



VALIDACIJA NIR SPEKTROSKOPIJE ZA DOLOČANJE KAKOVOSTI LESNIH PELETOV

VALIDATION OF NIR SPECTROSCOPY FOR WOOD PELLET QUALITY ASSESSMENT

Darja Stare^{1*}, Žiga Lukančič¹, Denisa Krevh², Marko Uhan²

UDK članka: 630*839.81

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 25.3.2026

Sprejeto / Accepted: 25.5.2026

Izvleček / Abstract

Izvleček: V zadnjem desetletju se je v EU povečala raba lesne biomase, zlasti lesnih peletov, kar poudarja pomen zanesljivega nadzora kakovosti. Namen raziskave je bil ovrednotiti primernost bližnje rdeče (NIR) spektroskopije kot hitre metode za določanje kakovosti peletov v primerjavi z laboratorijskimi metodami po SIST EN ISO standardih. V raziskavi smo analizirali 14 vzorcev peletov kakovostnega razreda A1 z obema metodama ter primerjali vsebnost vlage, pepela, gostote nasutja in mehanske obstojnosti, pri čemer smo rezultate statistično ovrednotili z vidika ujemanja in ponovljivosti. Rezultati kažejo, da NIR spektroskopija omogoča hitro in učinkovito napoved ključnih kemijsko-fizikalnih parametrov kot sta vsebnost vlage in pepela, z dobro primerljivostjo s standardnimi laboratorijskimi metodami, medtem ko pri določanju lastnosti, kot je mehanska obstojnost in gostota nasutja, ostaja omejena. Z vidika praktične uporabe je zato primerna kot orodje za hitro oceno nekaterih parametrov, medtem ko laboratorijske metode ostajajo ključne za ugotavljanje skladnosti s standardi in certificiranje.

Ključne besede: NIR–bližnja rdeča spektroskopija, lesna biomasa, peleti, kakovost

Abstract: The use of wood biomass, especially wood pellets, has increased in the EU over the past decade, emphasizing the importance of reliable quality control. The aim of this study was to evaluate the suitability of near-infrared (NIR) spectroscopy as a rapid method for determining pellet quality, in comparison with laboratory methods according to SIST EN ISO standards. Fourteen samples of A1 quality pellets were analysed using both methods, and the moisture content, ash content, bulk density, and mechanical durability were compared. The results were statistically evaluated for agreement and repeatability. The findings show that NIR spectroscopy enables rapid and efficient prediction of some key parameters like moisture and ash content, with good comparability to standard laboratory methods, although it remains limited in determining mechanical properties. From a practical perspective, it is therefore suitable as a tool for rapid assessment of certain parameters like bulk density, and mechanical durability. However, reference laboratory methods remain essential for determining compliance with standards and certification.

Keywords: NIR – near-infrared spectroscopy, wood biomass, pellets, quality

1 UVOD

1 INTRODUCTION

V zadnjem desetletju se je v Evropski uniji (EU) in širše povečalo zanimanje za uporabo lesne biomase kot obnovljivega vira energije, zlasti v obliki lesnih peletov za individualno in industrijsko rabo. Ta trend je povezan s prehodom z energetskega sistema, ki temelji predvsem na fosilnih gorivih, na sistem, ki temelji na obnovljivih virih energije. Dodatno ga spodbujajo cilji razogljičenja ter razvoj

biogospodarstva, v katerem ima lesna biomasa pomembno vlogo kot lokalno dostopen, obnovljiv in razmeroma stabilen energent. Direktiva (EU) 2018/2001 (RED II) ter njena posodobitev, Direktiva (EU) 2023/2413 (RED III), poudarjata pomen trajnostne in učinkovite rabe biomase ter državam članicam priporočata uporabo usklajenih evropskih standardov za zagotavljanje primerljivosti, sledljivosti in kakovosti biogoriv. Evropski zeleni dogovor (Evropska komisija, 2019) in EU Podnebni

¹ Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Labtim d.o.o., Peruzzijska ulica 109, 1000 Ljubljana, Slovenija

* e-pošta: darja.stare@gozdis.si

zakon (Uredba (EU) 2021/1119) pravno zavezuje ta EU k doseganju podnebne nevtralnosti do leta 2050 ter vsaj 55-odstotnemu zmanjšanju emisij do leta 2030, pri čemer ima bioenergija pomembno vlogo. Na nacionalni ravni ima raba lesnih goriv pomembno vlogo pri doseganju ciljev Celovitega nacionalnega energetskega in podnebne načrta Republike Slovenije (NEPN, 2020), zlasti pri zmanjšanju emisij toplogrednih plinov ter povečevanju deleža obnovljivih virov energije v končni rabi. Lesni peleti tako predstavljajo pomemben proizvod gozdno-lesne verige z visoko dodano vrednostjo in imajo pomembno vlogo pri doseganju energetskih in podnebnih ciljev EU. Evropa v zadnjih letih še vedno predstavlja največjo regijo tako po proizvodnji kot porabi peletov. Dolgoročni trend rasti proizvodnje in porabe peletov se je v zadnjih letih upočasnil ali v določenih regijah začel stagnirati. Po podatkih Bioenergy Europe (2025) je svetovna proizvodnja peletov v letu 2024 ostala razmeroma stabilna in dosegla 48,3 milijona ton, medtem ko je svetovna poraba prvič presegla 45 milijonov ton. Poudarjajo, da nadaljnji razvoj trga ni odvisen le od povpraševanja, temveč predvsem od stabilnih političnih ukrepov in finančnih podpor, ki pomembno vplivajo na širitev uporabe ogrevalnih sistemov na pelete v EU. Trend proizvodnje peletov v zadnjih letih v Sloveniji kaže rast, prav tako se je bistveno povečalo število proizvajalcev, kar se ujema s širšim evropskim trendom rasti uporabe biomase za ogrevanje (Ščap et al., 2025).

Povpraševanje po lesnih gorivih je v številnih državah že povzročilo omejitve pri razpoložljivosti surovin, kot so žagovina in lesni oblanci, kar povečuje pritisk na učinkovito rabo virov, vključevanje alternativnih surovin ter dosledno zagotavljanje kakovosti končnih produktov. Zaradi naravne heterogenosti biomase, ki je posledica vrste lesa, rastiščnih razmer, časa sečnje, tehnologije predelave in skladiščenja, je nadzor kakovosti lesnih goriv ključen tako za učinkovito delovanje kurilnih naprav kot tudi za zmanjševanje emisij. Na ravni EU (in Slovenije) so za področje trdnih biogoriv uveljavljeni standardi ISO, ki zagotavljajo enotno terminologijo, metodologijo in razvrščanje goriv. Zahteve za kakovost in razvrščanje trdnih biogoriv v posamezne kakovostne razrede (npr. lesni peleti, sekanci, briketi), tako za neindustrijsko kot industrijsko rabo, določa-

jo standardi serije ISO 17225, v Sloveniji trenutno veljavni SIST EN ISO 17225 iz leta 2021.

Standardne metode na področju kakovosti lesnih goriv se osredotočajo predvsem na določanje ključnih kemijsko-fizikalnih parametrov, kot so vsebnost vlage, vsebnost pepela, mehanska obstojnost, kurilna vrednost ter elementna sestava, ki neposredno vplivajo na energijsko učinkovitost, emisije in primernost goriva za posamezne tipe kurilnih naprav. Metode predstavljajo referenčno osnovo za določanje kakovosti lesnih goriv in so nujne za certificiranje, tržni nadzor ter znanstveno primerljivost rezultatov. Standardne metode zagotavljajo sledljivost in zanesljivost, vendar so pogosto časovno potratne, zahtevajo obsežno pripravo vzorcev ter laboratorijsko infrastrukturo, kar omejuje njihovo uporabnost pri sprotne nadzoru proizvodnje. Zato se v zadnjih letih vse več pozornosti namenja tudi razvoju hitrih in nekontaktnih metod, ki bi dopolnjevale ali nadomeščale klasične laboratorijske postopke. Vse pomembnejšo vlogo med hitrimi analiznimi tehnikami ima bližnja infrardeča (NIR) spektroskopija, ki omogoča hitro in cenovno učinkovito napoved izbranih parametrov kakovosti ter s tem omogoča sproten nadzor proizvodnje in optimizacijo procesov (Gillespie et al., 2015; Sundaram et al., 2015; Feng et al., 2018; Mancini et al., 2020; Ahmed et al., 2025). Zaradi svojega hitrega odziva je metoda NIR posebej primerna za industrijsko okolje, saj omogoča vgradnjo neposredno v proizvodno linijo ter kontinuirano spremljanje proizvoda v realnem času. Tak pristop je že uveljavljen v prehrambni in farmacevtski industriji, kjer predstavlja pomemben del sodobnih sistemov za zagotavljanje in sprotni nadzor kakovosti (npr. Mantanus et al., 2010; Ahmed et al., 2025), vse bolj pa tudi v lesnopredelovalni industriji (Lestander et al., 2009; Posom et al., 2016; Pitak et al., 2022; Ahmed et al., 2025). Metoda NIR se izkaže kot primerna predvsem za napoved kemijsko-fizikalnih lastnosti, kot so vsebnost vlage, pepela ali kurilna vrednost, medtem ko za določanje mehanskih lastnosti (npr. mehanska obstojnost peletov, delež finih delcev) ostaja omejena ali posredna (Gillespie et al., 2015; Mancini et al., 2020).

Napoved vsebnosti vlage je neposredno povezana z izrazitimi absorpcijskimi pasovi O–H vezi vode in hidroksilnih skupin v lesni biomasi, kar omogoča visoko napovedno točnost (Gillespie et

al., 2015). Podobno je napoved kurilne vrednosti posredno vezana na kemijsko sestavo (delež ogljika, vodika in kisika), ki določa energijsko vrednost goriva in se odraža v NIR spektrih preko značilnih absorpcijskih pasov organskih komponent (Gillespie et al., 2015). Pri vsebnosti pepela je povezava manj neposredna, saj mineralna frakcija sama po sebi ne absorbira NIR sevanja, vendar je napoved še vedno mogoča na podlagi posrednih korelacij s kemijsko sestavo organskega dela biomase in spremljajočimi elementi, kar vodi do zmerne napovedne uspešnosti (Gillespie et al., 2015; Mancini et al., 2020). Nasprotno pa je pri mehanskih in strukturnih lastnostih povezava z NIR spektralnim odzivom pretežno posredna. Mehanska obstojnost je odvisna od vezave delcev, deleža lignina ter pogojev stiskanja, kar NIR zaznava le posredno preko vpliva kemijske sestave na vezivne mehanizme. Gostota nasutja in delež finih delcev sta dodatno pogojena z geometrijo delcev, poroznostjo in razporeditvijo delcev, kar ne vpliva na specifične absorpcijske pasove, zato je njuna napoved manj robustna. Kljub temu so študije pokazale, da je z uporabo naprednih kemometričnih pristopov mogoče zaznati določene korelacije, ki izhajajo iz povezave med kemijsko sestavo, mikrostrukturo in stopnjo zgoščenosti materiala (Mancini et al., 2020) ter iz posredne povezave med odbojnostjo in notranjo strukturo peletov (Pitak et al., 2022).

Mancini in sodelavci (2018) tudi ugotavljajo, da je NIR spektroskopija primerna metoda za zanesljivo določanje izvora lesa in nadzor surovine v proizvodnji peletov, saj omogoča učinkovito razlikovanje lepljenega in obdelanega lesa (npr. iverne plošče, vezane plošče in OSB) od naravnega neobdelanega lesa. Podobno ugotavljajo tudi Toscano in sodelavci (2022), da infrardeča spektroskopija (NIR/FTIR) omogoča razlikovanje lesnih peletov glede na njihov izvor in sestavo. Lestander in sodelavci (2009) ter Gillespie in sodelavci (2016) pa so poleg dobrih napovedi vsebnosti vlage in sestave mešanic žagovine ugotovili tudi možnost napovedi porabe električne energije, kar kaže, da NIR spektri vsebujejo informacije o kompresijskih in trenjskih lastnostih vhodne biomase, pomembnih za spremljanje in optimizacijo procesa peletiranja. Zato NIR ne nadomešča standardnih metod in kakovostnih zahtev po SIST EN ISO 17225-2, temveč jih dopolnjuje, pri čemer referenčne metode ostajajo temelj za kali-

bracijo, validacijo in zagotavljanje merilne sledljivosti (Gillespie et al., 2015; Mancini et al., 2020; Toscano et al., 2022; Ahmed et al., 2025).

Namen raziskave je ovrednotiti primernost in uporabnost NIR kot hitre analizne metode za določanje izbranih parametrov kakovosti lesnih goriv v primerjavi z laboratorijskimi referenčnimi metodami po SIST EN ISO standardih. Izhodišče raziskave temelji na predpostavki, da NIR spektroskopija zaradi svoje občutljivosti na vibracijske lastnosti kemijskih vezi v materialu omogoča zanesljivejšo napovedovanje kemijsko-fizikalnih parametrov, ki so neposredno povezani s kemijsko sestavo (npr. vsebnost vlage in pepela), medtem ko je pri strukturnih in mehanskih lastnostih (npr. mehanska obstojnost, gostota nasutja) pričakovati šibkejšo povezavo z NIR spektralnim odzivom. Predpostavljamo tudi, da so mehanske lastnosti peletov posredno povezane z njihovo kemijsko sestavo in mikrostrukturo (npr. delež lignina, vezava delcev), ki vplivajo na nastanek in stabilnost vezi med delci ter posledično na mehansko obstojnost in gostoto nasutja. Osrednji cilj raziskave je zato validirati ustrezne NIR-kalibracijske modele ter preveriti, ali lahko NIR-metoda ob ustrezni kalibraciji napove ključne kemijsko-fizikalne parametre z merilno negotovostjo, ki je primerljiva negotovosti standardnih laboratorijskih metod ter predstavlja učinkovito dopolnilo standardnim analizam, zlasti za potrebe hitrega nadzora kakovosti in podpore odločanju v proizvodnih in logističnih procesih. Pri tem pričakujemo, da bo NIR spektroskopija dosegala višjo napovedno točnost pri parametrih, ki so neposredno povezani s kemijsko sestavo, medtem ko bo napoved mehanskih in strukturnih lastnosti manj zanesljiva zaradi njihove posredne povezanosti s spektralnim odzivom.

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

V raziskavi smo primerjali dve metodi določanja kakovosti lesnih peletov. Najprej smo pelete analizirali po standardnih metodah na podlagi SIST EN ISO standardov, nato pa so bili isti vzorci analizirani še z laboratorijskim NIR spektrometrom. Testirali smo parametre: vsebnost vlage, delež pepela, gostota nasutja in mehanska obstojnost. Rezultati obeh metod so bili statistično primerjani z namenom ocene ujemanja, ponovljivosti ter uporabnosti

NIR metode kot hitre alternativne metode za ocenjevanje kakovosti lesnih peletov.

2.1 PRIPRAVA IN ANALIZA VZORCEV

2.1 PREPARATION AND ANALYSE OF SAMPLES

Vzorci lesnih peletov so bili pred analizami ustrezno homogenizirani, torej premešani za zagotovitev enakomerne sestave in reprezentativnosti vzorca, potem pa je bila naključno odvzeta ustrezna količina celih peletov. Za potrebe standardnih analiz so bili peleti, kjer je to zahtevala metodologija, zmleti in pripravljeni v skladu s predpisanimi postopki posameznih SIST EN ISO standardov. Analiziranih je bilo 14 različnih vzorcev peletov, ki so na embalaži zagotavljali kakovostni razred A1. Za vsak vzorec sta bila odvzeta minimalno 2 podvzorca za 2 ponovitvi posameznih analiz. V primeru vzorca 1 sta bili narejeni dve ponovitvi, v primeru vseh ostalih vzorcev pa so bile opravljene po 4 ponovitve. Za potrebe NIR analiz posebna priprava vzorcev ni bila potrebna in je bila za vsak vzorec naključno odvzeta ustrezna količina celih peletov, s katero je bila enakomerno zapolnjena merilna posodica NIR spektrometra (slika 1).

Vsebnost vlage v lesnih peletih je bila določena po gravimetrični metodi v skladu s standardom SIST EN ISO 18134-2:2024, ki temelji na sušenju vzorca pri nadzorovani temperaturi do konstantne mase. Masni delež vlage je bil izračunan iz razlike med maso vzorca pred in po sušenju ter izražen na vlažni osnovi. Pri tem so bili upoštevani pogoji merjenja in ponovljivost metode. Analize so bile izvedene v več ponovitvah, rezultat pa je bil izražen kot povprečna vrednost. Merilna negotovost metode izhaja predvsem iz tehtanja, homogenosti vzorca ter vpliva zunanjih dejavnikov.

Delež pepela je bil določen po metodi v skladu s standardom SIST EN ISO 18122:2023. Pripravljeni vzorci so bili postopno segrevani in žgani v laboratorijski peči pri predpisani temperaturi, dokler ni bila dosežena konstantna masa nezgorele snovi (pepela). Masni delež pepela je bil izražen kot razmerje med maso anorganskega ostanka po žganju in suho maso vzorca, kar omogoča oceno mineralne vsebnosti goriva. Ponovljivost meritev je bila zagotovljena tako, da je bil vsak vzorec analiziran v najmanj dveh podvzorcih, ki sta bila hkrati segrevana in žgana, končna vrednost pa je bila določena kot povprečje obeh meritev. Merilna negotovost pa

je povezana predvsem s stabilnostjo temperature v peči, maso preskusnega vzorca ter homogenostjo mletega materiala.

Mehanska obstojnost lesnih peletov je bila določena po metodi v skladu s standardom SIST EN ISO 17831-1:2025, ki opisuje postopek mehanskega obremenjevanja peletov v standardiziranem preizkusnem bobnu. Po v naprej določenem številu obratov je bil določen delež drobnih delcev, mehanska obstojnost pa je izražena kot masni delež nepoškodovanih peletov po preskusu. Preskusi so bili izvedeni v več ponovitvah, pri čemer na ponovljivost in merilno negotovost vpliva predvsem začetna porazdelitev velikosti peletov, masa vzorca ter natančnost sejanja drobnih delcev.

Gostota nasutja je bila določena po metodi v skladu s standardom za določanje prostorninske mase SIST EN ISO 17828:2025, pri kateri se meri masa znane prostornine peletov v standardizirani posodi brez dodatnega zgoščevanja. Rezultat je izražen kot razmerje med maso in prostornino nasutega materiala. Merilna negotovost metode je povezana z natančnostjo tehtanja, prostornine merilne posode ter načinom nasutja materiala, zato so bile meritve izvedene v več ponovitvah, rezultati pa izraženi kot povprečne vrednosti.

V naslednjem koraku so bili isti vzorci analizirani z laboratorijskim NIR spektrometrom Perten DA 7250 proizvajalca PerkinElmer, pri čemer so bile referenčne vrednosti, pridobljene s standardnimi metodami, uporabljene kot osnova za ovrednotenje NIR napovednih modelov. NIR temelji na interakciji bližnje infrardeče svetlobe z materialom, pri čemer pride do absorpcije elektromagnetnega valovanja v spektralnem območju med približno 780 in 2500 nm, v raziskovanem primeru med 950 in 1650 nm. NIR meritve so bile izvedene v refleksijskem načinu, pri katerem instrument vzorec osvetli z bližnjo infrardečo svetlobo, detektor pa zazna delež svetlobe, ki se od površine vzorca odbije nazaj. Posamezna meritev je trajala le nekaj sekund, med merjenjem pa se je merilna posodica vrtela. Za vsak vzorec je bilo zajetih več zaporednih spektrov z namenom zmanjšanja vpliva naključnega šuma in izboljšanja ponovljivosti meritev. Napovedi posameznih parametrov so bile pridobljene z uporabo že razvitih kalibracijskih modelov proizvajalca, tako napovedi kot modeli temeljijo na spektrih celotnega spektralnega območja. V okviru te študije so



Slika 1. Hitra analiza peletov z NIR spektroskopijo v Laboratoriju za lesno biomaso, Gozdarski inštitut Slovenije (foto: D. Stare).

Figure 1. Rapid analysis of pellets with NIR spectroscopy in the Laboratory for Wood Biomass, Slovenian Forestry Institute (photo: D. Stare).

bile uporabljene neposredne napovedi teh modelov, medtem ko surovi spektralni podatki niso bili dodatno obdelovani ali analizirani. Ovrednotenje je bilo usmerjeno v presojo napovedne uspešnosti modelov na podlagi primerjave z referenčnimi laboratorijskimi vrednostmi, vključno z analizo sistematičnega odmika in naklona.

2.2 PRIPRAVA IN OBDELAVA PODATKOV

2.2 DATA PROCESSING AND ANALYSES

Za oceno napovedne sposobnosti NIR modelov so bile uporabljene absolutne razlike med laboratorijskimi referenčnimi vrednostmi in NIR napovedmi, izražene v izvornih merskih enotah (odstotne točke ali kg/m^3). Čeprav so nekateri parametri izraženi v odstotkih, odstopanja niso bila izražena kot relativni delež procentnih vrednosti, saj tak pristop lahko povzroči matematično povečanje napake pri nizkih absolutnih vrednostih. Namesto tega je bila za oceno skladnosti uporabljena:

- standardna napaka napovedi (standard error of prediction, SEP): ocena negotovosti meritve v NIR v primerjavi z laboratorijsko referenčno vrednostjo;
- koeficient determinacije (R^2);

- analiza sistematičnega odmika (bias): sistematična razlika med laboratorijskimi referenčnimi vrednostmi in NIR vrednostmi;
- analiza naklona regresijske premice (slope): naklon med rezultati NIR in laboratorijskimi referenčnimi vrednostmi;
- največja absolutna razlika.

Izražanje napake v odstotnih točkah omogoča realno in neposredno primerjavo med metodama ter odraža dejansko merilno negotovost brez vpliva relativnega skaliranja.

3 REZULTATI

3 RESULTS

Za analize, opravljene na podlagi metod po SIS EN ISO standardih, so v preglednici 1 za vsak vzorec prikazane povprečne vrednosti štirih ponovitev, napovedane vrednosti po NIR metodi pa so prikazane za vse 4 ponovitve analiz za posamezen vzorec.

Za oceno ujemanja med napovedanimi in izmerjenimi vrednostmi smo analizirali skladnost rezultatov obeh metod z uporabo statističnih kazalnikov (SEP, R^2 , bias, slope in največja absolutna razlika). Rezultati primerjav po posameznem parametru (vsebnost vlage, mehanska obstojnost, delež pepela in gostota nasutja) so predstavljeni v preglednici 2.

3.1 NAPOVED VSEBNOSTI PEPELA

3.1 ASH CONTENT PREDICTION

Napoved deleža pepela je pokazala dobro ujemanje z laboratorijskimi meritvami ($R^2 = 0,809$; SEP = 0,189 %) (slika 2, preglednica 1 in 2). Povprečna absolutna razlika med laboratorijskimi in NIR rezultati znaša približno 0,19 odstotne točke, največja razlika pa je bila manjša od 0,5 odstotne točke. Glede na razpon analiziranih vrednosti (0,17–1,13 %) je takšna negotovost primerna za hitro industrijsko kontrolo kakovosti.

Na desni strani grafa je mogoče opaziti posamezne točke, ki vizualno izstopajo in bi jih lahko interpretirali kot potencialni odstopajoči podatek. Vendar podrobnejši pregled pokaže, da vrednost ne odstopa zaradi merilne napake ali tehničnega artefakta, temveč predstavlja dejanski vzorec z višjo vsebnostjo pepela, ki razširja merilni razpon podatkov. Ker koeficient determinacije (R^2) temelji na po-

Preglednica 1. Rezultati analize skladno s SIST EN ISO standardi in po NIR spektroskopiji.

Table 1. Results of analysis in accordance with SIST EN ISO standards and by NIR spectroscopy.

Št. / Nr.	Vzorec / Sample ID	Vsebnost vlage (%) LAB / Lab Moisture (%)	Vsebnost vlage (%) NIR / Predicted Mo- isture (%)	Mehanska obstočnost (%) LAB / Lab Durabi- lity (%)	Mehanska obstočnost (%) NIR / Predicted Durability (%)	Delež pepela (%) LAB / Lab Ash (%)	Delež pe- pela (%) NIR / Predi- cted Ash (%)	Gostota nasutja (kg/m ³) LAB / Lab Densi- ty (kg/m ³)	Gostota nasutja (kg/m ³) NIR / Predicted Density (kg/m ³)
1	22d	6,63	7,13	98,55	99,22	0,55	0,47	665,81	675,13
2	22c	6,63	7,34	98,55	99,34	0,55	0,44	665,81	677,30
3	22b	6,63	7,18	98,55	99,16	0,55	0,41	665,81	672,93
4	22a	6,63	7,30	98,55	99,33	0,55	0,44	665,81	673,20
5	16d	7,53	7,87	98,54	99,01	0,34	0,30	646,90	679,82
6	16c	7,53	7,94	98,54	98,96	0,34	0,26	646,90	677,81
7	16b	7,53	8,01	98,54	98,95	0,34	0,26	646,90	679,90
8	16a	7,53	8,02	98,54	99,01	0,34	0,26	646,90	681,39
9	15d	9,28	8,91	98,32	99,52	0,49	0,33	634,27	664,72
10	15c	9,28	8,87	98,32	99,54	0,49	0,36	634,27	669,76
11	15b	9,29	9,10	98,32	99,76	0,49	0,31	634,27	663,21
12	15a	9,28	8,94	98,32	99,64	0,49	0,32	634,27	668,61
13	11d	8,02	7,53	98,83	98,54	0,50	0,51	656,21	656,56
14	11c	8,02	7,38	98,83	98,45	0,50	0,46	656,21	656,56
15	11b	8,02	7,45	98,83	98,45	0,50	0,45	656,21	655,73
16	11a	8,02	7,45	98,83	98,38	0,50	0,44	656,21	651,11
17	10d	6,10	6,24	98,47	98,56	0,98	0,75	623,25	633,40
18	10c	6,10	6,32	98,47	98,40	0,98	0,74	623,25	629,74
19	10b	6,10	6,24	98,47	98,21	0,98	0,75	623,25	632,38
20	10a	6,10	6,30	98,47	98,20	0,98	0,76	623,25	632,38
21	09d	7,37	7,40	98,57	98,49	0,67	0,40	702,47	672,20
22	09c	7,37	7,44	98,57	98,21	0,67	0,39	702,47	663,87
23	09b	7,37	7,44	98,57	98,45	0,67	0,40	702,47	667,26
24	09a	7,37	7,35	98,57	98,31	0,67	0,41	702,47	667,06
25	08d	7,37	7,74	98,88	97,87	0,34	0,28	656,76	662,22
26	08c	7,37	7,75	98,89	97,94	0,34	0,31	656,76	657,66
27	08b	7,37	7,66	98,89	98,15	0,34	0,30	656,76	668,55
28	08a	7,37	7,68	98,89	97,93	0,34	0,28	656,76	665,06
29	07d	6,93	7,77	95,09	97,72	0,28	0,30	653,22	672,74
30	07c	6,93	7,71	95,09	97,92	0,28	0,31	653,22	673,24
31	07b	6,93	7,71	95,09	97,74	0,28	0,29	653,22	674,93
32	07a	6,93	7,61	95,09	97,73	0,28	0,28	653,22	676,14
33	06d	9,28	8,98	99,31	97,54	0,41	0,33	674,08	647,41
34	06c	9,28	8,90	99,31	97,64	0,41	0,30	674,08	649,42

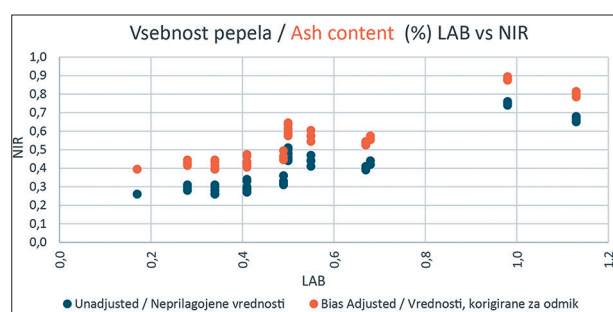
Št. / Nr.	Vzorec / Sample ID	Vsebnost vlage (%) LAB / Lab Moisture (%)	Vsebnost vlage (%) NIR / Predicted Mo- isture (%)	Mehanska obstojnost (%) LAB / Lab Durabi- lity (%)	Mehanska obstojnost (%) NIR / Predicted Durability (%)	Delež pepela (%) LAB / Lab Ash (%)	Delež pe- pela (%) NIR / Predi- cted Ash (%)	Gostota nasutja (kg/m ³) LAB / Lab Densi- ty (kg/m ³)	Gostota nasutja (kg/m ³) NIR / Predicted Density (kg/m ³)
35	06b	9,28	8,82	99,31	97,57	0,41	0,34	674,08	643,67
36	06a	9,28	8,87	99,31	97,55	0,41	0,33	674,08	645,15
37	05d	7,52	7,42	98,63	98,63	0,50	0,51	668,21	673,55
38	05c	7,52	7,57	98,63	98,59	0,50	0,50	668,21	677,95
39	05b	7,52	7,40	98,63	98,68	0,50	0,48	668,21	672,15
40	05a	7,52	7,46	98,63	98,62	0,50	0,48	668,21	672,74
41	04d	7,36	7,59	98,54	98,53	0,41	0,27	655,67	664,22
42	04c	7,36	7,52	98,54	98,41	0,41	0,28	655,67	666,02
43	04b	7,36	7,50	98,54	98,45	0,41	0,29	655,67	662,49
44	04a	7,36	7,53	98,54	98,29	0,41	0,29	655,67	660,25
45	03d	6,44	6,51	98,67	97,98	1,13	0,66	641,11	632,51
46	03c	6,44	6,42	98,67	97,89	1,13	0,65	641,11	630,65
47	03b	6,44	6,47	98,67	97,90	1,13	0,67	641,11	635,30
48	03a	6,44	6,40	98,67	97,95	1,13	0,68	641,11	632,05
49	02d	8,76	8,29	98,97	97,56	0,68	0,42	662,23	636,02
50	02c	8,76	8,13	98,97	97,64	0,68	0,44	662,23	638,22
51	02b	8,76	8,19	98,97	97,79	0,68	0,42	662,23	636,06
52	02a	8,76	8,12	98,97	97,78	0,68	0,42	662,23	631,29
53	01b	6,04	6,02	98,91	98,01	0,17	0,26	627,97	617,49
54	01a	6,04	5,96	98,91	97,90	0,17	0,26	627,97	614,80

Preglednica 2. Rezultati primerjave za vsebnost vlage, mehansko obstojnost, delež pepela in gostoto nasutja.
Table 2. Comparison of the results for moisture content, mechanical durability, ash content and bulk density.

Spremenljivka / Variable	Št. / Nr.	R ² / R ²	Standardna napa- ka napovedi / SEP –standard error of prediction	Sistematični odmik / Bias	Analiza sistematič- nega odmika / T-bias	Na- klon / Slope	Analiza naklona re- gresijske premice / T-slope
Vsebnost vlage / Moisture content	54	0,847	0,411	-0,044	-0,791	1,151	-2,227
Mehanska obstoj- nost / Mechanical dura- bility	54	0,619	0,856	0,282	2,440	-0,339	34,890**
Delež pepela / Ash content	54	0,809	0,189	0,134	7,243*	1,546	-5,240**
Gostota nasutja / Bulk density	54	0,153	20,672	-1,394	-0,492	0,418	4,274**

* statistično značilen sistematični odmik / data is biased;

** naklon se statistično značilno razlikuje / data is sloped



Slika 2. Primerjave vsebnosti pepela (%) v vzorcih peletov, izmerjene z NIR in laboratorijskimi (LAB) metodami. Neprilagojene vrednosti: napovedi NIR metode brez korekcije; vrednosti, korigirane za odmik: korigirane NIR napovedi.

Figure 2. Comparison of ash content (%) in pellet samples measured by NIR and laboratory (LAB) methods. Unadjusted: NIR method predictions without correction; Bias Adjusted: corrected NIR predictions.

jasnjeni varianci znotraj celotnega razpona meritev, ima širši razpon podatkov pomembno vlogo pri realni oceni napovedne sposobnosti modela. Odstranitev te točke bi umetno zožila variabilnost vzorca ter lahko vplivala na oceno korelacije in robustnosti modela. Zato je bila vključena v analizo, saj predstavlja legitimno meritev znotraj preučevanega območja in prispeva k bolj realistični oceni delovanja modela v širšem razponu vrednosti.

3.2 NAPOVED VSEBNOSTI VLAŽE

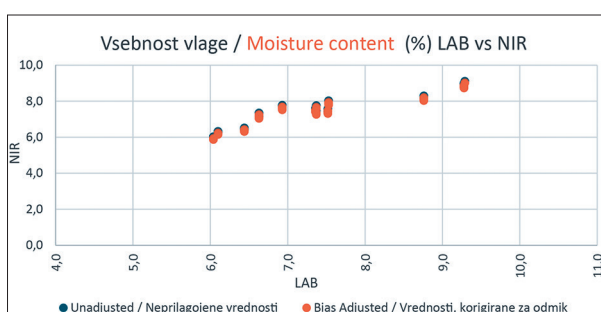
3.2 MOISTURE CONTENT PREDICTION

Napoved vsebnosti vlage je pokazala najboljšo napovedno sposobnost med vsemi analiziranimi parametri ($R^2 = 0,847$; $SEP = 0,411$ %) (slika 3, preglednica 1 in 2). Povprečna absolutna razlika znaša približno 0,4 odstotne točke, kar glede na razpon meritev (6,0–9,3 %) predstavlja nizko merilno negotovost in potrjuje primernost metode za rutinsko uporabo v proizvodnji.

3.3 NAPOVED MEHANSKE OBSTOJNOSTI

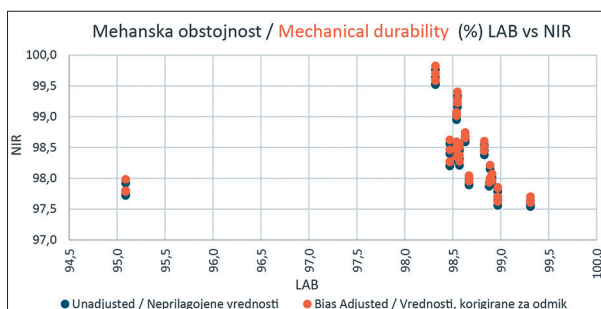
3.3 MECHANICAL DURABILITY PREDICTION

Napoved mehanske obstojnosti v osnovni analizi ni pokazala ustrezne korelacije z laboratorijskimi rezultati ($R^2 = 0,007$; $SEP = 1,102$ %) (slika 4). Povprečna absolutna razlika znaša približno 1,1 odstotne točke, največja razlika pa približno 2,6 odstotne točke. Čeprav absolutne razlike niso izra-



Slika 3. Primerjava vsebnosti vlage (%) v vzorcih peletov, izmerjene z NIR in laboratorijskimi (LAB) metodami. Neprilagojene vrednosti: napovedi NIR metode brez korekcije; Vrednosti, korigirane za odmik: korigirane NIR napovedi.

Figure 3. Comparison of moisture content (%) in pellet samples measured by NIR and laboratory (LAB) methods. Unadjusted: NIR method predictions without correction; Bias Adjusted: corrected NIR predictions.

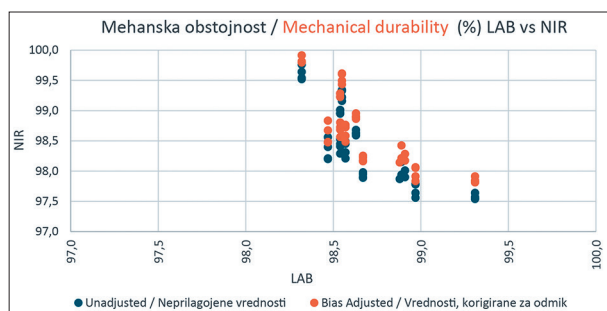


Slika 4. Primerjava mehanske obstojnosti (%) v vzorcih peletov, izmerjene z NIR in laboratorijskimi (LAB) metodami. Neprilagojene vrednosti: napovedi NIR metode brez korekcije; Vrednosti, korigirane za odmik: korigirane NIR napovedi.

Figure 4. Comparison of mechanical durability (%) in pellet samples measured by NIR and laboratory (LAB) methods. Unadjusted: NIR method predictions without correction; Bias Adjusted: corrected NIR predictions.

zito velike, nizka korelacija na prvi pogled kaže na slabo napovedno sposobnost modela za mehansko obstojnost. Pri podrobnejšem pregledu grafa je na levi strani slike opaziti točke, ki izrazito odstopajo od ostalih meritev in ima nesorazmeren vpliv na regresijsko analizo.

Nadaljnja analiza tega vzorca pokaže, da gre za odstopajočo vrednost (outlier), ki bistveno povečuje razpršenost podatkov in s tem zmanjšuje



Slika 5. Primerjava mehanske obstojnosti (%) vzorcev peletov, izmerjene z NIR in laboratorijskimi (LAB) metodami, po izključitvi odstopajočih točk. Neprilagojene vrednosti: napovedi NIR metode brez korekcije; Vrednosti, korigirane za odklik: korigirane NIR napovedi.

Figure 5. Comparison of mechanical durability (%) of pellet samples measured by NIR and laboratory (LAB) methods, after excluding the outliers. Unadjusted: NIR method predictions without correction; Bias Adjusted: corrected NIR predictions.

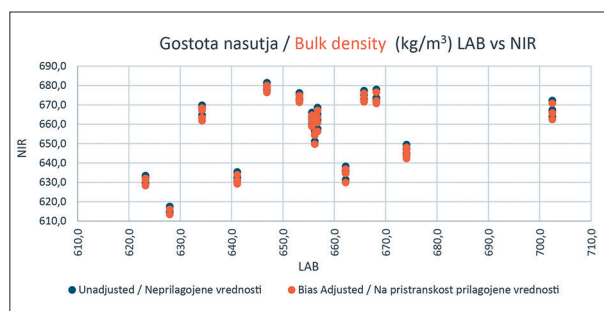
koeficient determinacije. Ker odstopanje ni reprezentativno za splošni trend med laboratorijskimi in NIR meritvami, je bila odstopajoča točka izključena. Po izključitvi odstopajoče točke se napovedna sposobnost modela izrazito izboljša ($R^2 = 0,619$; $SEP = 0,856$ %), kar kaže na zmerno korelacijo med metodama (slika 5, preglednica 1 in 2). Povprečna absolutna napaka se hkrati zmanjša, kar potrjuje, da so imeli odstopajoči vzorci nesorazmeren vpliv na statistične kazalnike.

Takšen pristop je skladen s standardno statistično prakso, kjer se analiza izvede tako z vključenimi kot izključenimi odstopajočimi vrednostmi, pri čemer je končna interpretacija podana ob upoštevanju njihovega vpliva na robustnost modela.

3.4 NAPOVED GOSTOTE NASUTJA

3.4 BULK DENSITY PREDICTION

Napoved gostote nasutja je pokazala omejeno napovedno sposobnost ($R^2 = 0,153$; $SEP = 20,672$ kg/m^3) (slika 6, preglednica 1 in 2). Povprečna absolutna razlika znaša približno 21 kg/m^3 , kar predstavlja približno 3 % razpona merjenih vrednosti. Rezultati kažejo na omejeno uporabnost NIR metode za napoved tega makroskopskega fizikalnega parametra.



Slika 6. Primerjava gostote nasutja (kg/m^3) vzorcev peletov, izmerjene z NIR in laboratorijskimi (LAB) metodami. Neprilagojene vrednosti: napovedi NIR metode brez korekcije; Vrednosti, korigirane za odklik: korigirane NIR napovedi.

Figure 6. Comparison of bulk density (kg/m^3) of pellet samples measured by NIR and laboratory (LAB) methods. Unadjusted: NIR method predictions without correction; Bias Adjusted: corrected NIR predictions.

4 RAZPRAVA

4 DISCUSSION

Kakovost lesnih peletov je neposredno povezana s skladnostjo s standardi in zahtevami trga, saj vpliva na certificiranje (npr. Enplus, S4Q), tržno vrednost proizvoda, zanesljivost dobave in zadovoljstvo uporabnikov. Stabilna in preverjena kakovost je ključna za učinkovito delovanje celotne dobavne verige biomase. Nepravilna ocena parametrov kakovosti biomase lahko vodi do slabšega izgorevanja in povečanja emisij, slabšega delovanja kurilnih naprav ter zmanjšanja energetske učinkovitosti, kar vpliva tako na okoljske kot tudi ekonomske vidike rabe biomase (Scott et al., 2025).

Primerjava rezultatov metode NIR, kot hitre analize metode za določanje izbranih parametrov kakovosti lesnih goriv, v primerjavi z laboratorijskimi referenčnimi metodami po standardih SIST EN ISO, temelji na oceni ujemanja napovedanih in izmerjenih vrednosti ter na analizi merilne negotovosti. Tak pristop omogoča presojo, ali NIR spektroskopija lahko služi kot zanesljivo orodje za hiter nadzor kakovosti lesnih peletov. Klasične laboratorijske metode so namreč časovno zahtevne, medtem ko NIR omogoča hitro in stroškovno učinkovito analizo z minimalno pripravo vzorca (Mancini et al., 2020; Ahmed et al., 2025). Izražanje napake v absolutnih merskih enotah (odstotne točke oziroma kg/m^3) pa omogoča objektivno primerjavo med metodama

ter preprečuje matematično povečanje odstopanj, ki bi lahko nastalo pri uporabi relativnih izrazov pri nizkih absolutnih vrednostih.

Rezultati potrjujejo, da je napovedna sposobnost NIR spektroskopije izrazito odvisna od narave analiziranega parametra, kar so raziskovali že v preteklosti (Gillespie et al., 2015; Sundaram et al., 2015; Pitak et al., 2021; Ahmed et al., 2025). NIR spektroskopija namreč temelji na zaznavi vibracijskih prehodov kemijskih vezi, zato so parametri, ki so odvisni od molekularne strukture materiala, praviloma bolj napovedljivi. Vsebnost vlage in delež pepela sta neposredno povezana s kemijsko sestavo biomase. V primeru teh dveh parametrov tudi v naši raziskavi dosežene vrednosti SEP potrjujejo, da je merilna negotovost v okviru, ki je sprejemljiv za industrijski nadzor kakovosti. Nasprotno pa sta mehanska obstojnost in gostota nasutja predvsem strukturna parametra, ki nista neposredno odvisna od kemijske sestave materiala, temveč predvsem od fizikalne strukture in procesnih (tehnoloških) pogojev, kot so tlak in temperatura med procesom peletiranja, geometrije peletov, stopnje zlepljenosti delcev ter načina nasutja in ravnanja s peleti med transportom in skladiščenjem. Ker NIR metoda temelji na interakciji bližnje infrardeče svetlobe s kemijsko sestavo materiala in ne neposredno z mehansko strukturo, je omejena napovedna sposobnost za tovrstne parametre pričakovana. Čeprav nekatere raziskave kažejo, da se NIR spektroskopija v kombinaciji z metodami strojnega učenja lahko uporablja za napoved gostote ali mehanske trdnosti peletov, so takšni modeli običajno manj robustni in močno odvisni od kalibracijskih podatkov (Pitak et al., 2022). Z vidika industrijske prakse je zato NIR spektroskopija primerna predvsem za hitro in nedestruktivno napoved kemijsko pogojenih parametrov (vsebnost vlage in delež pepela), medtem ko standardne laboratorijske metode ostajajo nujne za preverjanje mehanskih in strukturnih lastnosti.

Pri interpretaciji rezultatov je treba upoštevati, da tudi referenčne laboratorijske metode po SIST EN ISO standardih vsebujejo lastno merilno negotovost. Vsaka analitska metoda ima določeno ponovljivost (ponovljene meritve istega vzorca) in reproducibilnost (različni operaterji, dnevi, laboratoriji), ki prispevata k skupni negotovosti rezultata (SIST ISO 5725-1:2024). Standardna napaka napovedi (SEP) tako ne predstavlja izključno napake

NIR metode, temveč vključuje kombiniran vpliv negotovosti obeh metod, laboratorijske referenčne in napovedne. V primerih, kjer je SEP primerljiv z znano ponovljivostjo referenčne metode, razlike med metodama delno odražajo tudi naravno variabilnost laboratorijske analize. Zato je treba napovedno sposobnost NIR modelov presojati v kontekstu merilne negotovosti referenčne metode in ne zgolj kot odstopanje od absolutne referenčne vrednosti. Celotna opazovana napaka med laboratorijskimi in NIR meritvami je rezultat kombinirane negotovosti obeh metod, ki se lahko konceptualno izrazi kot vsota varianc referenčne metode in napovednega modela (Næs et al., 2002).

Za nadaljnje izboljšanje napovedne sposobnosti NIR modelov bi bilo smiselno razširiti kalibracijski nabor z večjim številom vzorcev ter s tem povečati variabilnost obravnavanih parametrov. Širši razpon referenčnih vrednosti namreč pogosto prispeva k bolj robustnim in stabilnim kemometričnim modelom. Poleg tega bi bilo smiselno ovrednotiti vpliv priprave vzorcev na natančnost napovedi. Različni načini priprave, vključno z večkratnim ponovnim nasutjem vzorca, lahko vplivajo na optične lastnosti merjenega materiala in posledično na spektralne odzive. Sistematična preučitev teh dejavnikov bi lahko prispevala k izboljšanju ponovljivosti meritev in povečanju natančnosti NIR napovedi.

5 ZAKLJUČEK

5 CONCLUSIONS

NIR spektroskopija predstavlja hitro dopolnilno analitsko metodo standardnim laboratorijskim postopkom, saj omogoča analizo brez zahtevne priprave vzorca ter potencialno tudi neposredno (in-line) spremljanje kakovosti v proizvodnih procesih in je predvsem uporabna za določanje parametrov kot sta vsebnost vlage in pepela, ki sta neposredno povezana s kemijsko sestavo biomase. Uporaba NIR spektroskopije zato omogoča sprotno zaznavanje odstopanj in optimizacijo procesnih parametrov, kar je v industrijski proizvodnji pomembna prednost v primerjavi s **časovno** zahtevnejšimi laboratorijskimi metodami, pri katerih posamezne analize, zlasti določanje vsebnosti pepela in vlage, trajajo več ur. Hkrati uporaba ene večnamenske NIR naprave predstavlja tudi organizacijsko in ekonomsko prednost, saj lahko nadomesti potrebo po več

ločenih instrumentih za izvajanje različnih analiz. Vendar pa je zanesljivost NIR napovedi močno odvisna od kakovosti kalibracijskih modelov, ki morajo vključevati zadostno variabilnost surovin in tehnoloških pogojev. V nasprotnem primeru lahko pride do sistematičnih odstopanj, zlasti pri parametrih, ki niso neposredno povezani s kemijsko sestavo materiala, kot sta mehanska obstojnost in gostota nasutja. Z vidika praktične uporabe je NIR zato najprimernejši kot orodje za hitro oceno nekaterih parametrov, medtem ko laboratorijske metode ostajajo ključne za ugotavljanje skladnosti s standardi in certificiranje. Na podlagi ugotovitev raziskave lahko zaključimo, da NIR metoda ne more nadomestiti laboratorijskih referenčnih metod za parametre kakovosti lesnih peletov, temveč predstavlja učinkovito dopolnilno orodje, primerno predvsem za hitro napoved kemijsko-fizikalnih lastnosti.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENT

Izvedba raziskave je potekala v Laboratoriju za lesno biomaso na Gozdarskem inštitutu Slovenije, v okviru Programske skupine P4-0107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija in Infrastrukturne skupine GIS I0-0012, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije. Zahvaljujemo se podjetju Labtim za možnost testiranja naprave Perten DA 7250.

6 POVZETEK

6 SUMMARY

Over the past decade, the importance of wood pellet quality control has increased, as the use of wood biomass has grown both in Europe and globally, primarily as a renewable energy source. The aim of this research was to assess the usefulness of near-infrared (NIR) spectroscopy as a rapid analysis method for determining key pellet quality parameters and to compare them with reference laboratory methods in accordance with SIST EN ISO standards. The main objective was to determine whether appropriately calibrated NIR models can meet measurement uncertainty requirements and thus serve as an effective complement to classical methods, particularly for rapid control in the wood industry.

Fourteen samples (with four subsamples each) of wood pellets of quality class A1 were analysed. The samples were homogenised, milled if necessary, and prepared in accordance with the standards. Each sample was analysed using both reference laboratory methods and an NIR spectrometer, considering four key parameters: moisture content, ash content, bulk density, and mechanical durability. The indicators used to statistically evaluate the agreement between the two methods were standard error of prediction (SEP), coefficient of determination (R^2), systematic deviation (bias), regression slope, and maximum absolute difference. Errors were expressed in absolute units of measurement, allowing a more realistic comparison and preventing distortion of results at low values.

The results show that the predictive ability of the NIR method varies depending on the parameter. It achieved the best results in determining moisture content ($R^2 = 0.847$; SEP = 0.41%) and ash content ($R^2 = 0.809$; SEP = 0.19%), where deviations were small and comparable to the uncertainty of laboratory methods. This confirms that NIR is highly suitable for the rapid assessment of chemically determined properties. For mechanical durability, the initial correlation was very low ($R^2 = 0.007$; SEP = 1.10%)., but after determining and eliminating the outlier, it improved ($R^2 = 0.619$; SEP = 0.86%), indicating moderate utility of the method with appropriate data processing. In contrast, the prediction of bulk density was poorer ($R^2 = 0.153$; SEP = 20.67kg/m³), confirming the limitations of NIR for parameters that are primarily physical or structural.

The success of the NIR method is directly related to its basic principle, the detection of vibrations of chemical bonds. Therefore, parameters related to physico-chemical composition (e.g. moisture and ash content) are predicted significantly better than mechanical or structural parameters. The latter depend largely on the technological conditions of production, the microstructure of the material, and the handling of pellets during transport and storage, which exceeds the information range of NIR spectroscopy. In addition, it should be considered that reference laboratory methods also have their own measurement uncertainty, meaning that the observed deviations are not exclusively a consequence of the NIR method, but a combination of the uncertainties of both approaches. An

important aspect of interpreting the results is also the influence of the data range on statistical indicators, as a wider range of values generally allows a more realistic assessment of the predictive ability of the models. To improve predictive models, it would therefore be reasonable to expand the set of samples, include greater variability of raw materials and production conditions, and further optimize sample preparation procedures, as these can significantly affect spectral responses and, consequently, the accuracy of the prediction. The inclusion of advanced chemometric approaches or machine learning methods could also contribute to improving the robustness of the models, especially for more demanding parameters.

The study confirms that NIR spectroscopy is a fast and non-destructive tool for assessing the quality of wood pellets, especially for parameters related to chemical composition. However, due to its limitations in predicting mechanical and structural properties, it cannot replace standard laboratory methods, but rather effectively complements them. In industrial practice, it is therefore most suitable for real-time quality control and decision support, while laboratory analyses remain essential for certification and verification of compliance with standards.

DOSTOPNOST RAZISKOVALNIH PODATKOV DATA AVAILABILITY

Vsi raziskovalni podatki uporabljeni v tem članku so navedeni v preglednicah 1 in 2.

All research data used in this paper are presented in the Tables 1 and 2.

VIRI

REFERENCES

- Ahmed, M. W., Singh, V., & Kamruzzaman, M. (2025). Near-infrared spectroscopy as a green analytical tool for sustainable biomass characterization for biofuels and bioproducts: An overview. *Bioresource Technology*, 433, 132722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132722>
- Bioenergy Europe (2025). Pellets statistical report 2025. Bioenergy Europe. URL <https://bioenergyeurope.org/wp-content/uploads/2026/02/Booklet-Single-Page-Website.pdf> (2.2.2026)
- Celovit nacionalni energetska in podnebni načrt Republike Slovenije (NEPN) (2020). Republika Slovenija. Ministrstvo za infrastrukturo.
- Direktiva (EU) 2018/2001 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 11. decembra 2018 o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov (prenovitev) (2018). Evropski parlament in Svet Evropske unije. Uradni list Evropske unije, L 328, 82–209.
- Direktiva (EU) 2023/2413 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 18. oktobra 2023 o spremembi Direktive (EU) 2018/2001, Uredbe (EU) 2018/1999 in Direktive 98/70/ES glede spodbujanja energije iz obnovljivih virov ter razveljavitvi Direktive Sveta (EU) 2015/652. Evropski parlament in Svet Evropske unije. Uradni list Evropske unije, L, 2023/2413.
- Evropska komisija (2019). Evropski zeleni dogovor. Sporočilo Komisije Evropskemu parlamentu, Evropskemu svetu, Svetu, Evropskemu ekonomsko-socialnemu odboru in Odboru regij (COM/2019/640 final).
- Feng, X., Yu, C., Shu, Z., Liu, X., Yan, W., Zheng, Q., Sheng, K., & He, Y. (2018). Rapid and non-destructive measurement of biofuel pellet quality indices based on two-dimensional near infrared spectroscopic imaging. *Fuel*, 228, 197–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.149>
- Gillespie, G. D., Everard, C. D., & McDonnell, K. P. (2015). Prediction of biomass pellet quality indices using near infrared spectroscopy. *Energy*, 80, 582–588 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.014>
- Gillespie, G. D., Farrelly, D. J., Everard, C. D., & McDonnell, K. P. (2016). The use of near infrared hyperspectral imaging for the prediction of processing parameters associated with the pelleting of biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, 152, 343–349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.026>
- Lestander, T. A., Johnsson, B., & Grothage, M. (2009). NIR techniques create added values for the pellet and biofuel industry. *Bioresource Technology*, 100(4), 1589–1594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.001>
- Mancini, M., Mircoli, A., Potena, D., Diamantini, C., Duca, D., & Toscano, G. (2020). Prediction of pellet quality through machine learning techniques and near-infrared spectroscopy. *Computers & Industrial Engineering*, 147, 106566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106566>
- Mancini, M., Rinnan, Å., Pizzi, A., Mengarelli, C., Rossini, G., Duca, D., & Toscano, G. (2018). Near infrared spectroscopy for the discrimination between different residues of the wood processing industry in the pellet sector. *Fuel*, 217, 650–655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.008>
- Mantanus, J., Ziémons, E., Rozet, E., Streel, B., Klinkenberg, R., Evrard, B., Rantanen, J., & Hubert, P. (2010). Building the quality into pellet manufacturing environment – Feasibility study and validation of an in-line quantitative near infrared (NIR) method. *Talanta*, 83, 2, 305–311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.09.009>
- Næs, T., Isaksson, T., Fearn, T., & Davies, T. (2002). A user-friendly guide to multivariate calibration and classification. NIR Publications.
- Pitak, L., Laloön, K., Wongpichet, S., Sirisomboon, P., & Posom, J. (2021). Machine learning-based prediction of selected parameters of commercial biomass pellets using line scan near in-

- frared-hyperspectral image. *Processes*, 9, 2, 316. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9020316>
- Pitak, L., Saengprachatanarug, K., Laloön, K., & Posom, J. (2022). Predicting the true density of commercial biomass pellets using near-infrared hyperspectral imaging. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 266–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.11.004>
- Posom, J., Shrestha, A., Saechua, W., & Sirisomboon, P. (2016). Rapid non-destructive evaluation of moisture content and higher heating value of *Leucaena leucocephala* pellets using near infrared spectroscopy. *Energy*, 107, 464–472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.041>
- Scott, C., Desamsetty, T. M., & Rahmanian, N. (2025). Unlocking Power: Impact of physical and mechanical properties of biomass wood pellets on energy release and carbon emissions in power sector. *Waste and Biomass Valorization*, 16, 441–458. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02669-z>
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2021). SIST EN ISO 17225-1:2021. Trdna biogoriva – Specifikacije goriv in razredi – 1. del: Splošne zahteve.
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2021). SIST EN ISO 17225-2:2021. Trdna biogoriva – Specifikacije goriv in razredi – 2. del: Razvrstitev lesnih peletov.
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2023). SIST EN ISO 18122:2023 Trdna biogoriva – Določevanje vsebnosti pepela.
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2024). SIST EN ISO 18134-2:2024 Trdna biogoriva – Določanje vlage – 2. del: Poenostavljena metoda.
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2024). SIST ISO 5725-1:2024. Točnost (pravilnost in natančnost) merilnih metod in rezultatov – 1. del: Splošna načela in definicije.
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2025). SIST EN ISO 17831-1:2025 Trdna biogoriva–Določanje mehanske odpornosti peletov in briketov–1. del: Peleti.
- Slovenski inštitut za standardizacijo (2025). SIST EN ISO 17828:2025 Trdna biogoriva–Določevanje prostorninske mase.
- Sundaram, J., Mani, S., Kandala, C. V. K., & Holser, R. A. (2015). Application of NIR reflectance spectroscopy on rapid determination of moisture content of wood pellets. *American Journal of Analytical Chemistry*, 6, 923–932. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajac.2015.612088>
- Ščap, Š., Dovečar, M., & Stare, D. (2025). Trg lesnih peletov v Sloveniji v letu 2024. *InfoGozd: skrbno z gozdom*, 6, 7, 4–10. DOI: <https://doi.org/10.20315/IG.2025.0032>
- Toscano, G., Maceratesi, V., Leoni, E., Stipa, P., Laudadio, E., & Sabbatini, S. (2022). FTIR spectroscopy for determination of the raw materials used in wood pellet production. *Fuel*, 313, 123017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123017>
- Uredba (EU) 2021/1119 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 30. junija 2021 o vzpostavitvi okvira za doseganje podnebne nevtralnosti (Evropski podnebni zakon). (2021). Evropski parlament in Svet Evropske unije. Uradni list Evropske unije, L 243, 1–17.

