo vhodne surovine ustrezne vlažnosti. Energije, ki jo potrebujemo za zbiranje in transport vhodne surovine, v raziskavi nismo upoštevali.

Energijo za sušenje vhodne surovine smo izračunali po enačbi (1), kjer je w_1 začetna vsebnost vode v vhodni surovini, w_2 vsebnost vode v pripravljeni vhodni surovini po sušenju, T_1 je temperatura vhodne surovine pred sušenjem, c_p je specifična toplota vode in q_i je izparilna toplota vode. V izračunu smo uporabili vrednosti za specifično toploto $c_p = 4181$ J/kgK in izparilno toploto $q_i = 2256,9$ kJ/kg.

$$W = (w_1 - w_2) ((100 - T_1) c_p + q_i) \quad (1)$$

Za merjenje porabljene energije za peletiranje smo uporabili strojno in programsko opremo proizvajalca Cirkutor. Trifazni števec električne energije z oznako CEM C20 je bil z ethernet vmesnikom z oznako CEM M-ETH povezan z osebnim računalnikom. Porabo električne energije smo beležili v *.csv datoteko s programskim paketom PowerStudio. Analizo in preračun porabe električne energije za peletiranje 1 kg peletov pa smo izvedli v programskem paketu Excel.

Preglednica 3. Postopki ugotavljanja lastnosti peletov.

Table 3. Methods of determining the pellets' properties.

Merjena lastnost	Postopek	Merilna naprava–oznaka
Vsebnost vode	SIST EN ISO 18134-2:2017	Memmert UFP 600
Vsebnost vode**	Metoda tehtanja	BEA-MA-110-1
Gostota nasutja*	SIST EN ISO 17828:2016	
Mehanska obstojnost	SIST EN ISO 17831-1:2016	BEA TUMBLER 2000 R
Vsebnost pepela	SIST EN ISO 18122:2023	Nabertherm LE 14/22 B 300
Kurilna vrednost	SIST EN ISO 18125:2017	Kalorimeter IKA C200 auto

*modificirana metoda, postopek opisujejo Gornik Bučar et al. (2021)

** nestandardiziran postopek, uporabljen za hitro določanje vlažnosti med peletiranjem

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 VHODNA SUROVINA IN NJENA PRIPRAVA

3.1 INPUT RAW MATERIAL AND ITS PREPARATION

Eden od pomembnejših izzivov pri izdelavi peletov na osnovi kavnega ostanka je zagotovo njegovo zbiranje, logistika dobave in seveda sušenje. Kavni ostanek ima visoko vlažnost in vsaj v prvi fazi tudi temperaturo, kar lahko povzroča nastajanje plesni. Poleg tega kavni ostanek nastaja razpršeno, tako da je za zbiranje zadostnih količin kavnega ostanka potrebna dobra organiziranost deležnikov. Kavno usedlino, ki jo je treba čim prej osušiti, lahko sušimo na prostem (naravno sušenje), pri čemer so potrebne ustrezne površine (Anžič, 2021) ali pa tehnično v različnih sušilnih komorah. V obeh primerih je potrebno obračanje kavne preproge, da zagotovimo enakomeren potek sušenja. Po sušenju smo kavno usedlino dobro zdrobili, saj izkazuje težnjo po kepenju. Drobljenje smo izvajali ročno, s pomočjo sita z odprtinami dimenzije 3,15 mm.

Na osnovi sejalne analize smo ugotovili, da je imela žagovina 99,8 % delcev manjših od 3,15 mm (od tega je delež velikosti delcev med 1–2 mm znašal 59,9 %), medtem ko je pri kavnem ostanku 69,1 % delcev bilo v velikostnem razredu med 0,25 mm in 1,0 mm.

Pri analizi potrebne energije za sušenje vhodne surovine kavnega ostanka smo obravnavali dva vzorca dveh dobaviteljev kavnega ostanka. Povprečna vsebnost vode treh vzorcev prvega dobavitelja je bila 58,7 %, drugega pa 66,4 %. Pri pripravi mešanice z različnimi deleži kavnega ostanka za izdelavo peletov smo kavno usedlino posušili na vsebnost vode 11,5 %. Izračun potrebne energije za sušenje kavnega ostanka z enačbo (1) je za prvega dobavitelja znašal 339,8 Wh/kg za drugega pa 395,2 Wh/kg. V izračunih smo upoštevali, da je bila začetna temperatura kavnega ostanka 20 °C.

3.2 PELETIRANJE

3.2 PELLETIZATION

S peletiranjem ostankov kave nismo imeli nobenih izkušenj, zato smo se na podlagi dostopne literature odločili za okvirne parametre peletiranja. Atabani et al. (2023) sicer v svoji pregledni študiji podajajo celovito in podrobno analizo rabe različnih odpadnih biomaterialov in kavnega ostanka in se osredotočajo na kemijsko sestavo, vendar ne na-

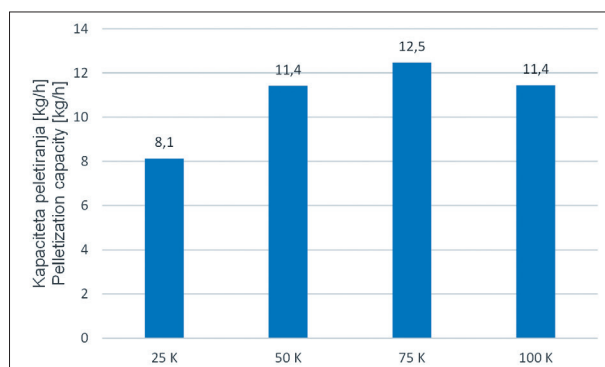


Slika 2. Peleti, izdelani z različnimi deleži kavnega ostanka in žagovine.

Figure 2. Pellets made with different proportions of spent coffee grounds and sawdust.

vajajo pogojev peletiranja. Podobno tudi Jeguirim et al. (2016) podrobno analizirajo termično razgradnjo peletov iz ostankov kave, vendar ne navajajo podrobnih pogojev, pri katerih je potekalo peletiranje. Limousy et al. (2013) so peletirali mešanice kavnega ostanka (50 %) in žagovine bora (50 %) in izvajali peletiranje pri temperaturi 80 °C. Iz tega razloga smo izvajali peletiranje pri ciljni temperaturi 80 °C, ki pa smo jo v primeru peletiranja z večjim deležem kavnega ostanka težko vzdrževali, saj je temperatura med peletiranjem padala. Predvidevamo, da se med peletiranjem mešanic z večjim deležem kave ni generiralo zadostno trenje kavnega ostanka na matrici in stenah kanalov, kar bi pripomoglo k dvigu temperature peletiranja kavnega ostanka.

Kapaciteto peletiranja smo določali na osnovi mase izdelanih peletov (slika 2) in ne na osnovi mase vhodne surovine. Kapaciteta se je gibala od 8 kg/h do 12,5 kg/h (slika 3). Peleti so po peletiranju padali na sito z velikostjo odprtin 5 mm, kar pomeni, da pri izračunu kapacitete nismo upošte-



Slika 3. Kapaciteta peletiranja mešanic z različnim deležem kavnega ostanka.

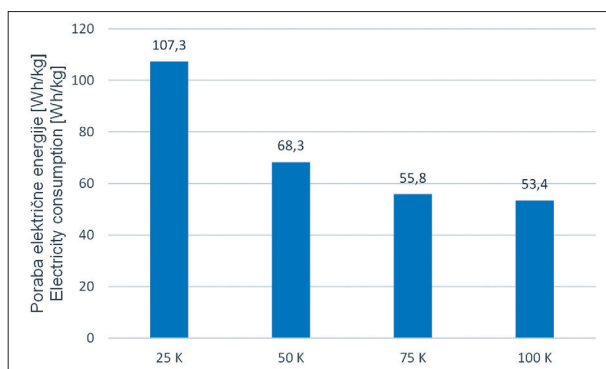
Figure 3. Pelletization capacity of mixtures with different proportions of spent coffee grounds.

vali manjših delcev. To tudi pojasnjuje, zakaj je kapaciteta peletiranja 100 K (100 % kavnega ostanka) bila nižja, kljub temu, da je peletiranje potekalo popolnoma brez težav in prekinitev. Pri tem peletiranju je bil prisoten večji delež peletov, manjših od dimenzije 5 mm.

3.3 PORABA ENERGIJE ZA PELETIRANJE

3.3 ENERGY CONSUMPTION FOR PELLETIZATION

Pri peletiranju različnih mešanic z različnim deležem kavnega ostanka smo merili tudi porabo električne energije peletirnega stroja. Porabljeno električno energijo za peletiranje posamezne mešanice smo normirali na maso (kg) proizvedenih peletov. Skladno s pričakovanji se je porabljena električna energija z večanjem deleža kavnega ostanka zmanjševala od 107,3 Wh/kg za mešanico s 25 % kavnega ostanka do 53,4 Wh/kg za 100 % kavnega ostanka (slika 4).



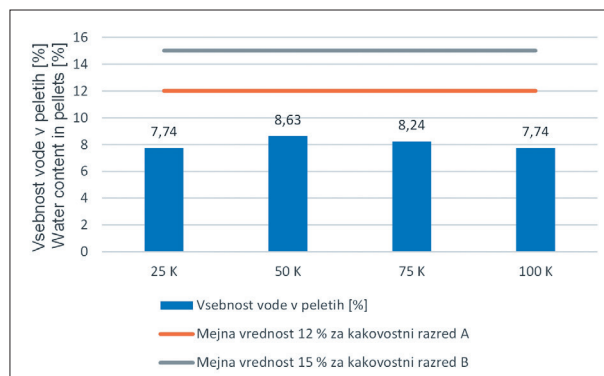
Slika 4. Poraba električne energije pri peletiranju mešanic z različnim deležem kavnega ostanka.

Figure 4. Electricity consumption during pelletization of mixtures with different proportions of spent coffee grounds.

3.4 LASTNOSTI PELETOV

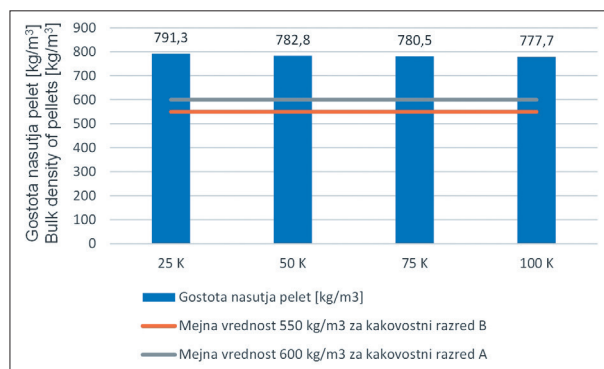
3.4 PROPERTIES OF PELLETS

Peletom, izdelanim iz mešanic z različnim deležem kavnega ostanka, smo izmerili lastnosti in ugotovili, da vsebnost vode (slika 5), gostota nasutja (slika 6), kurilna vrednost (slika 7) in vsebnost pepela (slika 9) izpolnjujejo zahteve za uvrstitev v najvišji kakovostni razred A po zahtevah standarda za nelesne pelete SIST EN ISO 17225-6:2021. Naraščanje deleža kavnega ostanka se odraža v naraščanju kurilne vrednosti, kar se ujema z ugotovitvami drugih avtorjev (Limousy et al., 2013; Ciesielczuk et al., 2015; Kasantiukl, 2019; Nosek et al., 2020; Woo



Slika 5. Vsebnost vode peletov, izdelanih iz mešanic z različnim deležem kavnega ostanka in mejne vrednosti za nelesne pelete.

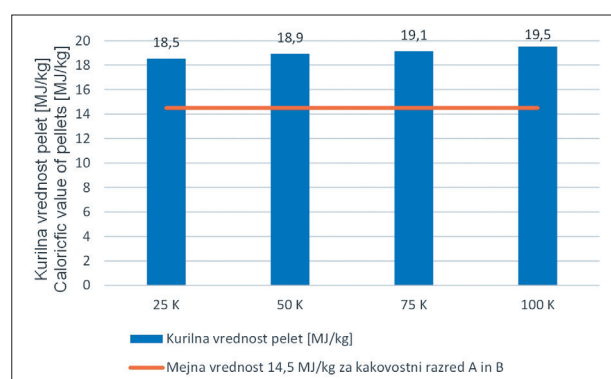
Figure 5. Water content of pellets from mixtures with different proportions of spent coffee grounds and limit values for non-wood pellets.



Slika 6. Gostota nasutja peletov, izdelanih iz mešanic z različnim deležem kavnega ostanka in mejne vrednosti za nelesne pelete.

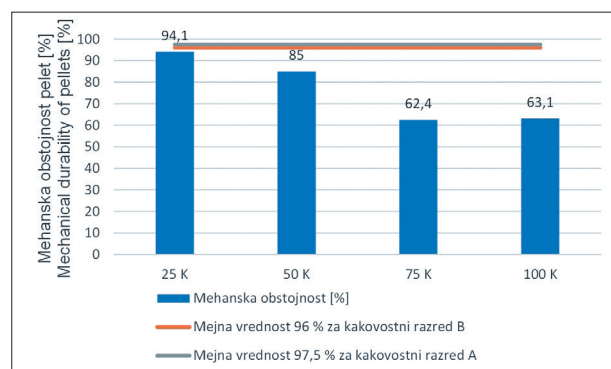
Figure 6. Bulk density of pellets made from mixtures with different proportions of spent coffee grounds and limit values for non-wood pellets.

et al., 2021), in je tudi pričakovano zaradi ugodne kemijske sestave kavnega ostanka. Kritična lastnost izdelanih peletov je mehanska obstojnost (slika 8), saj peleti ne dosega vrednosti niti za uvrstitev v kakovostni razred B za nelesne pelete. V primeru 25 % deleža kavnega ostanka smo sicer dosegli 94,1 % mehansko obstojnost (slika 8), kar je obetajoč rezultat. Menimo, da bi z optimiranjem pogojev peletiranja te mešanice dosegli zahteve standarda za uvrstitev v najvišji kakovostni razred. S povečevanjem deleža kavne usedline v peletih se njihova mehanska obstojnost močno zmanjša. V naši raziskavi smo vse mešanice z različnim deležem kavnega ostanka peletirali z matrico, ki je imela dolžino



Slika 7. Kurilna vrednost peletov, izdelanih iz mešanic z različnim deležem kavnega ostanka in mejne vrednosti za nelesne pelete.

Figure 7. Calorific value of pellets from mixtures with different proportions of spent coffee grounds and limit values for non-wood pellets.



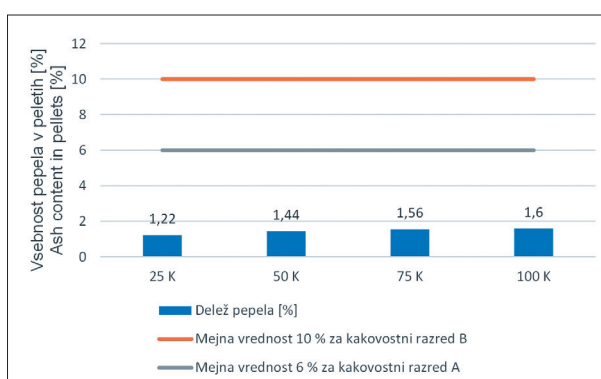
Slika 8. Mehanska obstojnost peletov, izdelanih iz mešanic z različnim deležem kavnega ostanka in mejne vrednosti za nelesne pelete.

Figure 8. Mechanical durability of pellets from mixtures with different proportions of spent coffee grounds and limit values for non-wood pellets.

kanalov 38 mm. Predvidevamo, da bi se mehanska obstojnost peletov, izdelanih iz kavnega ostanka, dalo povečati, če bi povečali dolžino kompresijskega kanala v matrici.

S povečevanjem deleža kavnega ostanka v mešanici za izdelavo peletov se povečuje tudi vsebnost pepela v izdelanih peletih (slika 9). Vendar je tudi pri peletih, izdelanih samo iz kavnega ostanka, vsebnost pepela veliko manjša od 6 %, kar je mejna vrednost za A kakovostni razred za nelesne pelete.

V raziskavi smo želeli ugotoviti možnost uporabe kavnega ostanka, ki se neizkoriščen odlaga v okolje, za proizvodnjo peletov. Že iz literaturnih po-



Slika 9. Vsebnost pepela v peletih, izdelanih iz mešanic z različnim deležem kavnega ostanka in mejne vrednosti za nelesne pelete.

Figure 9. Ash content in pellets from mixtures with different proportions of spent coffee grounds and limit values for non-wood pellets.

datkov smo pričakovali, da imajo peleti z večanjem deleža kave višjo kurilno vrednost, hkrati pa tudi večji delež pepela in slabšo mehansko odpornost, kar so potrdili tudi naši rezultati. Peleti, izdelani iz 100 % kavnega ostanka, imajo nizko mehansko obstojnost. Uporaba peletov, izdelanih iz 100 % kavnega ostanka, je manj priporočljiva, saj pride pri zgorevanju peletov iz čistega kavnega ostanka do padca temperature zgorevanja v kotlu, kar pripisujejo deležu finih delcev, ki »zadušijo« plamen. To vodi do nepopolnega izgorovanja, zaradi česar se poveča delež emisij ogljikovega monoksida, kot tudi delež emisij dušikovih oksidov (Atabani et al., 2023). Podobne ugotovitve navajajo tudi drugi (Limousy et al., 2013, Nosek et al., 2020), saj ugotavljajo, da se pri kurjenju peletov iz čistega kavnega ostanka zmanjša učinkovitost kotla in poveča delež finih delcev v dimnih plinih.

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

Za zagotavljanje zelene energije in v skrbi za okolje je potrebno vključevanje različnih virov biomase kot tudi njenih ostankov in odpadkov. Lesna biomasa je zagotovo eden od najpomembnejših virov trdih biogoriv, vendar se lahko le-ta uporablja tudi v drugih rabah, ki omogočajo večjo krožnost, kaskadno rabo in doseganje višje dodane vrednosti. Kljub temu so ostanki iz žagarske industrije najpo-

membnejši vir vhodne surovine za izdelavo peletov, ki so standardizirano trdo biokurivo, katerega proizvodnja in raba konstantno narašča.

V raziskavi smo želeli proučiti, ali so kavni ostanki primerni za izdelavo peletov oz. ali s kavnimi ostanki lahko nadomestimo del lesne biomase v peletih. Peletiranje smo izvedli na laboratorijski peletirni napravi in izdelali pelete s 25 %, 50 %, 75 % in 100 % volumskim deležem kavnega ostanka. Izdelanim peletom smo po standardnih postopkih določili vsebnost vode, gostoto nasutja, delež pepela, kurilno vrednost in mehansko obstojnost in pri tem upoštevali zahteve standarda za nelesne pelete SIST EN ISO 17225-6:2021. Izdelani peleti, ki imajo visoko kurilno vrednost in nizko vsebnost vode, ne dosegajo kakovostnih zahtev standarda samo v primeru mehanske obstojnosti in sicer ne glede na količino kavnega ostanka.

Meritve so pokazale, da se največ energije pri peletiranju porabi za sušenje vhodne surovine. V primeru peletiranja mešanic kavnega ostanka in žagovine je smiselno sušenje kavnega ostanka optimizirati, saj je vsebnost vode v kavnem ostanku večja kot pa v svežem lesu in tako predstavlja tudi večji strošek.

Rezultati raziskave kažejo, da je kavni ostanek lahko primeren dodatek oz. substitut žagovini za izdelavo peletov, vendar je treba prilagoditi pogoje peletiranja, zelo zahtevna pa je logistika dobave kavnega ostanka in tudi njegovo sušenje.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

Increasing energy consumption, stringent requirements to ensure the reliability of energy supply and concern for the environment in the broadest sense require the integration of a wide variety of energy sources. From the point of view of environmental protection, sustainability, the circular economy and economic efficiency, it is necessary to activate the use of a variety of bio-waste materials that remain as residual or waste materials during processing or use, and can largely replace the use of wood biomass for energy. This would also pursue the goals of the IEA (IEA, 2021) or Net Zero scenario. One such biowaste material is spent coffee grounds, which offer the potential for the production of pellets due to their availability and diverse

chemical composition. In recent years, wood pellets have become a very important form of solid biofuel, intended both for individual use to generate thermal energy and for industrial use to generate heat and electricity. The use and therefore also the production of pellets is constantly increasing and has risen 2.6-fold worldwide in the last ten years. Wood pellets are currently mainly produced from sawmill residues, but most of these residues can be used more efficiently in new innovative products with great substitution potential, according to the principle of the circular economy.

The study investigated whether spent coffee grounds can be used for the production of pellets, whereby spent coffee grounds can replace part of the wood biomass (sawdust). Pelletizing was carried out on a laboratory pelletizing press and pellets were made using a mixture of 25% (25 K), 50% (50 K), 75% (75 K) and 100% (100 K) of spent coffee grounds with spruce sawdust. Spent coffee grounds received from a restaurant were first dried to prevent the occurrence of mold. Pelletization was carried out on a Kahl flat press at a target temperature of 80 °C, while the power consumption was monitored (Figure 4). After cooling and conditioning, we determined the water content (Figure 5), bulk density (Figure 6), calorific value (Figure 7), mechanical durability (Figure 8) and ash content (Figure 9) of the pellets and compared them with the requirements of the EN ISO 17225-6:2021 standard.

The results show that the pellets only fail to meet the requirements of the mentioned standard in the case of mechanical durability. We can conclude that spent coffee grounds have the potential to partially replace sawdust in the production of pellets (at a proportion of 50% or less), but it is necessary to adjust the pelletizing conditions. It should be noted that the organization of the collection, delivery logistics and drying of spent coffee grounds is very demanding and yet crucial for the successful activation of spent coffee grounds for pellet production.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Izvedbo raziskave je omogočila Javna agencija za raziskovalno in inovacijsko dejavnost (ARIS), programske skupine P4-0015 Les in lignocelulozni

kompoziti, P4-0107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija in P2-0182 Razvojna vrednotenja. Za tehnično pomoč pri raziskavi se zahvaljujemo Dragu Vidicu, Urbanu Žitku in Aleksu Šulcu.

VIRI

REFERENCES

- Anžič, L. (2021). Briketiranje kavnih ostankov za pripravo goriva iz odpadkov. Diplomsko delo. Ljubljana: UL NTF
- Atabani, A. E., Mahmoud, E., Aslam, M., Naqvi, S. R., Juchelkova, D., Bhatia, S. K., ..., & Palacky, P. (2023). Emerging potential of spent coffee ground valorization for fuel pellet production in a biorefinery. *Environment Development and Sustainability*, 25, 7585–7623. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02361-z>
- 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.
- Ciesielczuk, T., Karwaczyńska, U., & Sporek, M. (2015). The possibility of disposing of spent coffee ground with energy recycling. *Journal of Ecological Engineering*, 4, 133–138. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/11111>
- Colantoni, A., Paris, E., Bianchini, L., Ferri, S., Marcantonio, V., Carnevale, M., ..., & Gallucci, F. (2021). Spent coffee ground characterization, pelletization test and emissions assessment in the combustion process. *Scientific reports*, 11, art. 5119.
- Čufar, K., Gorišek, Ž., Merela, M., Kropivšek, J., Gornik Bučar, D., & Straže, A. (2017). Lastnosti bukovine in njena raba. *Les / Wood*, 66(1), 27–39.
- de Souza, H. J. P. L., Muñoz, F., Mendonça, R. K., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., ..., & Rodríguez-Soalleiro, 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*, 163, 1802–1816.
- Döring, S. (2013). *Power from pellets. Technology and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- FAO (2023). FAOSTAT. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (1.3.2024)
- 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 (2023a). Trg lesnih peletov v Sloveniji v letu 2022. URL: <https://wcm.gozdis.si/sl/infogozd/strokovni-prispevki/clanki/2023072611582137/trg-lesnih-peletov-v-sloveniji-v-le-tu-2022> (1.3.2024)
- GIS (2023b). Kakovost peletov na slovenskem trgu v letu 2023. URL: <https://wcm.gozdis.si/sl/infogozd/strokovni-prispevki/clanki/2023090809591006/kakovost-peletov-na-slovenskem-trgu-v-le-tu-2023/> (15.3.2024)
- Gornik Bučar, D., Prislan, P., Smolnikar, P., Stare, D., Krajnc, N., & Gospodarič, B. (2021). Uporabnost lesnih ostankov tujerodnih invazivnih drevesnih vrst za proizvodnjo peletov. *Les/Wood*, 70(1), 45–58. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2021.v70n01a04>
- GOV (2024). URL: <https://www.gov.si/teme/ravnanje-z-odpadki/> (15.3.2024)
- IEA (2021). URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (20.3.2024)
- Jeguirim, M., Limousy, L., & Fossard, E. (2016). Characterization of coffee residues pellets and their performance in residential combustor. *International journal of green energy*, 13(6), 608–615. DOI: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.888664>
- Kasantiuk, B. (2019). The potential study of coffee, acacia wood and corn cob residues to produce biomass pellets fuel. In: 10th TSME International conference on mechanical engineering IOP Conf. Series: material science and engineering 886 (2020) 1012002 88g 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/886/1/012002>
- Kropivšek, J., & Gornik Bučar, D. (2017). Dodana vrednost v izdelkih v gozdno-lesni verigi. *Les/Wood*, 66(1), 62–71.
- Kropivšek, J., Straže, A., & Gornik Bučar, D. (2023). Kvalitativna/strateška analiza izbranih verig vrednosti v slovenskem gozdno-lesnem biogospodarstvu. *Les/Wood*, 72(1), 35–48. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2023.v72n01a04>
- Kropivšek, J., Straže, A., & Gornik Bučar, D. (2024). Analysis of primary value chains in the Slovenian forest and wood bioeconomy. *Drvena industrija*, (v tisku)
- Lee, K. T., Shih, Y. T., Rajendran, S., Park, Y. K., & Chen, W. H. (2023). Spent coffee ground torrefaction for waste remediation and valorization. *Environmental pollution*, 324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121330>
- Limousy, L., Jeguirim, M., Dutourinié, P., Kraiem, N., Lajili, M., & Said, R. (2013). Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, 107, 323–329.
- Nosek, R., Tun, M. M., & Juchelkova, D. (2020). Energy utilization of spent coffee grounds in the form of pellets. *Energy*, 13(5), 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13051235>
- Obernberger, I., Thek, G. (2010). *The pellet handbook. The production and Thermal utilisation of pellets*. London, Washington: Earthscan, 549 str.
- Peréz-Burillo, S., Cervera-Mata, A., Fernández-Arteaga, A., Pastoriza, S., Rufián-Henares, J. A., & Delgado, G. (2022). Why should we be concerned with the use of spent coffee grounds as an organic amendment of soils? A narrative review. *Agronomy*, 12(11), 2771. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112771>
- Pirc Barčič, A., Grošelj, 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. *Drvena industrija*, 71(4), 395–402. DOI: <https://doi.org/10.5552/drvind.2020.2024>

- Prislan, P., Krajnc, N., Piškur, M. (2015). Kakovost lesnih pelet na slovenskem trgu. *Gozdarski vestnik*, 73(9), 411–418.
- SIST (2016). Trdna biogoriva–Metode za določevanje prostorninske mase (SIST EN ISO 17828:2016).
- SIST (2016). Trdna biogoriva–Določevanje mehanske odpornosti peletov in briketov 1. del: Peleti (SIST EN ISO 17831-1:2016).
- SIST (2017). Trdna biogoriva–Določevanje vlage–Metoda sušenja v peči–2. del: Celotna vlaga–Poenostavljena metoda (SIST EN ISO 18134-2:2017).
- SIST (2017). Trdna biogoriva–Določevanje kalorične vrednosti (SIST EN ISO 18125:2017).
- SIST (2021). Trdna biogoriva–Specifikacije goriv in razredi–6. del: Razvrščeni nelesni peleti (SIST EN ISO 17225-6:2021).
- SIST (2023). Trdna biogoriva–Določevanje vsebnosti pepela (SIST EN ISO 18122:2023).
- SiStat (2024 a). URL: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/2490201S.px/table/tableViewLayout2/> (1.3.2024)
- SiStat (2024 b). URL: <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/-/1706041S.px8> (5.3.2024)
- Škrokov, M. (2018). Uporabnost peletov iz žagovine in oljčnih tropin. Dipl. delo. Ljubljana: UL, Biotehniška fakulteta, 62 p.
- Timber online (2024). URL: <https://www.timber-online.net/energy/2023/11/strong-growth-in-asian-demand-for-pellets.html> (11.3.2024)
- Woo, D. G., Kim, S. H., & Kim, T. H. (2021). Solid fuel characteristic of pellets comprising spent coffee grounds and wood powder. *Energies*, 14, 371. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14020371>
- 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>

