

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Živa KRELJ

**LASTNOSTI LESNIH PELETOV IZBRANIH
PROIZVAJALCEV V SLOVENIJI**

MAGISTRSKO DELO

**PROPERTIES OF WOOD PELLETS OF
SELECTED PRODUCERS IN SLOVENIA**

MASTER OF SCIENCE THESIS

University studies

Ljubljana, 2016

Magistrsko delo je zaključek podiplomskega študija bioloških in biotehniških znanosti s področja lesarstva. Opravljeno je bilo v Delovni skupini za kemijo lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, eksperimentalno delo pa je bilo opravljeno v Laboratoriju za goriva Energetika Ljubljana d.o.o. in v Laboratoriju za lesno biomaso Oddelka za gozdno tehniko in ekonomiko na Gozdarskem inštitutu Slovenije.

Na podlagi Statuta Univerze v Ljubljani ter po sklepu senata Biotehniške fakultete z dne 5. 5. 2014 je bilo potrjeno, da kandidat izpolnjuje pogoje za izdelavo in zagovor magistrskega dela s področja lesarstva. Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Primož Oven.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:	doc. dr. Dominika GORNIK BUČAR Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
Član:	prof. dr. Primož OVEN Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
Član:	dr. Nike KRAJNC Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za gozdno tehniko in ekonomiko

Datum zagovora: 20. 5. 2016

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisana se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddala v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Živa Krelj

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Md
DK	UDK 630*83:620.97
KG	lesni peleti / kemični parametri / vsebnost vode / pepel / kurilnost / mehanska obstojnost / slovenski proizvajalci
AV	KRELJ, Živa, univ. dipl. biol.
SA	OVEN, Primož (mentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, C. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Podiplomski študij bioloških in biotehniških znanosti, področje lesarstva
LI	2016
IN	LASTNOSTI LESNIH PELETOV IZBRANIH PROIZVAJALCEV V SLOVENIJI
TD	Magistrsko delo
OP	XVII, 142 str., 4 pregl., 95 sl., 2 pril., 143 vir.
IJ	sl
JI	sl/an
AI	Zaradi želje po zmanjšanju emisij CO ₂ v ozračje postaja izkoriščanje lesne biomase za proizvodnjo toplote in električne energije vse bolj pomembno. Les ima zaradi porozne strukture majhno gostoto. Gostoto biomase lahko povečamo s stiskanjem v pelete. Prednosti lesnih peletov so višja gostota energije, nižji stroški prevoza in skladiščenja, enostavnejše rokovanje, manjše onesnaževanje, možnost avtomatizacije in optimizacije izgorevanja. Namen naloge je bil pridobiti pregled fizikalnih lastnosti in kemične sestave lesnih peletov proizvedenih v Sloveniji pri sedmih izbranih proizvajalcih. Dobljene rezultate smo primerjali z mejnimi vrednostmi opredeljenimi v mednarodnem standardu SIST EN ISO 17225-2. Iglavci imajo večjo vsebnost lignina kot listavci, ki deluje kot vezivo in vpliva na boljšo mehansko obstojnost pri peletih. Proizvajalec E, ki je edini uporabljal surovino z večjim deležem listavcev, je imel najnižjo povprečno mehansko obstojnost peletov. Najvišjo kurilnost peletov v suhem stanju smo izmerili pri proizvajalcu C, ki je pri proizvodnji peletov uporabljal le smreko. Najnižjo kurilnost peletov pa smo izmerili pri proizvajalcu E, ki je v surovino dodajal 70% listavcev. Proizvajalec G, ki je imel največjo vsebnost skorje v peletih, je imel drugo najvišjo kurilnost peletov v suhem stanju in povečano vsebnost pepela. Najnižjo spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju smo izmerili v peletih proizvajalca D, ki so imeli največjo vsebnost vode. Največjo vsebnost dušika smo izmerili pri proizvajalcu G, ki je proizvajal pelete, ki so vsebovali skorjo. Skorja vsebuje več dušika kot čisti les. Na mehansko obstojnost vpliva delež skorje v surovini, vsebnost lignina in ekstraktivov, vsebnost vode, ter porazdelitev velikosti delcev v surovini. S pomočjo vrednosti masnih deležev velikosti delcev v surovini smo lahko le delno ocenili vpliv na mehansko obstojnost peletov.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Md
DC UDC 630*83:620.97
CX Wood pellets / chemical parameters / moisture content / ash content / calorific value / mechanical durability / slovenian producers
AU KRELJ, Živa
AA OVEN, Primož (supervisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, C. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Postgraduate study of Biological and Biotechnical Sciences, field: wood science
PY 2016
TI PROPERTIES OF WOOD PELLETS OF SELECTED PRODUCERS IN SLOVENIA
DT M. Sc. Thesis
NO XVII, 142 p., 4 tab., 95 fig., 143 ref.
LA sl
AL sl/an
AB The utilization of biomass for energy production is an attractive option for power producers to reduce their CO₂ emissions. Because of its porous structure the wood has a low density. One solution to that problem is the densification of biomass materials into pellets. Densification of biomass materials increases the bulk density of biomass and could reduce the costs of transportation; storage, handling, and results in less pollution, lower amount of fine fraction and controlled combustion process. The aim of the thesis was to obtain an overview of the physical properties and chemical compounds in wood pellets produced by seven selected producers in Slovenia. The results obtained were compared with the values specified in the national standard for wood pellet SIST EN ISO 17225-2. Softwoods have a higher content of lignin than hardwoods and therefore pellets made from softwoods have a better mechanical durability than pellets made from hardwoods. Producer E was the only one, which used raw material with a greater proportion of hardwoods than softwoods. This had the lowest mechanical durability of the pellets. Softwoods have a high calorific value than hardwoods. The highest gross calorific value for a dry sample of pellets was measured at producer C. Producer C produces pellets only from pine. The lowest gross calorific value for a dry sample of pellets was measured at the producer E. They used for pellet production 70 % of hardwoods. Producer G, which had the highest content of bark in pellets, had the second highest calorific value for dry samples of pellets. The net calorific value for a sample of pellets as received is most affected by moisture content. Therefore, the lowest average net calorific value for samples of pellets as received was measured in pellets from producer D, which had the highest average moisture content in pellets. The highest nitrogen content was measured in pellets from manufacturer G, which produced pellets with bark. Bark has a higher content of nitrogen compared to wood. Bark content, content of lignin and extractives, moisture and particle size distribution are an important influencer of pellet durability. With the particle size distribution in the raw material we could only partially evaluate the influence on mechanical durability of pellets.

KAZALO VSEBINE

Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key Words Documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	X
Kazalo slik	XI
Kazalo prilog	XVII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJI RAZISKOVANJA	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	2
2 PREGLED OBJAV	4
2.1 LES KOT BIOGORIVO	4
2.2 LESNI PELETI	6
2.3 IZKORIŠČANJE IN PORABA LESNIH PELETOV	7
2.4 PROCES PROIZVODNJE PELETOV	8
2.5 VRSTA SUROVINE ZA LESNE PELETE	11
2.6 MEHANIZMI VEZAVE PELETIRNEGA MATERIALA	13
2.6.1 Škrob kot vezivo v peletih	15
2.6.2 Lignin kot vezivo v peletih	16
2.7 FIZIKALNE, KEMIČNE IN MEHANSKE LASTNOSTI LESNIH PELETOV	16
2.7.1 Vsebnost vode v biomasi in peletih	17
2.7.2 Vsebnost pepela v biomasi in peletih	19
2.7.3 Elementna sestava biomase	20
2.7.4 Kurilnost biomase	20
2.7.5 Velikost delcev v peletih	22
2.7.6 Mehanska obstojnost peletov in vsebnost prahu	23
2.7.7 Gostota nasutja peletov	24
2.7.8 Barva peletov	24

2.8	HIGROSKOPNE LASTNOSTI PELETOV	25
2.9	SKLADIŠČENJE SUROVINE IN PELETOV	26
2.10	RAZVRŠČANJE LESNIH PELETOV	27
3	MATERIAL IN METODE	28
3.1	PREDSTAVITEV IZBRANIH PROIZVAJALCEV LESNIH PELETOV V SLOVENIJI	28
3.2	NAČIN ODVZEMA SUROVINE IN PELETOV	31
3.3	IZVOR IN VRSTA SUROVINE ZA PELETE	32
3.3.1	Proizvajalec A	32
3.3.2	Proizvajalec B	33
3.3.3	Proizvajalec C	33
3.3.4	Proizvajalec D	33
3.3.5	Proizvajalec E	34
3.3.6	Proizvajalec F	34
3.3.7	Proizvajalec G	34
3.4	PRIPRAVA VZORCEV	34
3.5	METODE RAZISKOVANJA IN ANALIZIRANJA	37
3.5.1	Določanje vsebnosti vode v surovini in peletih	37
3.5.2	Določanje vsebnosti pepela	39
3.5.3	Določanje kurilnosti	40
3.5.4	Določanje vsebnosti ogljika, vodika in dušika	43
3.5.5	Določanje porazdelitve velikosti delcev	45
3.5.6	Določanje mehanske obstojnosti	46
3.5.7	Določanje gostote nasutja	47
3.6	STATISTIČNA OBDELAVA	48
4	REZULTATI	49
4.1	PREGLED LASTNOSTI SUROVINE IN PELETOV IZBRANIH PROIZVAJALCEV	49
4.1.1	Proizvajalec A	49
4.1.1.1	Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu A	49
4.1.1.2	Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu A	53
4.1.1.3	Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu A	55

4.1.1.4	Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu A	58
4.1.1.5	Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu A	60
4.1.1.6	Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu A	64
4.1.1.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu A	64
4.1.2	Proizvajalec B	66
4.1.2.1	Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu B	66
4.1.2.2	Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu B	67
4.1.2.3	Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu B	69
4.1.2.4	Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu B	70
4.1.2.5	Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu B	71
4.1.2.6	Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu B	72
4.1.2.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu B	72
4.1.3	Proizvajalec C	73
4.1.3.1	Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu C	73
4.1.3.2	Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu C	74
4.1.3.3	Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu C	76
4.1.3.4	Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu C	77
4.1.3.5	Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu C	78
4.1.3.6	Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu C	78
4.1.3.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu C	79
4.1.4	Proizvajalec D	80
4.1.4.1	Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu D	80
4.1.4.2	Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu D	81
4.1.4.3	Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu D	82
4.1.4.4	Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu D	84
4.1.4.5	Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu D	84
4.1.4.6	Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu D	85
4.1.4.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu D	86
4.1.5	Proizvajalec E	87
4.1.5.1	Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu E	87
4.1.5.2	Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu E	88
4.1.5.3	Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu E	89

4.1.5.4	Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu E	91
4.1.5.5	Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu E	91
4.1.5.6	Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu E	92
4.1.5.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu E	93
4.1.6	Proizvajalec F	94
4.1.6.1	Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu F	94
4.1.6.2	Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu F	95
4.1.6.3	Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu F	97
4.1.6.4	Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu F	98
4.1.6.5	Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu F	99
4.1.6.6	Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu F	99
4.1.6.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu F	100
4.1.7	Proizvajalec G	101
4.1.7.1	Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu G	102
4.1.7.2	Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu G	102
4.1.7.3	Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu G	104
4.1.7.4	Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu G	106
4.1.7.5	Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu G	106
4.1.7.6	Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu G	107
4.1.7.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu G	108
4.2	PREGLED POSAMEZNIH PROUČEVANIH PARAMETROV	108
4.2.1	Vsebnost vode v peletih izbranih proizvajalcev	108
4.2.2	Vsebnost pepela v peletih izbranih proizvajalcev	109
4.2.3	Kurilnost peletov izbranih proizvajalcev	110
4.2.4	Vsebnost dušika v peletih izbranih proizvajalcev	113
4.2.5	Mehanska obstojnost peletov izbranih proizvajalcev	114
4.2.6	Gostota nasutja peletov izbranih proizvajalcev	116
4.2.7	Porazdelitev velikosti delcev v surovini izbranih proizvajalcev	116
4.2.8	Pregled vseh parametrov pri posameznem proizvajalcu	119
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	120
6	POVZETEK (summary)	127
6.1	POVZETEK	127

6.2	SUMMARY	129
7	VIRI	131

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Značilne spodnje kurilnosti podane na suho stanje (Hsp-bv) različnih vrst lesa (SIST EN ISO 17225-1:2014).....	22
Preglednica 2: Razvrstitev peletov v kakovostne razrede skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2.....	27
Preglednica 3: Osnovne karakteristike peletirne naprave pri izbranih proizvajalcih	28
Preglednica 4: Uvrstitev izbranih proizvajalcev peletov v kakovostne razrede skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2 glede na posamezen parameter.....	119

KAZALO SLIK

Slika 1: Proces zgoščevanja biomase v procesu proizvodnje peletov (Stelte in sod., 2012: 4454).....	8
Slika 2: Matrica v obliki prstana (ring die) in proces stiskanja z matrico v obliki prstana (Ring die, 2015 in Pelletisation with ring die, 2015)	9
Slika 3: Matrica v obliki diska (flat die) in proces stiskanja z matrico v obliki diska (Flat die, 2015 in Pelletisation with flat die, 2015).....	9
Slika 4: Objekt s sušilno napravo in mlinom pri proizvajalcu A.....	29
Slika 5: Peletirna naprava N-Midi, kot jo imata proizvajalca B in C	30
Slika 6: Peletirna naprava in odvzem vzorca peletov na koncu proizvodnega traku	32
Slika 7: Deponija s sekanci in pokrita deponija z žaganjem pri proizvajalcu A	33
Slika 8: Mletje vzorca peletov na grobem mlinu Pulverisette-25	35
Slika 9: Mletje vzorca na diskastem finem mlinu Pulverisette-9	36
Slika 10: Sušenje vzorca peletov na 105 °C v sušilniku Ehret TK/L	38
Slika 11: Določanje vsebnosti pepela v termogravimetričnem analizatorju TGA-701...	39
Slika 12: Določanje kurilnosti – briket namestimo v lonček	41
Slika 13: V folijo zaviti vzorec vstavimo v avtomatski podajalnik elementnega analizatorja TruSpec Micro CHN.....	44
Slika 14: Sejalnik Fritsch - Analysette – 18	45
Slika 15: Vsebnost vode v vzorcih peletov proizvajalca A, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	50
Slika 16: Vsebnost vode v peletih proizvajalca A in relativna zračna vlažnost v času odvzema vzorca.....	52
Slika 17: Vpliv relativne zračne vlažnosti na vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu A	52
Slika 18: Vpliv vsebnosti vode v surovini na vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu A	53
Slika 19: Vsebnost pepela v vzorcih peletov pri proizvajalcu A, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	54
Slika 20: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu A.....	55
Slika 21: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu A..	56

Slika 22: Vpliv vsebnosti vode v peletih na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju pri proizvajalcu A	57
Slika 23: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu A	58
Slika 24: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu A, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	59
Slika 25: Vsebnost dušika v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu A.....	59
Slika 26: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu A, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	61
Slika 27: Vpliv vsebnosti negorljivih mineralnih substanc (pepel) v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A.....	62
Slika 28: Vpliv vsebnosti negorljivih mineralnih substanc (pepel) v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A pri podobni sestavi peletov	62
Slika 29: Vpliv vsebnosti vode v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A.....	63
Slika 30: Vpliv vsebnosti vode v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A pri podobni sestavi peletov	63
Slika 31: Gostota nasutja vzorcev peletov proizvajalca A, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	64
Slika 32: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu A	66
Slika 33: Vsebnost vode v vzorcih peletov proizvajalca B, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	67
Slika 34: Vsebnost pepela v vzorcih peletov pri proizvajalcu B, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	68
Slika 35: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu B	68
Slika 36: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu B..	69
Slika 37: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu B	70
Slika 38: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu B, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	70

Slika 39: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu B, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	71
Slika 40: Gostota nasutja vzorcev peletov proizvajalca B, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	72
Slika 41: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu B.....	73
Slika 42: Vsebnost vode v vzorcih peletov pri proizvajalcu C, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	74
Slika 43: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu C, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	75
Slika 44: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu C	75
Slika 45: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu C..	76
Slika 46: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu C	77
Slika 47: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu C, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	77
Slika 48: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu C, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	78
Slika 49: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu C, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	79
Slika 50: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu C.....	80
Slika 51: Vsebnost vode v vzorcih peletov pri proizvajalcu D, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	81
Slika 52: Vsebnost pepela v vzorcih peletov pri proizvajalcu D, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	81
Slika 53: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu D.....	82
Slika 54: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu D..	83
Slika 55: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu D	83

Slika 56: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu D, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	84
Slika 57: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu D, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	85
Slika 58: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu D, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	85
Slika 59: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu D	86
Slika 60: Vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu E, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	87
Slika 61: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu E, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	88
Slika 62: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu E	89
Slika 63: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu E ..	90
Slika 64: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu E.....	90
Slika 65: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu E, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	91
Slika 66: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu E, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	92
Slika 67: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu E, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	93
Slika 68: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu E.....	94
Slika 69: Vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu F, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	95
Slika 70: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu F, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	96
Slika 71: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu F	96
Slika 72: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu F ..	97

Slika 73: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu F	98
Slika 74: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu F, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	98
Slika 75: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu F, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	99
Slika 76: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu F, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	100
Slika 77: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu F	101
Slika 78: Vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu G, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	102
Slika 79: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu G, rdeči črti na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	103
Slika 80: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu G.....	104
Slika 81: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu G	105
Slika 82: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu G	105
Slika 83: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu G, rdeči črti na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	106
Slika 84: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu G, rdeči črti na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	107
Slika 85: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu G, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	108
Slika 86: Povprečna vsebnost vode v peletih pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	109
Slika 87: Povprečna vsebnost pepela v peletih pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	110

Slika 88: Povprečna zgornja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv) pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom	111
Slika 89: Povprečna spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	112
Slika 90: Vpliv vsebnosti vode v peletih na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri izbranih proizvajalcih	113
Slika 91: Povprečna vsebnost dušika v peletih pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	114
Slika 92: Povprečna mehanska obstojnost vzorcev peletov pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B	115
Slika 93: Povprečna gostota nasutja vzorcev pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B.....	116
Slika 94: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri izbranih proizvajalcih	117
Slika 95: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri izbranih proizvajalcih, pri proizvajalcih A, B in E je prikazana povprečna vrednost vzorcev surovine.....	118

KAZALO PRILOG

Priloga A: Prikaz rezultatov kemičnih in fizikalnih analiz surovine in peletov

Priloga B: Grafični prikaz posameznih proučevanih parametrov v vseh vzorcih peletov

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Lesni peleti, ki jih uvrščamo k lesnim gorivom, predstavljajo obnovljiv vir energije. Izvorna oblika lesa je zelo variabilna tako po obliki kot po fizikalnih lastnostih (vlažnost, gostota, kurilnost izražena na volumen). Takšna variabilnost pa ne omogoča avtomatizacije in visokih izkoristkov. Namen peletiranja je med drugim standardizacija lesne biomase. Raba peletov tako omogoča stopnjo avtomatizacije ogrevanja, kar je povsem primerljivo s stopnjo avtomatizacije pri npr. kurilnem olju.

Peleti imajo veliko gostoto in nizko vsebnost vode, kar omogoča visoke izkoristke pri zgorevanju. Lesne pelete se večinoma uporablja v sodobnih pečeh na biomaso za ogrevanje stanovanjskih objektov in v elektrarnah za proizvodnjo električne energije.

V Sloveniji je proizvodnja peletov relativno nova dejavnost, ki v zadnjem času doživlja velik razcvet. Zato to področje v Sloveniji še ni dovolj strokovno in znanstveno podprto.

V Sloveniji je bilo v letu 2014 okoli 15 proizvajalcev lesnih peletov, od tega je imel le en proizvajalec pridobljen certifikat kakovosti ENplus po mednarodnem standardu ISO 17225-2. Pri večini manjših proizvajalcev bi pridobitev certifikata kakovosti ENplus pomenila prevelik strošek. V procesu proizvodnje peletov je smiselno spremljati surovino, izdelavo in končni izdelek ter določati nekatere parametre, ki bistveno vplivajo na sam proces.

Na kakovost peletov lahko vpliva veliko različnih faktorjev. Ključni parametri so sestava in lastnosti vhodne surovine, vsebnost vode, pepela, mehanska obstojnost, kurilnost, porazdelitev velikosti delcev, različna onesnažila, veziva idr. Zato smo se odločili, da bomo raziskali različne parametre oziroma dejavnike, ki vplivajo na kakovost peletov.

Hitra rast in razvoj na področju peletov v Evropi sta spodbudila razvoj posebnih standardov in predpisov z namenom, da bi določili nekatera izhodišča za proizvodnjo, skladiščenje in distribucijo. Evropski standardi, ki so bili pomembni za klasifikacijo peletov in surovine iz trdnih biogoriv, so bili SIST EN 14961-1, 14961-2 in 14961-6 in skladno s temi standardi so konec leta 2014 prišli v veljavo novi mednarodni standardi SIST EN ISO 17225-1, 17225-2, in 17225-6. Ti standardi podajajo jasne zahteve za dimenzije peletov, kakovost in sestavo. Standard SIST EN ISO 17225-2 določa mejne vrednosti parametrov za različne kakovostne razrede (A1, A2 in B) peletov, medtem ko se SIST EN 15234-2 nanaša posebej na zagotavljanje kakovosti peletov kot goriva.

Splošni cilj zagotavljanja kakovosti je omogočiti kakovost peletov v celotni dobavni verigi, ki ga vzdržuje sistem kontrole z zanesljivimi poročili na vsaki kritični kontrolni točki v verigi.

1.2 CILJI RAZISKOVANJA

Namen naloge je bil pridobiti pregled fizikalnih lastnosti in kemične sestave lesnih peletov izbranih proizvajalcev v Sloveniji. Med drugim je bil cilj naloge določiti kakovost peletov, ki so proizvedeni v Sloveniji in primerjati rezultate dosežene z analizo z mejnimi vrednostmi opredeljenimi v mednarodnem standardu SIST EN ISO 17225-2:2014. Ugotavljali smo odnose med različnimi parametri in medsebojnem vplivu teh parametrov na kakovost peletov.

Parametri, ki smo jih določali na vzorcih peletov, so bili vsebnost vode, pepela, dušika, kurilnost, mehanska obstojnost in gostota nasutja. Analizirali smo tudi surovino, iz katere so bili narejeni peleti. V surovini smo določali porazdelitev velikosti delcev, vsebnost vode, pepela in dušika ter kurilnost.

Cilji naše naloge so bili raziskati:

- a) vpliv vrste lesa (lesna vrsta, svež/star les, delež skorje...) na kakovost peletov,
- b) vpliv vsebnosti vode v surovini in peletih na mehansko obstojnost,
- c) vsebnost pepela v različnih vrstah peletov,
- d) kurilnost različnih vrst peletov,
- e) dejavnike, ki vplivajo na mehansko obstojnost,
- f) prisotnost morebitnih onesnažil, primesi, veziv.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Vrsta fizikalnih, kemičnih in mehanskih lastnosti vpliva na kakovost lesnih peletov. Tudi na surovino vpliva veliko različnih dejavnikov. Lastnosti in sestava surovine, ki se uporablja za proizvodnjo peletov, vpliva na kakovost končnega proizvoda.

Pri zahtevah vezanih na kvaliteto peletov so pomembni parametri vsebnost vode, porazdelitev velikosti delcev, mehanska obstojnost in s tem povezana količina fine frakcije, vsebnost pepela, kurilnost in čistost surovine. Posamezni parametri peletov in surovine so med seboj lahko povezani in vplivajo drug na drugega.

Predpostavili smo naslednje delovne hipoteze, ki smo jih na koncu raziskav potrdili ali ovrgli.

Hipoteza 1: Domnevamo, da lesna vrsta vpliva na kakovost peletov.

Hipoteza 2: Domnevamo, da vsebnost vode v surovini po sušenju in vsebnost pepela vplivata na mehansko obstojnost lesnih peletov.

Hipoteza 3: Domnevamo, da mehanska obstojnost lesnih peletov slovenskih proizvajalcev niha, kar je posledica soodvisnosti različnih dejavnikov.

Hipoteza 4: Porazdelitev velikosti delcev surovine po mletju vpliva na mehansko obstojnost.

Hipoteza 5: Domnevamo, da vsebnost skorje v peletih vpliva na vsebnost pepela, kurilnost in mehansko obstojnost.

2 PREGLED OBJAV

2.1 LES KOT BIOGORIVO

Obnovljivi viri energije so viri energije, ki jih zajemamo iz stalnih naravnih procesov, kot so sončno sevanje, veter, vodni tok, bibavica, zemeljski toplotni tokovi in fotosinteza, s katero rastline gradijo biomaso. Zajemanje obnovljivih virov energije ne izčrpa vira (OVE, Wikipedia, 2015)

Med biomaso uvrščamo bioodpadke, mednje sodijo gozdni in kmetijski odpadki, energetske rastline, ki jih pridelujemo v energetske namene, pa tudi komunalne odpadke. Med goriva na osnovi lesne biomase uvrščamo gozdne ostanke, ostanke pri industrijski predelavi lesa in kemično neobdelan les. Med gozdne ostanke sodijo vejevje, krošnje, debla majhnih premerov ter manj kakovosten les, ki ni primeren za nadaljnjo industrijsko predelavo. Pri industrijski obdelavi lesa nastajajo ostanki primarne in sekundarne predelave (žaganje, krajniki, lubje, prah...). Med preostali kemično neobdelan les uvrščamo produkte kmetijske dejavnosti v sadovnjakih in vinogradih ter že uporabljen les in njegove izdelke (Butala in Turk, 1998).

Biomasa predstavlja enega izmed primarnih surovin, ki jih lahko neposredno ali z različnimi tehnološkimi procesi (anaerobno vrenje, piroliza, kurjenje, vrenje, iztiskanje ali briketiranje) pretvorimo v sekundarna goriva, katera potem pretvorimo v druge oblike energije.

Les se kot vir energije uporablja od davnine. Danes se več kot polovica svetovne produkcije lesa uporabi za gorivo. Kot vir toplotne energije ga uporabljamo takrat, ko le-ta zgori in proizvaja toploto (Tsoumis, 1991).

Rastline zbirajo energijo sonca s pomočjo fotosinteze in jo shranjujejo v obliki organskih ogljikovih spojin. S pomočjo klorofila in pod vplivom sončne energije iz vode in CO₂ tvorijo glukozo. Stranski produkt tega procesa je tvorjenje kisika. Sončno energijo, shranjeno v lesu, lahko tako v veliki meri ponovno pridobimo kot toplotno energijo z gorenjem lesa. Obraten proces pridobivanja energije se vrši pri razkrajanju ali zgorevanju lesa. Ogljik in kisik v lesu reagirata s kisikom iz zraka. Ogljik se s kisikom veže v CO₂, pri čemer se sprošča shranjena energija v obliki toplote.

Zgorevanje lesne biomase je kompleksen proces in vključuje več faz. Segrevanje in sušenje je faza, ki poteka v območju temperatur do 100 °C. Bolj ko je les suh in drobnejši, krajša je faza segrevanja in sušenja, manj energije porabimo. Naslednja faza je uplinjanje in termični razpad lesa (piroliza). S povišanjem temperature se

izločijo najprej plini (kisik, vodik), katerih vnetišče se giblje med 240 °C in 250 °C. V nadaljevanju procesa gorenja razpadejo najprej trdni elementi, kot so npr. celuloza in lignin, v plinasto stanje. Piroliza je endotermični proces, ki potrebuje energijo, medtem ko je zgorevanje eksotermični proces, ki sprošča energijo. V fazi uplinjanja in termičnega razpada potekata oba procesa vzporedno. Razpadanje lesa označujemo kot primarno zgorevanje. V fazi sekundarnega zgorevanja je potrebno dovajati dodatni zrak v področje dogorevanja. Zgorevanje (oksidacija) lesnega oglja nastopa kot zadnja faza gorenja lesa. Minerali, ki jih vsebuje les, ostanejo po gorenju v obliki pepela (Piroliza, 2016).

Proizvodnja in uporaba tradicionalnih ali tehnološko izboljšanih lesnih biogoriv lahko prispeva k zmanjšanju toplogrednih plinov zaradi CO₂ nevtralnih emisij (Katers in sod., 2012). To je bil povod za politične odločitve o uporabi biomase za proizvodnjo toplote in električne energije v Evropi in drugod po svetu (Tolon-Becera in sod., 2011). Številne evropske države so tako subvencionirale zamenjavo kurilnega olja, premoga in plina stanovanjskih in industrijskih ogrevalnih sistemov ali elektrarn s sistemi, ki uporabljajo biomaso (Sgarbossa in sod., 2015). V nasprotju z vetrno in sončno energijo, ki sta odvisni od vremenskih in sezonskih sprememb, se lahko biomasa po potrebi shranjuje, s čimer se zagotavlja stalen vir za proizvodnjo toplote in električne energije (Dunnett in Shah, 2007).

Zaradi želje po zmanjšanju emisij ogljikovega dioksida v ozračje postaja izkoriščanje biomase za proizvodnjo toplote in električne energije vse bolj pomembno. Rastlinska biomasa je na voljo v velikih količinah in se lahko uporablja za trajnostno proizvodnjo toplote in električne energije, če se uporablja kot gorivo (Rosillo-Calle in sod. in Smeets in sod., 2007). Vendar pa je pogosto potrebno premostiti velike razdalje med krajem izvora biomase, kot so gozdovi in kmetijske površine in krajem njene uporabe (industrijska in stanovanjska območja), kar je povezano s stroški rokovanja, shranjevanja in prevoza (Rentizelas in sod., 2009). Eden od glavnih ovir pri izkoriščanju biomase kot vira toplote in energije je majhna gostota energenta. Tudi visoka vsebnost vode, nepravilna oblika in različne velikosti ter vrste biomase v izvorni obliki povečujejo stroške. Možna rešitev teh težav je zgoščevanje materiala biomase v pelete ali brikete (Holley, 1983).

Procesi zgorevanja materialov iz biomase so zapleteni iz treh glavnih razlogov. Prvič, to gorivo ima zelo kompleksno kemično in fizikalno sestavo. Drugič, njegovo zgorevanje poteka v nenadzorovanih pogojih in tretjič, vsebnost vode, gostota in heterogenost teh materialov imajo negativen vpliv na učinkovitost zgorevanja. Zgoščevanje biomase pa prispeva k izboljšanju njihovih lastnosti in sicer s povečanjem njihove homogenosti, kar

povečuje nabor lignoceluloznih materialov, ki se lahko uporabljajo kot gorivo (Tabarés in sod., 2000).

2.2 LESNI PELETI

Stiskanje biomase v brikete in pelete je star proces, ki je poznan že več kot 130 let. William H. Smith je registriral prvi patent za zgoščevanje biomase leta 1880 v Čikagu, Illinois. Opisuje postopek, kjer se žagovina segreje do 150 °C, jo da v močan kalup in stisne z uporabo parnega kladiva.

Proces zgoščevanja biomase je postal komercialen v drugi polovici prejšnjega stoletja predvsem z namenom povečanja možnosti rokovanja z biomaso za uporabo v proizvodnji energije in živalski krmi. V Evropi se je trg s peleti pojavil okoli leta 1980 na Švedskem in se potem razširil po vsej Evropi (Peksa-Blanchard in sod., 2007). Razvoj je vodila naftna kriza in dobra razpoložljivost surovine iz ostankov žagarske proizvodnje ter celulozne in papirne industrije (Bauen in sod., 2009).

Les in rastlinski material ima zaradi svoje porozne strukture majhno gostoto. Gostota biomase iz trave je med 40 in 150 kg/m³ (Adapa in sod., 2002 in Larsson in sod., 2008), večina vrst posušenih listavcev in iglavcev pa ima gostoto med 320 in 720 kg/m³ (Simpson in TenWolde 1999). Gostota lesnih sekancev se giblje med 150 in 200 kg/m³ (Robbins, 1982) in je na splošno nižja od lesa, iz katerega so sekanci proizvedeni. Gostoto biomase lahko povečamo s stiskanjem v pelete z mehanskim postopkom, pri katerem se uporablja tlak, da se poruši celična struktura in s tem poveča gostota materiala. Gostota peletirane biomase tako naraste na okoli 700 kg/m³ (Sokhansanj in Turhollow, 2004). Glavne prednosti lesnih peletov so višja gostota energije, znižanje stroškov prevoza in skladiščenja v kombinaciji s standardiziranimi velikostmi in sestavo, kar omogoča avtomatizirano oskrbo domačih in industrijskih kotlov z gorivom (Verma in sod. 2011 in Sultana in sod. 2010) ter nadzorovan proces zgorevanja (Kåberger, 2002).

Wang in sodelavci (2009) so poudarili, da trg biogoriv s proizvodnjo briketov in peletov za domačo uporabo raste, saj se peleti lahko uporabljajo v pečeh in ponujajo prednosti, kot so enostavno shranjevanje in prevoz, manjše onesnaževanje, nižja vsebnost prahu in višja kurilnost. Poleg tega peleti ponujajo enake prednosti za avtomatizacijo in optimizacijo kot goriva pridobljena iz nafte, vendar z večjo učinkovitostjo zgorevanja in manjšimi količinami ostankov zgorevanja (Rhén in sod., 2007).

Peleti so sodobna oblika zgoščene biomase in ponujajo zanimive možnosti za razvoj obnovljivih virov energije v Evropi. To trdno gorivo je v glavnem proizvedeno iz lesnih

ostankov in tudi iz ostankov različne biomase preko precej preprostih postopkov mletja, sušenja in zgoščevanja. Poceni procesne tehnologije že obstajajo in so zelo konkurenčne v primerjavi s tehnologijami za fosilna goriva (Hansen in sod. 2009).

2.3 IZKORIŠČANJE IN PORABA LESNIH PELETOV

Lesni peleti so eden od najbolj mednarodno razširjenih goriv za proizvodnjo energije in njihov trg v Evropi je v razcvetu. Razlog je v dokaj nizkih stroških proizvodnje na enoto energije ter evropskih in nacionalnih sistemih subvencioniranja za doseg ciljev glede deležev OVE do leta 2020 (Sikkema in sod., 2011).

Peleti so postali priljubljeni v mnogih državah, zlasti v Evropi, kjer je njihovo trženje danes velik posel in trenutno doživlja hiter razvoj (Sikkema in sod., 2011). V obdobju 2009-2012 se je proizvodnja peletov v EU povečala za 30 % in dosegla 9,2 milijona ton v letu 2010 in 10,6 milijona ton v letu 2012 (AEBIOM, 2013). Leta 2013 je proizvodnja lesnih peletov v Evropski uniji znašala 12 milijonov ton ali 49 % svetovne proizvodnje, medtem ko se je poraba lesnih peletov dosegla več kot 18,7 milijona ton ali 80,3% svetovne porabe lesnih peletov (AEBIOM, 2014).

Povpraševanje po obnovljivih virih energije še naprej raste, in podatki za EU, ki so na voljo za leto 2011 in 2012, kažejo, da ocenjena ponudba končne energije iz obnovljivih virov predstavlja okoli 19 % deleža glede na vse ostale vire energije (McGinn in sod., 2013).

Evropsko združenje za biomaso pričakuje, da se bo poraba peletov v Evropi do 2020 povečala za več kot desetkrat, to pomeni na 50×10^6 t peletov (Selkimäki in sod., 2010). Čeprav je bila večina peletov v preteklosti narejena iz čistega lesa (žagovina ali skobljanci), pa se je zaradi povečanega povpraševanja po peletih oskrba s čistim lesom izkazala za nezadostno, zato so se začele uporabljati druge surovine. Trenutno se uporabljajo tudi skorja, veje in debla. Variabilne lastnosti teh materialov vodijo do večje potrebe po definiranju kakovostnih standardov, ki so nepogrešljiva zahteva za usmerjanje trga s peleti (Stahl in Berghel, 2011).

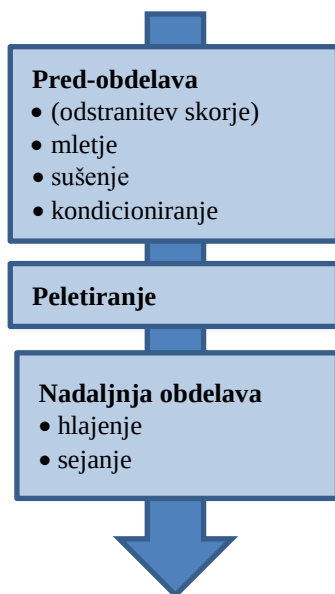
Poraba lesnih peletov v EU je povzročila pomanjkanje peletov na evropskem trgu, kar je povzročilo naraščanje cene in odvisnost od uvozov (Fantozzi, 2005) iz ZDA, Kanade, Južne Amerike, Nove Zelandije in Rusije (Uasuf in Becker, 2011). Ti podatki kažejo, da EU trenutno predstavlja najpomembnejši trg za lesne pelete. Poleg tega je tehnologija, ki je potrebna za izkoriščanje lesnih peletov, še vedno manj kompleksna in cenejša v primerjavi s tehnologijo za izkoriščanje drugih obnovljivih virov energije (Sgarbossa in sod., 2015).

Tudi v prihodnje ima biomasa potencial, da zagotovi stroškovno učinkovito in trajnostno oskrbo z energijo, istočasno pa omogoča državam EU pomoč pri doseganju ciljev za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov (Demirbas, 2006).

2.4 PROCES PROIZVODNJE PELETOV

Različni načini zgoščevanja biomase so baliranje, briketiranje, ekstruzija (iztiskanje) in peletiranje (Tumuluru in sod., 2010). Pri proizvodnji produktov biomase z visoko gostoto se danes uporabljata dva standardna postopka: briketiranje in peletiranje. Oba postopka potekata pri visokem tlaku in tehniki sta pri obeh postopkih zelo podobni. Bistvena razlika med postopkoma je ta, da pri proizvodnji briketov uporabljamo bat ali vijačno stiskalnico, medtem ko so peleti narejeni v peletirni napravi. Velikost končnega produkta se razlikuje; peleti imajo cilindrično obliko in imajo v premeru od 6 do 25 mm in dolžino 3 do 50 mm (Alakangas, 2010), medtem ko imajo briketi dolžino večjo od 25 mm (ISO 17225-1: 2014).

Proces peletiranja sestoji iz več stopenj (slika 1), ki vključuje pred-obdelavo surovine, peletiranje in nadaljnjo obdelavo. Priprava je odvisna od lastnosti surovine in v glavnem vključuje zmanjšanje velikosti delcev, sušenje in kondicioniranje. Po peletiranju gredo peleti v proces hlajenja in nato sledi sejanje, da se odstrani prah.

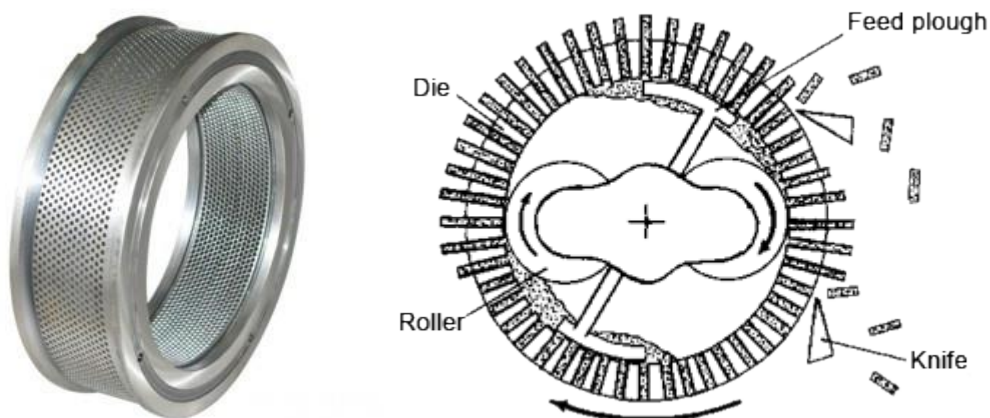


Slika 1: Proces zgoščevanja biomase v procesu proizvodnje peletov (Stelte in sod., 2012: 4454)

Figure 1: Densification of biomass in the production of pellets (Stelte et al., 2012: 4454)

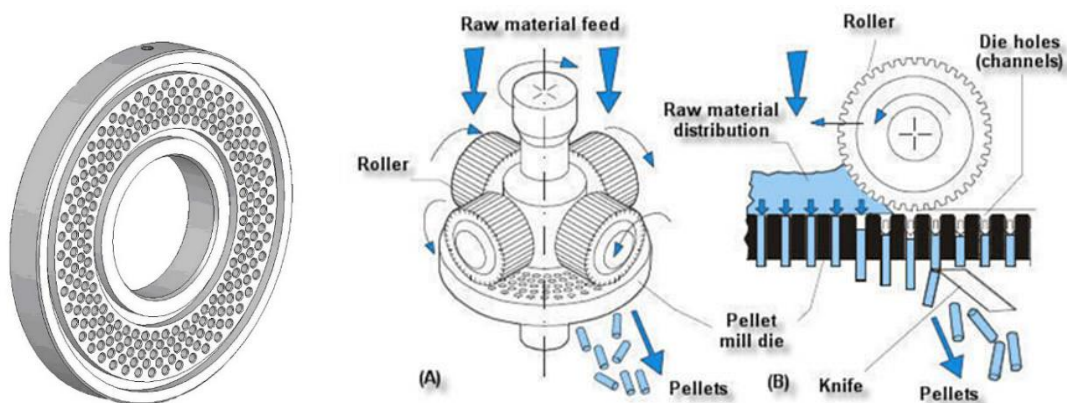
Pelete proizvajamo v napravi, ki sestoji iz matrice s cilindričnimi luknjicami in iz valjev, ki potiskajo biomaso skozi te luknjice. Matrica z luknjicami in valji je osnovni

del peletirne naprave. Matrica je lahko v obliki prstana, kot je prikazano na sliki 2 (Ring die, 2015 in Pelletisation with ring die, 2015) ali v obliki diska, kot je prikazano na sliki 3 (Flat die, 2015 in Pelletisation with flat die, 2015). Matrica ali valji rotirajo in potiskajo delce biomase v luknjice (Stelte in sod., 2012).



Slika 2: Matrica v obliki prstana (ring die) in proces stiskanja z matrico v obliki prstana (Ring die, 2015 in Pelletisation with ring die, 2015)

Figure 2: Ring die and pelletisation with ring die (2015)



Slika 3: Matrica v obliki diska (flat die) in proces stiskanja z matrico v obliki diska (Flat die, 2015 in Pelletisation with flat die, 2015)

Figure 3: Flat die and pelletisation with flat die (2015)

Med procesom peletiranja surovino dovajamo v napravo. Osnovni model matrice v obliki prstana sestoji iz luknjic in običajno dveh (lahko pa tudi enega ali treh) valjev znotraj matrice. Valji se nahajajo v neposredni bližini matrice. Vrteči valji potiskajo biomaso v luknjice matrice iz notranje proti zunanji strani obroča (slika 2). Vsakič ko valj prečka luknjico, surovino potisne v to luknjico (Stelte in sod., 2012). Trenje med

delci surovine in steno matrice zadržuje prost pretok surovine, na ta način se delci kompromirajo in tako nastanejo peleti. En ali dva nastavljiva noža, nameščena zunaj obroča matrice, odrežeta pelete na željeno dolžino (Sokhansanj in Wood, 1991).

Med procesom peletiranja zaradi trenja med biomaso in stenami luknjic v matrici nastaja toplota. Serrano in sodelavci (2011) so s termografskimi posnetki proučevali temperaturo v procesu peletiranja. Temperatura matrice je bila v stabilnih pogojih tekom procesa okoli 90 °C. Temperatura peletov, potem ko so bil iztisnjeni iz luknjic, pa je bila le okoli 70 °C, kar pomeni, da je prišlo do hitre ohlavitve peletov. Do take razlike lahko pride zaradi omejenega prenosa toplote iz matrice na pelete zaradi kratkega časa stika med biomaso in steno luknjic in sorazmerno počasnega prenosa toplote med kovinsko površino in biomaso.

Dvig temperature v stiskalnici zmanjšuje trenje v luknjicah matrice (Stelte, 2011) in znižuje porabo energije v različnih fazah peletiranja (Nielsen in sod., 2009). Stelte in sodelavci (2011) so domnevali, da se ekstraktivi v lesu pri porastu temperature premaknejo na površino peleta, kar znižuje trenje v luknjicah.

Pred stiskanjem lesnih peletov se surovino vodi skozi vodno paro in tako se surovina segreje na približno 70 °C. Segrevanje zagotavlja, da se vsebnost lignina v lesu sprosti, kar prispeva k povečani vezavi delcev v končnem izdelku (peletih). Na tak način zmehčan lignin in lesni prah nato vodimo v peletirno napravo (Hansen in sod. 2009).

Pri izstopu iz matrice imajo peleti temperaturo od 60 °C - 95 °C. Za varno skladiščenje je potrebno temperaturo znižati. Pelete ohlajamo (ponavadi s prisilnim vlekom) takoj za matrico z gradientom 5 °C glede na temperaturo okolja (Turner, 1995). Čas ohlajanja mora biti v intervalu od 4 do 15 minut (Stevens, 1987). Peleti, ki niso ustrezno ohlajeni, imajo slabšo mehansko obstojnost zaradi napetosti v peletu, ki se generirajo med ohlajenim zunanjim slojem in še vedno vročo sredico, kar lahko povzroči razpoke v peletu. Med ohlajanjem topne sestavine v surovini rekristalizirajo in tvorijo vezi med delci. Na ta način se viskoznost nekaterih komponent poveča, kar pomaga pri vzdrževanju strukturne celovitosti peletov (Thomas in sod, 1997).

Na proces peletiranja močno vplivajo uporabljene drevesne vrste, katerih lastnosti se nato odražajo v končni kakovosti peletov (Nielsen in sod, 2009). Tlak pri peletiranju, zadrževanje peletov v kanalu matrice in temperatura iztiskanja so neposredno povezani z lastnostmi surovine (Holm in sod., 2007). Povečana vsebnost listavcev v surovini običajno zahteva večji tlak v procesu peletiranja (Hansen in sod. 2009).

Specifikacije naprave za peletiranje, procesi priprave (mletje, sušenje, kondicioniranje s paro, dodajanje veziv; slika 1) ter lastnosti surovine (vsebnost lignina in ekstraktivov,

škroba, beljakovin, maščob, prisotnost vlaken, vsebnost vode in porazdelitev velikosti delcev) vplivajo na obstojnost zgoščenih proizvodov. Zgoščevanje poveča gostoto proizvodov na 600-800 kg/m³. Na ta način se gostota biomase poveča od 2 do 10 krat (Kaliyan in Morey, 2009).

2.5 VRSTA SUROVINE ZA LESNE PELETE

Les je danes daleč najbolj uporabljena surovina v proizvodnji peletov, medtem ko se kmetijski ostanki in trave navadno uporabljajo za briketiranje. Glede na lastnosti zgorevanja (nastajanje pepela, žlindranje, korozija) ima les bolj zaželene lastnosti v primerjavi s kmetijskimi ostanki in travami. Vseeno pa bodo zaradi omejenih virov lesa in rastoče potrebe po peletih alternativne surovine v bližnji prihodnosti pridobile na pomenu (Scôt, 2011).

Kakovost goriva je v glavnem odvisna od njegove kemične sestave, vključno z vsebnostjo vode. Sestava je odvisna od narave rastlinskih vrst. Sposobnost rastlinskih vrst za privzem selektivnih specifičnih spojin iz tal, vode in zraka se spreminja in je odvisna od geografske lege, podnebja, letnih časov in tal, uporabe gnojil in pesticidov. Na kakovost goriva vpliva tudi čas sečnje/žetve, prevoz, ravnanje in obdelava, mešanje različnih rastlinskih vrst in onesnaženje odpadnega lesa z barvami ali kemično obdelan les (Obernberger, 1997).

Kontaminacijo lesa lahko povzročijo tudi prah, umazanija in zemlja. Zgorevanje onesnaženega lesa lahko vodi v okoljske probleme povezane z emisijami delcev in povečano potrebo po odstranjevanju pepela. Emisije so v glavnem odvisne od gorilne naprave in stanja izgorevanja (Sriraam in sod. 2012).

Za proizvodnjo lesnih peletov se lahko uporablja tako les listavcev kot iglavcev. Les iglavcev običajno predstavlja 70 do 95% surovine, les listavcev pa preostanek (Hansen in sod. 2009).

Čisto surovino pogosto predstavlja več vrst lesa, ker se na ta način zagotovi homogena vsebnost lignina. Ker lignin veže delce v peletih skupaj in ker količina lignina med različnimi drevesnimi vrstami variira (les listavcev ima običajno nižjo vsebnostjo lignina kot les iglavcev), je zelo pomembno, da se zagotovi, da je mešanica, kolikor je le mogoče, enaka in homogena. Uporaba nehomogeniziranega materiala poveča nevarnost motenj med procesom stiskanja (Hansen in sod. 2009).

Večina peletov danes ne vsebuje nobenih dodatkov ali veziv. Določene kemične snovi v lesu, npr. lignin in ekstraktivi, delujejo kot naravna veziva med stiskanjem peletov (Bradfield in Michal, 1984).

Recikliran les ima pogosto razmeroma nizko vsebnost lignina, zato je potreben dodatek, da se zagotovi, da se peleti ne drobijo. Uporabijo se lahko naravna veziva, kot je krompirjev in koruzni škrob ali rastlinsko olje. Peleti, proizvedeni iz recikliranega lesa, so bolj pogosto uporabljajo za sosežig ali v velikih komercialnih kotlih kot v majhnih kurilnih napravah, ki zahtevajo visoko kakovost peletov (Hansen in sod., 2009). Problem recikliranega lesa so tudi onesnažila (lepila, barvila,) in tudi zato je proizvodnja peletov iz recikliranega lesa zelo omejena.

Ugotovljeno je bilo, da drevesne vrste in izvor lesa vplivajo na proces peletiranja (Holm in sod., 2007) in na končno kakovost peletov (Nielsen in sod., 2009; Gil in sod., 2010). Surovina lahko vsebuje različne drevesne vrste, ki imajo različno vsebnost pepela, ker imajo različne drevesne vrste različno vsebnost negorljivih snovi (Lestander in sod., 2012).

Osnovni material za proizvodnjo lesnih peletov so žaganje, skobljanci in sekanci. Tudi drugi tipi biomase, kot so skorja in sečni ostanki, so primeren material predvsem zaradi tega, ker so na razpolago v velikih količinah. Ta alternativna surovina se razlikuje od lesa debela po fizikalnih lastnostih in kemični sestavi. Da lahko proizvajamo visoko kakovostne pelete, je pomembno, da razumemo pomen teh razlik. V raziskavi je Lehtikangas (2001) ugotavljal razlike med peleti narejenimi iz žaganja, skorje in sečnih ostankov. Ugotovil je, da je bila kurilnost najvišja v peletih narejenih iz sečnih ostankov, najvišja vsebnost pepela pa je bila v peletih iz skorje in sečnih ostankov. Rezultati so pokazali, da imajo peleti iz skorje najvišjo mehansko obstojnost, medtem ko imajo peleti iz žaganja najnižjo. Lehtikangas (2001) je zaključil, da so tako skorja kot sečni ostanki primerni material za proizvodnjo peletov.

Različni deli drevesa (deblo, skorja, veje, iglice, listi,...) se razlikujejo po strukturi vlaken in kemični sestavi - npr. po vsebnosti lignina, hemiceluloz, pektina in ekstraktivov. Procesi kot so hidroliza, avtooksidacija ali mikrobna razgradnja spreminjajo lastnosti materiala med skladiščenjem (Assarsson, 1969 in Sjöström, 1993). Zaradi relativno večje vsebnosti amorfnih snovi lignina in ekstraktivov je skorja bolj občutljiva na temperaturo in tlak kot les (Chow, 1971).

Bradfield in Levi (1984) sta ugotovila, da iz čistega lesa listavcev (javor, hrast, topol,...) proizvodnja peletov ni možna, ker pride do blokade matrice v peletirni napravi, ne glede na to ali dodamo paro ali ne. Vendar pa mešanje tega lesa s 15 - 35 % skorje omogoča proizvodnjo peletov s 93 - 99 % mehansko obstojnostjo. Višji delež

ekstraktivov (voski, smole, škrob) in lignin v skorji lahko pomagajo pri vezavi in povečajo obstojnost peletov (Chen in sod., 1989).

Skorja bora sestoji iz okoli 45 % celuloze in hemiceluloze, 40 % lignina in 15 % ekstraktivov. Les bora pa vsebuje 55 % celuloze in hemiceluloze, 30 % lignina in 10 % ekstraktivov (Nurmi, 1993).

Skorja je material, ki lahko negativno vpliva na proizvodnjo peletov, zato ker je zunanji izpostavljen del drevesa in lahko pogosto vsebuje pesek in zemljo, kar v proizvodnji peletov ni zaželeno (Lehttinkangas, 1999).

Raziskave, ki so jih naredili Filbakk in sodelavci (2011), kažejo, da imajo peleti s povišanim deležem skorje sorazmerno višjo gostoto nasutja in manjšo količino finih delcev, poveča pa se jim vsebnost pepela. Ugotavljali so kvaliteto peletov rdečega bora z različno vsebnostjo skorje (0, 5, 10, 30 in 100 % skorje). Peleti narejeni iz čiste skorje so imeli večjo mehansko obstojnost v primerjavi z ostalimi peleti z nižjim deležem skorje. Vendar pa te razlike niso bile bistvene in mehanska obstojnost vseh tipov peletov je bila po CEN standardu v istem kakovostnem razredu. Količina pepela pa z večjim deležem skorje v peletih narašča (Filbakk in sod., 2011).

Skorja vsebuje več dušika in žvepla kot les. To lahko povzroča probleme s povišanimi emisijami dušikovih oksidov in žveplovega dioksida, ki nastajajo v procesu gorenja (Oberberger in Thek, 2004). Skorja ima tudi višjo vsebnost mineralov in posledično približno petkrat višjo vsebnost pepela kot les. Drug pomemben dejavnik pri vsebnosti skorje v surovini je nagnjenje k sintranju med izgorevanjem. Zaradi skorje se lahko pojavijo težave z nizkimi učinkovitosti pri izgorevanju in večje potrebe po čiščenju zgorevalnega prostora pepela (Örberg, 2004; Baerthaler in sod., 2006; Oberberger in sod., 2006).

Peleti narejeni iz skorje se največkrat uporabljajo v večjih kurilnih napravah ali toplarnah, kjer se s problemi, ki jih povzroča večja vsebnost pepela, lažje spoprimemo, ker so opremljene z izgorevalnimi enotami, ki so namenjene kurjenju takega materiala (Filbakk in sod., 2011).

2.6 MEHANIZMI VEZAVE PELETIRNEGA MATERIALA

Pri peletiranju zrnatega materiala pride do dveh osnovnih mehanizmov povezovanja in sicer zaradi

- a) vpliva tlaka na delce in

b) interakcije med delci (Steward, 1950).

Sile, ki so udeležene pri vezavi in nastanejo med posameznimi delci v peletu, lahko delujejo na pet načinov (Rumpf, 1962 in Pietsch, 2002):

- a) s trdnimi mostički med delci,
- b) s privlačnimi silami med trdnimi delci,
- c) z mehansko povezavo,
- d) z adhezijo in kohezijo,
- e) s površinsko napetostjo in kapilarnim tlakom.

Zaradi uporabe visokega tlaka in temperature pri peletiranju se lahko trdni mostički med delci razvijejo z difuzijo molekul na stičnih točkah med dvema delcema. Trdni mostički se lahko tvorijo med delci tudi zaradi kristalizacije nekaterih sestavin, kemične reakcije ter strjevanja veziv ali staljenih komponent. Trdni mostički med delci se večinoma oblikujejo po ohlajanju ali sušenju zgoščenih proizvodov.

Privlačne sile, ki imajo majhen obseg delovanja, so na primer molekularne (valenčne sile - brez kemičnih vezi, vodikove vezi ter van der Waalsove sile), elektrostatične in magnetne sile. Te sile lahko povzročijo, da se trdni delci držijo drug drugega, če so delci dovolj blizu skupaj (Kaliyan in Morey, 2009). Ko so delci surovine dovolj majhni, t.j. $< 50 \mu\text{m}$, imajo lahko van der Waalsove sile vlogo pri strukturni integriteti peletov. Če pa je velikost delcev večja, potem vlogo pridobijo drugi mehanizmi vezave delcev v peletih (kapilarne sile, vezivni material,...) (Thomas in van der Poel, 1996).

Med procesom stiskanja se lahko vlakna, ploščato oblikovani delci in večji delci medsebojno povezujejo ali zavijajo eden okoli drugega, s čimer nastajajo mehanske povezave.

Tanke adsorpcijske plasti ($\leq 3 \text{ nm}$ debele) so negibljive in lahko tvorijo močne povezave med sosednjimi delci z zmanjšanjem razdalje med delci, kar omogoča medmolekularnim privlačnim silam, da sodelujejo v mehanizmu povezovanja (Kaliyan in Morey, 2009). Adhezija je pojav medsebojnih privlačnih površin dveh teles iz različnih materialov ali telesa in tekočine zaradi vpliva elektromagnetnih sil med molekulami. Privlačna sila je večja, če je ena od snovi tekočina. Prisotnost tekočin, kot je prosta voda med delci, povzroča kohezivne sile med delci. Kohezija je privlačna medmolekularna sila, ki deluje med sosednjimi delci snovi. V vodi delujejo močne kohezivne sile. S kohezijo in adhezijo lahko pojasnimo površinsko napetost in kapilarnost.

Površinska napetost vode vzdržuje strukturo peleta s trofaznim sistemom: zrak, voda in delec. Prisotnost vode drži trdne delce skupaj zaradi površinske napetosti vode. Če se vsebnost vode zmanjša, povezovalni učinek vode v peletih izostane. Po drugi strani pa večja vsebnost vode povzroči, da trofazni sistem (zrak, voda, delci) postane dvofazni (samo voda in delci). V dvofaznem sistemu ni kapilarnih sil, ki vzdržujejo strukturo peletov. Tako vidimo, da sta prisotnost vode in količina le-te kritični za vzdrževanje strukture peletov (Thomas in van der Poel, 1996).

Proces zgoščevanja biomase so Mani in sodelavci (2004) zelo dobro opisali na primeru trav in ga razdelili na več stopenj. Na začetku se tlak počasi povečuje, ker se delci preurejajo na način, da bodo zasedli čim manj prostora in zrak, ki je ujet v pore med delci, se med stiskanjem odstrani. Z nadaljnjim stiskanjem materiala so delci zelo blizu eden drugega in tako lahko van der Waalsove sile in elektrostatične sile te delce držijo skupaj. Po določenem času se delci tako stisnejo drug ob drugega, da začnejo potekati elastične in plastične deformacije in spajanje vlaken (Pietsch, 2002). Celična struktura se poruši in snovi v steni (npr. lignin in hemiceluloza) se sprostijo iz stene in reagirajo z okoliškimi delci (Odogherty, 1989). Zaradi visokega tlaka in temperature se lignin zmehča. To ima za posledico prepletanje polimernih verig med sosednjimi vlakni (Kaliyan in Morey, 2010).

V študiji, ki so jo opravili Lee in sodelavci (2013) so ugotovili, da se je obstojnost peletov iz macesna, proizvedenih pri temperaturi peletiranja 180 °C, povečevala z naraščajočo vsebnostjo vode od 7 % do 9 %, vendar pa se obstojnost z nadaljnjim povečanjem vsebnosti vode (9 %, 11 % in 13 %) ni bistveno spremenila. Boljša mehanska obstojnost peletov povezana s povečanjem vsebnosti vode v lesnih delcih je verjetno posledica povečanja sile vezave med posameznimi lesnimi delci. Po mnenju Kaliyana in Moreya (2009) voda deluje kot vezivo in mazivo. To pomeni, da več vode v surovini pomaga razviti več privlačnih sil, ki držijo lesne delce skupaj.

2.6.1 Škrob kot vezivo v peletih

Škrob deluje kot vezivo (Wood, 1987). Naravni škrob ima manjše sposobnosti vezave kot želatiniran škrob. Želatinacija škroba se pojavi v prisotnosti toplote in vlage. Mehanske strižne sile med procesom zgoščevanja izboljšajo tudi želatinacijo škroba. Ugotovili so, da do želatinacije škroba vodita dva mehanizma:

- a) hidratacija in nabrekanje zrn škroba in motnje v kristalni strukturi zaradi kombiniranega vpliva temperature in vlage in
- b) spremembe v zrnih škroba zaradi strižnega trenja, ki nastane, ko gre surovina skozi matrico.

Večji ko je delež želatiniranega škroba, večja je obstojnost peletov (Heffner in Pfost, 1973).

2.6.2 Lignin kot vezivo v peletih

V peletih deluje lignin kot vezivo. Struktura lignina se v iglavcih in listavcih razlikuje (Sundberg in Holmbom, 2002). Vsebnost lignina je drugačna tudi v različnih delih drevesa - skorja vsebuje več lignina kot les (Lehtikangas, 2001). Visoke vsebnosti lignina so našli predvsem v vejah iglavcev, grčah in v kompresijskem lesu (Sundberg in Holmbom, 2002).

Skorja ima bistveno višjo vsebnost lignina in ekstraktivov v primerjavi z lesom. V študiji, ki so jo naredili Filbakk in sodelavci (2011), je bila mehanska obstojnost najvišja v peletih iz čiste skorje, kar podpira teorijo, da je visoka vsebnost lignina koristna za mehanizme vezave v peletih. Prisotnost lignina v lesu povečuje povezovanje v peletih, ker ima lignin nizko temperaturo tališča (140 °C) (Mani in sod., 2006; van Dam in sod., 2008).

Temperatura mehčanja lignina in hemiceluloze vpliva na lastnosti vezave lesa. Adsorpcija vode pa zniža temperaturo mehčanja lignina. Pri suhi jelki je bila temperatura mehčanja lignina pri 195 °C. Če pa je bila vsebnost vode v ligninu 27 % ali več, je bila temperatura mehčanja pri 90 °C (Goring, 1963). Lehtikangas (2001) je določil, da je temperatura mehčanja lignina v peletih z vsebnostjo vode 8-15 % okoli 110-135 °C.

V raziskavi, ki so jo naredili Lee in sodelavci (2013), so pokazali, da je lignin v peletih iz macesna izdelanih pri nizkih temperaturah in krajšem času peletiranja prisoten le lokalno. Z naraščajočo temperaturo in daljšim časom peletiranja pa se lignin začne širiti po surovini. Količina lignina v macesnovih peletih izdelanih pri temperaturi 120 °C, 150 °C in 180 °C je bila 6.38 %, 7.24 % in 18.41 %. Poleg tega se je količina lignina povečala tudi pri podaljšanju časa peletiranja iz 1 na 3 minute in sicer iz 6,76 % na 14.60 %.

2.7 FIZIKALNE, KEMIČNE IN MEHANSKE LASTNOSTI LESNIH PELETOV

Surovina za pelete so torej kompleksne naravne sestavine, katerih kemična in strukturna sestava se razlikujejo glede na vrsto lesa, dele lesa in tudi postopke skladiščenja (Jirjis in Theander, 1990).

Vrsta fizikalnih, kemičnih in mehanskih lastnosti lesnih peletov vpliva na kakovost biogoriva. Predvsem gostota nasutja, vsebnost vode in pepela, mehanska obstojnost in s tem povezana količina prahu in kurilnost peletov so se izkazali za ključne pri učinkovitosti energetskih sistemov, ki uporabljajo biomaso (Johansson in sod., 2004). Pri zahtevah, ki določajo kvaliteto peletov, sta pomembni tudi masna porazdelitev velikosti delcev surovine in čistost surovine. Čistost v tem primeru pomeni, da ni prisotnih mineralnih delcev, plastike, snega, nenaravnih kemikalij, odpadkov in drugih nečistoč, ki lahko motijo proces proizvodnje (Lycksell, 2003).

2.7.1 Vsebnost vode v biomasi in peletih

V tehnologiji lesa se za opis vlažnosti uporablja več izrazov, ki so v nadaljevanju podrobneje razloženi.

- a) Gorišek (2009) je v univerzitetnem učbeniku Biotehniške fakultete, oddelek za lesarstvo, uporabil naslednje definicije:

Vlažnost lesa je v lesni tehnologiji izražena relativno kot količina vode na maso lesa v absolutno suhem stanju (enačbi 1 in 2):

$$u = \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} \quad [\text{kg/kg}] \quad \dots (1)$$

$$U = \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad \dots (2)$$

V lesni tehnologiji manj pogosto določamo absolutno vlažnost, ki je definirana kot razmerje med maso vode v lesu in maso vlažnega lesa in je izračunana po enačbi 3:

$$x = \frac{m_{vl} - m_0}{m_{vl}} \quad [\text{kg/kg}] \quad \dots (3)$$

u , U – lesna vlažnost (kg/kg), (%)
 m_0 – masa absolutno suhega lesa (kg)
 m_{vl} – masa vlažnega lesa (kg)
 x – absolutna vlažnost lesa (kg/kg)

- b) Na Gozdarskem inštitutu Slovenije za vodo v lesu uporabljajo naslednjo terminologijo (Krajnc in Piškur, 2011):

Vlažnost u (%), ki je izražena kot delež mase vode glede na maso lesa v absolutno suhem stanju in je izračunana po enačbi 4:

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad \dots (4)$$

Vsebnost vode w (%), ki je izražena kot delež mase vode v lesu glede na maso vlažnega lesa in je izračunana po enačbi 5. To mero najpogosteje uporabljamo pri trženju lesnega goriva.

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 \quad [\%] \quad \dots (5)$$

m_0 – masa sušilnično suhega lesa (kg)

m_w – masa svežega lesa (kot dobljeno) (kg)

- c) Standard za določanje vsebnosti vode SIST EN 1774-1: 2010 in nov standard SIST EN ISO 18134-1: 2015 uporabljata izraz celotna vlaga. Po enačbi za preračun, ki je navedena v tem standardu vidimo, da gre za vsebnost vode oziroma absolutno vlažnost.

V peletih in surovini smo določali vsebnost vode v lesu glede na maso vlažnega lesa. Izraz celotna vlaga povzet po standardni metodi SIST EN 1774-1: 2010 oziroma SIST EN ISO 18134-1: 2015 se nam ni zdel ustrezno strokovno preveden. Ker smo se v nalogi ukvarjali s peleti, ki predstavljajo gorivo, smo se odločili, da bomo uporabljali izraz vsebnost vode.

Vsebnost vode v biomasi je lahko posledica atmosferskih dejavnikov (dež, sneg, visoke temperature,...) in jo odstranimo s sušenjem pri sobni temperaturi ali s sušenjem v sušilni komori pri temperaturi do 40 °C. Del vode pa je v tesnejšem kontaktu z biomaso, čeprav ni z njo kemično vezana. Odvisna je od fizikalno-kemičnih lastnosti goriva. Te vode na pogled ne opazimo, s pomočjo kapilarnih sil se zadržuje v porah. Lahko jo odstranimo samo s sušenjem pri temperaturi od 100 do 110 °C.

Pred procesom peletiranja mora biti vsebnost vode v surovini približno 10 %. Če je vsebnost vode v surovini previsoka, jo je potrebno posušiti. Sušenje je zelo pomembno za končni proizvod, saj je surovino z vsebnostjo vode višjo od 15 % težko peletirati (Hansen in sod. 2009).

Visoka vsebnost vode v surovini poveča stroške sušenja materiala. Voda deluje kot eno izmed veziv v procesu peletiranja. Vendar pa prevelika vsebnost vode povzroči polzenje surovine in tako drsi skozi luknjice matrice preveč zlahka, s čimer se zmanjša kakovost peletov. Surovina, ki je presuha, lahko zamaši luknjice v matrici, če je upor iz luknjic večji od sile valja (Resch, H. 1989). Mnenja, kolikšna je optimalna vsebnost vode, se razlikujejo. Peleti običajno vsebujejo 8-15% vode.

Optimalno vsebnost vode v surovini je potrebno opredeliti in zagotoviti skozi natančen nadzor in uravnavanje v fazi proizvodnje (Larsson in sod., 2013). To je pomembno zato,

ker ima voda v surovini, ki je v obliki vezane vode, ključno vlogo pri nastanku vezi med delci, če se njena vrednost vzdržuje med 8 % in 13 % (Filbakk in sod., 2011).

Pri peletiranju surovina z visoko vsebnostjo vlaken ni sposobna adsorbirati vlage, tako ostaja voda na površini delcev, ki povzročajo prebitek maziva med delci. To povzroči, da sredica peleta ekstrudira (izriva) hitreje kot zunanost, pri čemer nastajajo peleti v obliki t.i., "božičnih drevesc", kar zmanjšuje obstojnost peletov (Winowski 1995). Proizvodnja visoko kakovostnih peletov je mogoča le, če je vsebnost vode v surovini med 8 in 12 %, vsebnost vode nad ali pod tem območju pa bi privedla do slabše kakovosti peletov (Oberberger in Thek, 2004).

Vsebnost vode v peletih po peletiranju se izkaže za enega od pomembnejši dejavnikov, ki vplivajo na adsorpcijo vode. Peleti z nizko vsebnostjo vode ($< 6\%$) imajo večjo sposobnost adsorpcije vode kot peleti z višjo vsebnostjo vode ($\geq 10\%$) (Gref, 2006).

Vsebnost vode v surovini med drugim vpliva na gostoto nasutja in spodnjo kurilnost končnega proizvoda (Samuelsson in sod., 2009).

2.7.2 Vsebnost pepela v biomasi in peletih

Eden pomembnejših parametrov za določanje kakovosti peletov je vsebnost pepela. Pepel tvorijo negorljive mineralne substance. Predstavlja resen problem pri sežigu biomase, ker lahko povzroča žlindranje, slabo aglomeracijo, zamašitev in korozijo v kurilni napravi, kar zmanjša izkoristek in povzroči škodo na sistemu (Werkelin in sod., 2010).

Za kurilne naprave so poleg količine pepela zelo važne tudi fizikalne lastnosti, posebno njegovo tališče. Pepel, ki se tali v kurišču pri temperaturi kurjenja, se lepi na rešetke, zamaši odprtine rešetk in s tem preprečuje pravilen dotok zraka za gorenje in optimalno sežiganje.

Tališče pepela je v veliki meri določeno s sestavo pepela. Kloridi fosforja, natrija, magnezija, mangana in kalija so najpomembnejše soli, ki vplivajo na tališče pepela (Örberg, 2004; Baernthaler in sod., 2006; Oberberger in sod., 2006).

Peleti, ki imajo 10 % skorje, imajo vsebnost pepela okoli 0,7 % (Filbakk in sod., 2011). Navadno je vsebnost pepela v lesni biomasi od 0,5 % do 3 % (Reimann in sod., 2008).

Povečana vsebnost pepela znižuje kurilnost in pomeni tveganje za sintranje ter slabo vpliva na mlin in ostalo peletirno opremo (Resch, H. 1989).

2.7.3 Elementna sestava biomase

Glavne sestavine lesa so ogljik od 45 - 50 %, sledi kisik od 40-50 %, vodik okoli 6% in dušik manj kot 1%. Vrednosti so preračunane na stanje brez vlage (Telmo in sod., 2010).

Ogljik je osnovni gradbeni element vseh goriv. Vodik je lahko s kisikom vezan v vodo. Vodik vezan s kisikom se imenuje "vezani vodik". Ne sodeluje pri gorenju, ker je že vezan s kisikom, ne daje toplote, ampak porabi celo del toplote za izparevanje vode, v kateri je vezan. Predstavlja balast, ker je za izparevanje vode potrebno dodajati energijo. Tisti del vodika, ki je vezan z ogljikom imenujemo "prosti vodik", ker ta sodeluje pri gorenju tako, da tvori vodo in daje toploto.

Dušik pri procesu izgorevanja ne daje toplote, vendar s svojim deležem v sestavi goriva posredno zmanjšuje kurilnost. Pri procesu gorenja nastajajo dušikovo oksidi.

Kisik je nezaželen element v gorivu. S tem, da veže na sebe del gorljivih elementov (ogljik, vodik), gorivu zmanjšuje kurilnost. V procesu gorenja sodeluje samo toliko, da zamenjuje del kisika, ki je potreben za gorenje.

Biogorivo vsebuje tudi različne količine elementov, kot sta žveplo in klor, ki lahko znižata tališče pepela. To lahko povzroči operativne težave pri gorenju, ker pride do nastanka depozitov (žlindre) v peči. Pri korozivnih komponentah lahko žveplo in klor zmanjšata zaščitno oksidno plast v peči. Klor lahko povzroči nastanek izredno toksičnih dioksinov. Vendar pa sta žveplo in klor v lesnih gorivih prisotna v nizkih koncentracijah (Öhman in Nordin 1998).

V primerjavi s premogom vsebuje biomasa večji delež kisika in vodika, vendar manj ogljika. Te lastnosti zmanjšajo kurilnost biomase, ker je energija, ki jo vsebujejo vezi ogljik-kisik in ogljik-vodik nižja kot energija, ki jo vsebujejo vezi ogljik-ogljik (Munir in sod., 2009). Vendar pa višja vsebnost kisika v biomasi pomeni, da ima biomasa višjo toplotno reaktivnost kot premog (Haykiri-Acma in Yaman, 2008).

2.7.4 Kurilnost biomase

Pri poimenovanju kurilnosti v slovenskem jeziku izrazoslovje ni ustrezno rešeno. V praksi se za poimenovanje kurilnosti uporabljajo trije izrazi: kurilna vrednost, kalorična vrednost in kurilnost. Prevod standarda SIST EN 14918 za določanje kurilnosti uporablja izraz kalorična vrednost, angleški izraz je calorific value, nemški izraz pa Heizwert. Besedna zveza kalorična vrednost je pleonazem, ker je beseda vrednost

odveč, saj že pridevnik kalorični govori o vsebnosti energije. V tem primeru bi bilo edino smiselno uporabljati pojem kaloričnost. Vendar pa smo zgodovinsko gledano bili Slovenci pod nemškim vplivom in tako se je sprva pri nas uveljavil prevod nemškega izraza Heizwert v zgorevalno toploto (zgornja kurilnost). Tudi na Fakulteti za strojništvo pri vseh predmetih s področja energetike uporabljajo termin kurilnost. Na podlagi teh dejstev smo se odločili, da bomo v nalogi pisali o kurilnosti.

Kurilnost je najpomembnejši parameter, ki opredeljuje gorljivost snovi. Število enot proizvedene energije izražene v joulih, ki nastane pri zgorevanju enote mase goriva, imenujemo kurilnost. Kurilnost lesa se lahko izrazi kot (Telmo in Lousada, 2011):

- a) zgornja kurilnost pri konstantnem volumnu (v suhem stanju),
- b) spodnja kurilnost pri konstantnem tlaku (v suhem stanju),
- c) spodnja kurilnost pri konstantnem tlaku (v dostavljenem stanju).

Zgornja (bruto) kurilnost je absolutna vrednost zgorevalne toplote in predstavlja zažig vzorca v kalorimetrični bombi napolnjeni s kisikom pri konstantnem volumnu. Produkti izgorovanja so kisik, dušik, ogljikov dioksid in žveplov dioksid (SIST EN 14918:2010). Vodna para, ki nastane pri zgorevanju biomase, kondenzira. Pri tem se sprošča toplota, zato kurilnost pri konstantnem volumnu imenujemo zgornja kurilnost (lahko tudi bruto).

Spodnjo (neto) kurilnost preračunamo iz zgornje kurilnosti in je določena pri konstantnem tlaku, tako da vsa voda iz reakcijskih produktov ostaja v obliki vodne pare (SIST EN 14918:2010). V sistemih kurilnih naprav je uporabnejša spodnja kurilnost. V primeru konstantnega tlaka voda v obliki vodne pare zapusti objekt skozi dimnik.

Spodnja kurilnost materiala v dostavljenem stanju je morda najbolj uporabna mera vsebnosti energije. Ko lesno gorivo zgori, se vsebnost vlage upari in ta proces zahteva energijo (Telmo in Lousada, 2011)

Zgornja in spodnja kurilnost goriva se tako razlikujeta v količini kondenzacijske toplote, ki jo vsebuje vodna para v dimnih plinih (Senegačnik in Oman, 2004).

Kondenzacija vodne pare zviša količino energije pridobljene iz lesa. Vodna para lahko nastane iz dveh razlogov: iz vsebnosti vode v lesu in iz nastanka vode iz vodika v lesu. Razlika v zgornji kurilnosti suhega materiala je med različnimi drevesnimi vrstami majhna (Telmo in Lousada, 2011).

Ogljik in vodik med zgorevanjem oksidirata z eksotermno reakcijo (nastaneta CO₂ in voda) in tako vplivata na zgornjo kurilnost goriva. Organsko vezan kisik je potreben za proces zgorevanja, potrebno pa je dovajati tudi kisik iz zraka. Vsebnost ogljika v lesni

biomasi (vključno s skorjo) je večja kot pri zelnatih gorivih iz biomase, kar pojasnjuje nekoliko višjo zgornjo kurilnost lesne biomase (Oberberger in Thek, 2004).

Standard SIST EN ISO 17225-1:2014 podaja značilne spodnje kurilnosti trdnih biogoriv podane na suho stanje (Hsp-bv), ki so prikazane v naslednji preglednici:

Preglednica 1: Značilne spodnje kurilnosti podane na suho stanje (Hsp-bv) različnih vrst lesa (SIST EN ISO 17225-1:2014)

Table 1: Typical gross calorific values (Hsp-bv) for different wood materials

SUROVINA	IGLAVCI Hsp-bv (MJ/kg)	LISTAVCI Hsp-bv (MJ/kg)
Čisti les brez skorje, listov in iglic ali z minimalnimi količinami	18,5 do 19,8 Značilna vrednost: 19,1	18,4 do 19,2 Značilna vrednost: 18,9
Čista skorja	17,5 do 20,5 Značilna vrednost: 19,2	17,1 do 21,3 Značilna vrednost: 19,0
Lesni ostanki	18,5 do 20,5 Značilna vrednost: 19,2	18,3 do 18,5 Značilna vrednost: 18,7

Kurilost peletov narašča s povečevanjem deleža skorje v peletih. Skorja ima višjo kurilnost zaradi večje količine ekstraktivov in lignina, ki imajo večjo kurilnost kot celuloza (Filbakk in sod., 2011).

2.7.5 Velikost delcev v peletih

Pri proizvodnji peletov so ponavadi delci v surovini v premeru manjši od 5 mm. Na splošno je velika variabilnost v velikosti delcev najboljša za kakovost peletov. Vendar pa je pomembno, da je variabilnost velikosti delcev čim bolj konstantna. Prevelika količina finih delcev (manjših od 0,5 mm v premeru) v surovini ima negativen vpliv tako na trenje pri proizvodnji kot na kakovost peletov. Količina finih delcev manjših od 0,5 mm naj ne bi presegla 10 % do 20 %, razen če je k surovini dodano vezivo (Stelte in sod., 2012).

Velikost delcev pomembno vpliva na mehansko obstojnost peletov. Bolj ko je surovina zmleta, večja je mehanska obstojnost. Manjši delci običajno sprejmejo več vlage kot večji delci zaradi večje adsorpcijske površine. Večji delci imajo tudi mesta, kjer pride do razpok in lomljenja peletov (MacBain, 1966). Za dobro kakovost peletov je priporočena velikost delcev od 0,6 do 0,8 mm (Turner, 1995). Delci večji od 1 mm že vnaprej delujejo kot točke za prelom peleta. Čeprav iz manjših delcev naredimo bolj obstojne pelete, pa fino mletje poveča stroške proizvodnje. Mešanica delcev z

različnimi velikostmi bo dala najbolj optimalno kvaliteto peletov. Različne velikosti delcev omogočajo vezavo med delci s skoraj nič prostora med delci (Payne, 2006).

Stelte s sodelavci (2011) je pokazal, da trenje v luknjicah matrice narašča z manjšanjem velikosti delcev pri bukvi zaradi povečanja kontaktne površine med delci in stenami luknjic.

Velikost delcev v peletih vpliva na adsorpcijo vode. Peleti, ki so narejeni iz manjših delcev, lažje adsorbirajo več vode v primerjavi s peleti, ki so narejeni iz bolj grobih/večjih delcev (Gref, 2006).

2.7.6 Mehanska obstojnost peletov in vsebnost prahu

Mehanska obstojnost peletov je za potrošnika zelo pomembna. Lesni peleti z nizko obstojnostjo so še posebej občutljivi na mehanske obremenitve med transportom, kar ima za posledico nastanek prahu. Obstojnost je med drugim določena z vsebnostjo lignina in vode in je odvisna tudi od tega, kako močno so bili peleti stisnjeni. Ker ima vlažnost velik vpliv na obstojnost peletov, jih je potrebno skladiščiti v suhem prostoru (Hansen in sod. 2009).

Mehanska trdnost peletov je zelo pomemben faktor na številnih ravneh. Organski prah lahko predstavlja tveganje za zdravje. Eksplozija prahu oziroma požar je še ena nevarnost, ki smo ji izpostavljeni pri rokovanju, skladiščenju in prevozu goriva. Trdnostne lastnosti peletov je mogoče opredeliti z dvema različnima parametroma, in sicer s trdoto, ki opisuje silo, ki je potrebna, da zdrobimo pelete in z obstojnostjo, ki opisuje količino prahu, ki nastane iz peletov, potem ko so bili izpostavljeni mehanskemu stresanju (Thomas in van der Poel, 1996). Končni deli peleta so največji vir za tvorbo prahu in zato lahko obstojnost povežemo s številom peletov na kg. Številne študije so pokazale, da bolj ko so delci surovine zmleti, boljša je kakovost peletov (Thomas in van der Poel, 1996).

Drobni delci in prah lahko motijo polnjenje sistema kotlov in lahko privedejo do težav pri pravilnem zgorevanju peletov, kar vodi v zmanjšanje učinkovitosti kotla (Lehtikangas, 2000).

Da bi se izognili nastajanju prahu, morajo peleti prenesti obremenitve, ki nastanejo pri rokovanju in prevozu. Sile, ki peletom povzročajo škodo (drobljenje in abrazija peletov) med rokovanjem, prevozom in skladiščenjem lahko razdelimo v tri glavne razrede: tlačne, udarne in strižne sile. Tlačne sile povzročajo drobljenje, udarne sile povzročajo rahljanje tako na površini peleta kot razkrajanje vzdolž peleta, strižne sile pa povzročajo abrazijo robov in površine peleta (Young in sod., 1963).

2.7.7 Gostota nasutja peletov

Delo, ki so opravili ga Ståhl in sodelavci (2009) opredeljuje vpliv gostote nasutja peletov na učinkovitost kotla. Gostota nasutja vpliva na maso dovedenega goriva v gorilnik in količino zraka, ki je potreben za izgorevanje. V kotlih brez avtomatskih nadzornih sistemov lahko spremembe gostote nasutja goriva vplivajo na proces zgorevanja in povečanje toplotnih izgub.

Gostota nasutja je pomembna pri ohranjanju dobre kakovosti peletov med procesom transporta.

2.7.8 Barva peletov

Na barvo lesnih peletov vpliva predvsem surovina, ki se uporablja za njihovo proizvodnjo in katere sestava in lastnosti vplivajo na kakovost končnega proizvoda. Peleti, ki so narejeni iz čistega lesa, so svetle barve in imajo nizko vsebnost pepela, medtem ko so peleti izdelani iz različnih zmesi lesa in skorje ali listov običajno temnejše barve in so bogatejši z minerali (Sgarbossa in sod. 2014).

Barva peletov, ki so narejeni iz žaganja čistega lesa, ostankov predelave ali debel z odstranjeno skorjo in oblancev, je običajno svetlejša. Odsotnost skorje pomeni nižjo vsebnost pepela v primerjavi z lesom (Fibakk in sod., 2011; Lehtikangas, 2001). Peleti, katerih surovino predstavljajo celotna debela vključno s skorjo in mineralnimi snovmi, so temnejše barve in navadno je njihova vsebnost pepela višja (Lam in sod., 2012).

Študija, ki je obravnavala lesne pelete za ogrevanje stavb, je pokazala, da je trg lesnih peletov zelo občutljiv na barvo peletov. To potrjuje dejstvo, da imajo temni peleti nižjo tržno vrednost kot svetli peleti (Lam in sod., 2012). Potrošniki običajno povezujejo temnejšo barvo peletov s kontaminacijo surovine z nečistočami, kot je skorja, kar se odraža v večji vsebnosti pepela in vpliva na kakovost peletov (Sgarbossa in sod., 2014).

Čeprav barva ni parameter za razvrščanje kakovosti peletov, kot je opredeljeno s strani mednarodnih standardov (ISO), pa ta parameter močno vpliva na povpraševanje potrošnikov. Barva je izmed vseh parametrov edina neposredno preverljiva na prvi pogled (Hellrigl, 2004 in Kofman, 2007). Vendar pa take ocene kakovosti peletov znanstvene študije ne podpirajo. Bilo je dokazano, da ni jasnih zvez med lastnostmi peletov in njihovo barvo (Sgarbossa in sod., 2014).

2.8 HIGROSKOPNE LASTNOSTI PELETOV

Večina materialov iz biomase v naravi je higroskopna. Les in lesni material lahko sprejema in oddaja vlago iz atmosfere. Natančno poznavanje vsebnosti ravnovesne vlažnosti (EMC) je bistvenega pomena pri ovrednotenju okoljskih in drugih sprememb opaženih pri shranjevanju. Skladiščena biomasa med deževno sezono sprejema velike količine vlage. Tradicionalni način odstranjevanja vlage je z uporabo sušilnikov. Pravilno konstruiranje sušilnikov zahteva podatke o vsebnosti ravnotežne vlage v biomasi (Iyer in sod., 2002).

Razmerje med vsebnostjo ravnovesne vlažnosti (EMC) v lesu in relativno vlažnostjo v okolju pri konstantni temperaturi je opisana kot sorpcijska izoterma. Pri lesu je sorpcijska izoterma med drugim odvisna od drevesne vrste (Skar, 1988; Hartley in Avramidis, 1994).

Znano je, da imajo les in lesni materiali, ki jih obdelujemo pri visokih temperaturah ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), nižjo sorpcijsko izotermo pri spremembi vlažnosti pri sobni temperaturi (Stamm, 1964). Na primer toplotno obdelan les pri temperaturi $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ima nižjo ravnovesno vlažnost v primerjavi s toplotno neobdelanim lesom.

Hartley in Lisa (2008) sta proučevala higroskopne lastnosti peletov iz lesa iglavcev. Sorpcijske lastnosti masivnega lesa in peletov niso enake. Peleti sestavljeni iz žaganja so bili proizvedeni pod visokim tlakom in pri visoki temperaturi sušenja, zato bi se lahko sorptivne lastnosti lesa spremenile. Po mnenju Lehtikangasa (2000) se higroskopnost peletov lahko zmanjša zaradi odporne površine peletov, ki nastane pri proizvodnji peletov pri visokem tlaku. Konci peletov pa so izpostavljeni vlažnemu okolju in zato do povečanja vlage v peletu lahko pride preko obeh koncev peleta.

Znano je, da je skorja manj hidrofilna kot suh les, in sicer zaradi višje vsebnosti hidrofbnih ekstraktivov, kar naj bi pomenilo tudi manjšo adsorpcijo vode peletov narejenih iz skorje (Timell, 1986).

Kratkotrajna izpostavljenost dežju ali visoki vlažnosti lahko negativno vpliva na kakovost zgoščenih proizvodov (Kaliyan in Morey, 2009). Pri zračni vlagi med 93% in skoraj 100% peleti začnejo razpadati (Hartley in Wood, 2008). Peleti izdelani iz žaganja hrasta, bora in topola, ki so pri sobni temperaturi potopljeni v vodo, ne morejo obstati več kot 5 minut. Ko tak material pride v stik z vodo, hitro nabrekne in razpade v nekaj minutah (Li in Liu, 2000).

2.9 SKLADIŠČENJE SUROVINE IN PELETOV

Pogoji, v katerih skladiščimo surovino, lahko spremenijo kemično sestavo lesa. Predvsem naravno zorenje in sušenje surovine pri nizkih temperaturah vplivata na bolj obstojne pelete v primerjavi s tistimi, ki so narejeni iz surovine, ki je bila hitro sušena pri visokih temperaturah (Filbakk, 2011). Izpostavljenost surovine visokim temperaturam med sušenjem vpliva na kemične lastnosti in strukturo lesa (Nuopponen in sod., 2004; Lam in sod., 2011).

V raziskavi o vplivu skladiščenja je Lehtikangas (2000) ugotovil, da skladiščenje peletov negativno vpliva na mehansko obstojnost in to zlasti pri peletih, ki so bili narejeni iz svežega materiala ostankov sečnje. Analize so pokazale, da je bila v peletih, ki so bili narejeni iz svežega materiala, običajno večja adsorpcija vode kot v peletih narejeni iz skladiščene surovine, ki po določenem obdobju shranjevanja kažejo boljšo kakovost kot peleti narejeni iz sveže surovine.

Opazovanja Lehtikangasa (2000) v omenjeni raziskavi so pokazala izredno veliko rast mikrobov na peletih izdelanih iz svežih ostankov sečnje, kakor tudi na peletih iz sveže skorje. Listje in skorja so sestavni del drevesa, ki vsebujejo največ hranilnih snovi (Hakkila, 1989). Razpoložljivost hranil, predvsem dušika, pa je ključnega pomena za rast gliv (Carlile, 1995).

Na kakovost shranjene biomase vplivajo biološke, mikrobiološke in organsko-kemične reakcije surovine. Poslabšanje kakovosti biomase je po eni strani odvisno od lastnosti materiala (vsebnost vode, razpoložljivost hranil, kemična zgradba), po drugi strani pa od vrste skladiščenja (npr. velikost, zaščita kupa skladiščenja ali stiskanje kupa, kar vpliva na prezračevanje) (Assarsson, 1969).

Shranjevanje lesnih peletov se bistveno razlikuje od skladiščenja nepredelane surovine. Ena od pomembnejših razlik je nizka vsebnost vode v peletih, ki omejuje rast mikroorganizmov. V procesu peletiranja se dosegajo visoke temperature, zato je pozornost potrebno nameniti ustreznemu hlajenju in odvajanju toplote še preden peleti zapustijo proizvodni obrat, kar je pomembno predvsem za nadaljnjo skladiščenje. Postopek hlajenja zmanjša temperaturo peletov na nekaj stopinj nad sobno temperaturo in tako zmanjša vsebnost vode v peletih. Zadostno hlajenje zmanjšuje tveganje za kondenzacijo vlage in okužbo z glivami, do česar lahko pride v nepopolno hlajenih peletih (Maier, Bakker-Arkema, 1992).

Skladiščenje peletov se zaradi majhne vsebnosti vode pogosto smatra kot varno. Vendar pa so v nekaterih proizvodnih obratih opazili porast temperature v kupih skladiščenja razsutih peletov in aglomeracijo finih delcev, kar je posledica okužbe z glivami. Fini

delci so bolj higroskopni in imajo večjo relativno površino kot celi peleti. To povečuje občutljivost za okužbo z glivami in mikrobi ter posledično pripelje do porasta temperature v kupu skladiščenih peletov (Lehtikangas, 2000).

2.10 RAZVRŠČANJE LESNIH PELETOV

Skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2:2014 razvrščamo lesne pelete za neindustrijsko rabo v razrede A1, A2 in B, kot prikazuje naslednja preglednica.

Standard SIST EN 14961-2:2011 je novembra 2014 nadomestil nov standard SIST EN ISO 17225-2:2014. Nov standard se razlikuje pri kategorizaciji lesnih peletov glede na vsebnost pepela, kjer so bili prej peleti uvrščeni v razred A2 pri vsebnosti pepela $\leq 1,5\%$ in v razred B pri $\leq 3\%$, vsebnost pepela za razred A1 pa ostaja enaka. Drugače je ovrednotena tudi kurilnost, saj je v novem standardu za vse tri razrede enaka, v prej veljavnem standardu pa je bila za razred A1 vrednost $16,5 \leq Q \leq 19$, za razred A2 $16,3 \leq Q \leq 19$ in za razred B $16,0 \leq Q \leq 19$.

Preglednica 2: Razvrstitev peletov v kakovostne razrede skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2

Table 2: Specification of wood pellets in property classes in accordance with standard SIST EN ISO 17225-2

Razred, metoda analize	Enota	A1	A2	B
Izvor in vir ISO 17225-1		- Deblovina - Kemično neobdelani lesni ostanki	- Cela drevesa brez korenin - Deblovina - Sečni ostanki - Kemično neobdelani lesni ostanki	- Les iz gozda, nasadov in drug neobdelan les - Stranski proizvodi in ostanki iz lesno predelovalne industrije - Kemično neobdelan uporabljen les
Vsebnost vode, M ISO 18134-1, ISO 18134-2	w-% dostavljeno stanje	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$
Pepel, A, ISO 18134-2	w-% suho stanje	$A0,7 \leq 0,7$	$A1,2 \leq 1,2$	$A2,0 \leq 2,0$
Mehanska obstoynost, DU, ISO 17831-1	w-% dostavljeno stanje	$DU97,5 \geq 97,5$	$DU97,5 \geq 97,5$	$DU96,5 \geq 96,5$
Spodnja kurilnost, Q, ISO 18125	MJ/kg dostavljeno stanje	$Q16,5 \leq 16,5$	$Q16,5 \leq 16,5$	$Q16,5 \leq 16,5$
Gostota nasutja, BD, ISO 17828	kg/m ³ dostavljeno stanje	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$
Dušik, N, ISO 16948	w-% suho stanje	$N0,3 \leq 0,3$	$N0,5 \leq 0,5$	$N1,0 \leq 1,0$

3 MATERIAL IN METODE

3.1 PREDSTAVITEV IZBRANIH PROIZVAJALCEV LESNIH PELETOV V SLOVENIJI

Vzorčili smo pri sedmih proizvajalcih lesnih peletov v Sloveniji. Proizvajalce smo naključno poimenovali s črkami A do G, tako da smo zagotovili anonimnost posameznih proizvajalcev. Vsi proizvajalci so uporabljali slovenski les. V nadaljevanju sledi predstavitev posameznega proizvajalca lesnih peletov. V preglednici 3 so prikazane lastnosti peletirne naprave.

Preglednica 3: Osnovne karakteristike peletirne naprave pri izbranih proizvajalcih

Table 3: Basic characteristics of equipment for pelletisation of selected producers

PROIZVAJALEC, KARAKTERISTIKE	A	B	C	D	E	F	G
Moč stiskalnice	110 kW	90 kW	55 kW	110 kW	160 kW	285 kW	132 kW
Kapaciteta stiskalnice (t/h)	1	1	0,55-0,7	0,8-1,2	1,5-1,8	3	2t/h→5 stiskalnic
Dodajanje veziva	Ne	Koruzni škrob	Ne	Ne	Ne	Ne	Ne
Oblika matrice	Oblika prstana	Oblika prstana	Oblika prstana	Oblika prstana	Oblika prstana	Oblika prstana	Oblika koluta
Premer luknjic	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm
Temperatura stiskanja (°C)	80-90	70-90 (100)	?	Do 100	> 100	80-90	80
Dolžina peletov- nastavitev noža (mm)	35-45	20	20	Do 50	22-25	20	35

Podatek o moči stiskalnice smo dobili iz specifikacije naprave, vse ostale podatke o kapaciteti peletirne naprave, obliki matrice, premeru luknjic, temperaturi stiskanja in nastavitvi noža pa nam je podal proizvajalec peletov.

Proizvajalec A je v proizvodnji peletov uporabljal žaganje. Uporabljali so peletirno napravo Zepi Technologie, model Pellet mill press ZPM. V sušilniku so imeli fini mlin (slika 4), ki je zmlél žaganje na velikost delcev 5,5 mm. Pozimi so uporabljali tudi grobi mlin, ker so dodajali sekance, ker so sekanci sušeni in so tako lažje zagotovili primerno vsebnost vode surovine. Žaganje so posušili, tako da je bila vsebnost vode od 8 % do

12 %, nato je šlo žaganje naprej v proizvodnjo peletov. Material se je sušil na temperaturi med 80 in 90 °C. Spomladi 2014 so zamenjali valja ob peletirni matrici, ravno malo pred našim vzorčenjem 2.4.2014. V peletirni napravi sta 2 valja, ki potiskata material skozi matrico. Ker se po določenem času valji obrabijo, se ne morejo več dovolj približati matrici, kar vpliva na dolžino peletov, ki so krajši. Po njihovem mnenju bi to lahko vplivalo na mehansko obstojnost.



Slika 4: Objekt s sušilno napravo in mlinom pri proizvajalcu A

Figure 4: The building with a drying system and mill at the producer A

Proizvajalec B je imel peletirno napravo italijanskega proizvajalca N-MIDI, proizvedeno leta 2013, z močjo 90 kW. Pri proizvodnji peletov so dodajali vodo v obliki razpršene megle. Na 8 ton žaganja so dodali 60 kg koruznega škroba (približno 0,75 %). Škrob so k žaganju dodali pred finim mletjem, da se je surovina še homogenizirala. Temperatura stiskanja je bila med 70 in 90 °C, le pri večji obremenitvi peletirne naprave je dosegla temperatura 100 °C. Nastavitev noža za dolžino peletov je bila 20 mm. Pred tretjim vzorčenjem so zamenjali matrico. Po menjavi matrice so peleti delovali, kot bi bili malo ožgani. Prišlo je do prevelikega trenja v matrici, kar se je videlo po večji porabi elektrike. Peleti so imeli sicer običajno dolžino. Zaradi omenjenega problema so dodajali več koruznega škroba, ki deluje tudi kot mazivo. Vendar pa so bili v tem primeru peleti prekratki, sklepali so tudi, da je slabša mehanska obstojnost, čeprav naj bi načeloma škrob mehansko obstojnost izboljšal. Kljub temu, da so dodajali več koruznega škroba (3 %), pa se je po porabi elektrike še vedno videlo, da je trenje preveliko. Problem so poizkušali rešiti tudi s spreminjanjem nastavitev (npr. valji bližje ali bolj daleč od matrice), vendar rešitve niso bile uspešne.

Tudi pri proizvajalcu C so imeli peletirno napravo italijanskega proizvajalca N-MIDI, proizvedeno leta 2012, z močjo 55 kW, ki je prikazana na sliki 5 (N-Midi, 2015). Med

prvim in drugim vzorčenjem je bila edina razlika, da je bila pri drugem vzorčenju matrica peletirne naprave že bolj izrabljena. Nož v peletirni napravi je bil nastavljen, da odreže pelete na dolžini 20 mm.



Slika 5: Peletirna naprava N-Midi, kot jo imata proizvajalca B in C

Figure 5: Equipment for pelletisation at producers B and C

Proizvajalec D pri proizvodnji peletov vode ni dodajal. Pri stiskanju so dosegli temperaturo do 100 °C. Nož za rezanje peletov je bil nastavljen na 50 mm dolžine, vendar lahko nož odreže pri različni dolžini peleta, kar je odvisno od vrtilne hitrosti matrice.

Proizvajalec E je pri proizvodnji peletov dodal od 25 do 30 litrov vode na uro. Imeli so nizkotemperaturno sušilnico. Matrico so vzdrževali približno na 3 tedne - so jo obnovili ali pa zamenjali. Po prvem vzorčenju so spomladi z nastavitvami peletirne naprave želeli izboljšati mehansko obstojnost. Najprej so matrico zamenjali z obnovljeno, potem pa še z novo matrico ter z novimi valjčki, uporabljati pa so začeli tudi bolj suho vhodno surovino. Pri drugem vzorčenju so matrico zamenjali pred enim mesecem.

Proizvajalec F pri proizvodnji vode ni dodajal. Vsebnost vode v vstopni surovini se je kontrolirala na 3 do 4 minute in se je glede na vrednost potem reguliralo sušenje. Temperatura sušenja je bila okoli 440 °C, čas sušenja pa 3 do 4 sekunde. Sušili so z zrakom. Po besedah proizvajalca so bili peleti zaradi visoke temperature sušenja tudi temnejše barve. Pri drugem vzorčenju so imeli novo peletirno napravo z drugačno konstrukcijo, tudi matrica je bila narejena po naročilu. Na eni matrici so naredili maksimalno 1200 ton peletov, ponavadi pa med 700 in 900 ton peletov, potem so matrico zamenjali.

Proizvajalec G je imel 5 peletirnih naprav. Glavna sezona proizvodnje peletov je poleti. Pri proizvodnji so dodajali vodo. Voda je služila za kondicioniranje surovine in je bila vključena v dozirno napravo. Ker je poleti proizvodnja peletov večja, se je več vode dodalo poleti. Dodajali so vodo, ki jo pridobijo iz procesa čiščenja dimnih plinov. Ta voda je vsebovala prašne delce, ki imajo lignin. Po mnenju proizvajalca naj bi ta voda tudi zaradi vsebnosti lignina pripomogla k boljši mehanski obstojnosti.

3.2 NAČIN ODVZEMA SUROVINE IN PELETOV

Za vzorčenje surovine in peletov obstaja standardna metoda SIST EN 14778:2011 Trdna biogoriva - Vzorčenje. Osnovni namen pravilnega vzorčenja je zagotoviti reprezentativen vzorec celotne količine. V standardu so natančno predpisane metode glede na vrsto materiala (sekanci, žaganje, peleti,...) in različna odvzemna mesta (tekoči trak, deponija, kamin,...). S tem je povezana tudi določena oprema za vzorčenje. Glede na odvzemno mesto in količino vzorčenega biogoriva se določi tudi število in velikost podvzorcev, ki jih moramo odvzeti.

Kljub natančno predpisanim kriterijem za vzorčenje, pa nismo vzorčili skladno s standardno metodo. Želeli smo namreč zagotoviti, da bo odvzet vzorec surovine čim bolj predstavljal pelete, ki naj bi v proizvodni nastali iz te surovine. Pri proizvajalcu A smo surovino sprva vzorčili s kupa na deponiji, vendar se je pokazalo, da tako ne moramo zagotoviti, da so peleti nato narejeni iz enake mešanice surovine. Tako smo potem pri nadaljnjih vzorčenjih tudi pri ostalih proizvajalcih poskušali surovino odvzeti čim bližje mesta peletiranja oziroma kar iz same peletirne naprave (slika 6). Tako ni nujno, da je bil vzorec surovine oziroma peletov reprezentativen za celotno količino. Pelete smo v večini primerov odvezemali s proizvodnega traku takoj po pakiranju v vreče. Količina peletov, ki smo jih vzeli pri posameznem vzorčenju, je bila tako okoli 15 kg. Surovine smo odvezeli približno polovico manj. Kjer je proizvodni proces to dopuščal, smo po odvzemu surovine počakali potreben čas, da so potem iz približno take surovine nastali tudi peleti, ki smo jih vključili v vzorec.



Slika 6: Peletirna naprava in odvzem vzorca peletov na koncu proizvodnega traku

Figure 6: Pelletising machine and sampling pellets at the end of production

Pri vsakem izbranem proizvajalcu smo odvzeli vzorec vhodne surovine in pelete iz iste surovine ali pa smo odvzeli le vzorec peletov. Pri vsakem proizvajalcu smo vzorčili vsaj dvakrat.

3.3 IZVOR IN VRSTA SUROVINE ZA PELETE

Pri vsakemu proizvajalcu smo se pozanimali, katere lesne vrste uporabljajo ter kakšno je njihovo razmerje v proizvodni. Zanimalo nas je tudi, v kakšni obliki je bil uporabljen les (žaganje, skobljanci, sekanci,...).

3.3.1 Proizvajalec A

Pri proizvajalcu A smo vzorce peletov in surovine odvzeli največkrat. Kakovost peletov in surovine smo spremljali eno leto in sicer od oktobra 2013 do oktobra 2014. Odvzeli smo 20 vzorcev peletov in 19 vzorcev surovine. V proizvodnji peletov so uporabljali žaganje, pozimi pa so dodajali tudi sekance. Sekanci so bili že sušeni in tako so pozimi lažje zagotovili primerno vsebnost vode v surovini. Deponiji sekancev in žaganja sta prikazani na sliki 7. V večini primerov je pelete sestavljalo okoli 80 % smreke in 20 % listavcev. V največji meri so material prejeli že v obliki žaganja. Uporabljali so les, ki je imel odstranjeno skorjo. Listavce je predstavljala predvsem bukev, lahko pa tudi hrast, javor, češnja. Pri enem vzorcu je bil lesu pred finim mletjem primešan tudi koruzni škrob. Pri določeni seriji vzorcev enake surovine je proizvajalec spreminjal vsebnost vode v surovini (8 %, 10 %, 12 %) in ugotavljali smo, če vsebnost vode v surovini vpliva na mehansko obstojnost peletov (Test 39-42).



Slika 7: Deponija s sekanci in pokrita deponija z žaganjem pri proizvajalcu A

Figure 7: Stored woodchips and covered storehouse with sawdust

3.3.2 Proizvajalec B

Pri proizvajalcu B smo vzorčili trikrat. Dvakrat smo vzorčili februarja 2014 in enkrat oktobra 2014. Tako smo pridobili 3 vzorce surovine in 3 vzorce peletov. Njihovo surovino je sestavljala smreka, h kateri so pred finim mletjem dodajali še koruzni škrob. Pri prvih dveh vzorčenjih so vzorci peletov vsebovali okoli 0,75 % škroba, pri zadnjem vzorčenju pa okoli 3 %.

3.3.3 Proizvajalec C

Pri proizvajalcu C smo vzorčili dvakrat in sicer februarja in oktobra 2014. Dobili smo 2 vzorca peletov in 2 vzorca surovine. Njihova surovina je bila sestavljena izključno iz smreke. Material je bil v obliki skobljancev, sekancev in žaganja. Uporabili so okoli 50 % skobljancev, 30 % sekancev in 20 % žaganja, ki so jih v peletnici zmleli še v finem mlinu.

3.3.4 Proizvajalec D

Pri proizvajalcu D smo vzorčili dvakrat, februarja in novembra 2014. Odvzeli smo 2 vzorca peletov in 2 vzorca surovine. V prvem primeru je surovino po oceni proizvajalca sestavljalo 95 % smreke in 5 % bukve, hrasta in bora. Pri drugem vzorčenju pa je bila surovina sestavljena iz okoli 90 % smreke in 10 % bukve.

3.3.5 Proizvajalec E

Tudi pri proizvajalcu E smo vzorčili dvakrat in sicer februarja in novembra 2014. Odvzeli smo 2 vzorca peletov in 2 vzorca surovine. Pri prvem vzorčenju je surovino po podatkih proizvajalca predstavljalo 30 % smreke in 70 % listavcev, od tega 50 % bukke in 20 % jesena ter hrasta. Medtem ko je bila pri drugem vzorčenju surovina sestavljena iz 30 % smreke, 50 % bukke in 20 % hrasta in gabra. Vedno so imeli razmerje med listavci in iglavci oziroma smreko 7:3.

3.3.6 Proizvajalec F

Pri proizvajalcu F smo vzorčili dvakrat, februarja in novembra 2014 in tako odvzeli 2 vzorca peletov in 2 vzorca surovine. V prvem primeru je po proizvajalčevi oceni surovino sestavljalo 70 % smreke in 30 % listavcev (večina je bukev in približno 1% hrasta in 1 % akacije), v drugem primeru pa 90 % smreke in 10 % bukke.

3.3.7 Proizvajalec G

Pri proizvajalcu G smo se oglasili trikrat in pri tretjem obisku odvzeli štiri različne vzorce peletov, surovine pa takrat nismo vzorčili. Tako smo pri vseh vzorčenjih dobili 2 vzorca surovine in 6 vzorcev peletov. Pri prvem vzorčenju surovine za sejnalno analizo nismo dobili, ker zaradi tehnološkega procesa surovine po finem mletju nismo mogli odvzeti. Surovino je sestavljala predvsem jelka, nekaj smreke in okoli 2-3 % bukke. Pri proizvodnji peletov so uporabljali skobljance (8-20 %), ki so bili že posušeni in brez skorje, zato so bili bolj kakovostni. Ostali material so bili sekanci in žaganje, kjer skorja ni bila odstranjena. V proizvodnji so vso surovino še enkrat zmeli v finem mlinu.

3.4 PRIPRAVA VZORCEV

Vzorci vhodne surovine in peletov smo na mestu vzorčenja shranili v PVC vreče in jih označili. Surovino smo analizirali v Laboratoriju za goriva Energetika Ljubljana, d.o.o. (v nadaljevanju Laboratorij za goriva), vzorec peletov pa smo razdelili – približno petino vzorca smo analizirali v Laboratoriju za goriva, na ostalih štirih petinah vzorca pa so bile analize narejene v laboratoriju Gozdarskega inštituta Slovenije. V Laboratoriju za goriva smo v peletih določali vsebnost vode in pepela, kurilnost, elementno sestavo (C, H in N), na surovini pa smo poleg tega določili tudi masno porazdelitev velikosti delcev. Laboratorij za goriva ima podeljeno akreditacijsko listino LP-011 izdano s strani Slovenske akreditacije za področje preskušanja trdnih biogoriv

skladno s sistemom kakovosti SIST EN ISO/IEC 17025. V laboratoriju Gozdarskega inštituta Slovenije smo določili mehansko obstojnost in gostoto nasutja.

V Laboratoriju za goriva smo vzorce pripravili skladno s standardno referenčno metodo SIST EN 14780:2011 Trdna biogoriva - Priprava vzorcev.

Osnovni princip priprave je temeljil na mehanski obdelavi in redukciji dostavljenega vzorca in sicer na način, da je ostal podvzorec po kemičnih in fizikalnih lastnostih enak dostavljenemu vzorcu.

Vzorec smo najprej dobro premešali. V primeru, da smo na vzorcu delali tudi sejhalno analizo, smo ga nekaj odvzeli ter shranili za sejhalno analizo. Naključno smo odvzeli še med 300 in 800 g vzorca za določanje vsebnosti vode.

Preostali vzorec smo zmeli v mlinu Pulverisette-25 (slika 8) z mrežico 10 mm. Mlin Pulverisette-25 je namenjen za grobo mletje mehkih, srednje trdih in vlaknastih materialov granulacije pod 120 mm. Mlin je imel volumen mletja do 2 litra trdnih biogoriv naenkrat in je bil sestavljen iz motorja v ohišju, poševnega kanala za vzorec, rezila, mreže sita granulacije 10 mm ali 2 mm in posode, kamor so padla zmleta trdna biogoriva.



Slika 8: Mletje vzorca peletov na grobem mlinu Pulverisette-25

Figure 8: The coarse mill Pulverisette-25 milling pellets

Iz celotne količine mehansko obdelanega in homogeniziranega vzorca smo naključno odvzeli še 300 do 600 g materiala (podvzorec) za pripravo analitskega vzorca. Na analitskem vzorcu smo določali vsebnost pepela, kurilnost in elementno sestavo trdnega biogoriva.

Predhodno sušenje vzorca je bilo potrebno tam, kjer bi vsebnost vode ovirala nadaljnje postopke priprave vzorca. Vzorce surovine smo sušili le pri prvih treh vzorčenjih pri proizvajalcu A, kjer smo surovino odvzeli iz deponije in še ni bila sušena. Sušenje pri ostalih vzorcih pa ni bilo potrebno, ker smo vzorčili že sušeno surovino, pri peletih pa je vsebnost vode že tako okoli 10 %. Pri sušenju smo na pladenj zatehtali od 300 do 600 g podvzorca. Podvzorce smo sušili v sušilni komori Ehret 4418, ki je bila termostatisirana na 30 °C, pladenj z vzorcem pa smo sušili 18 ur. Po 18 urah smo pladenj z vzorcem termostatirali v laboratorijskih pogojih eno uro.

Podvzorec (predhodno sušen ali nesušen) smo nato zmleli v grobem mlinu Pulverisette-25 z mrežico 2 mm. Količino vzorca smo zmanjšali na volumen okoli 100 ml s pomočjo električnega rotacijskega kvartirnika Laborette-27. Kvartirnik smo uporabili, da smo se izognili subjektivni napaki. Aparat je imel vrtljivo ročico, na kateri je bilo privitih 8 steklenih prahovk in lijak. Vzorec smo v celoti pretresli v lijak in tako se je vzorec enakomerno razdelil v vse prahovke. Eno prahovko smo pretresli v posodo z diski in na finem mlinu Pulverisette-9 (slika 9) zmleli, vsebino ostalih prahovk pa smo zavrgli.

Pulverisette-9 je mlin za fino mletje premoga, žlindre, trdnega biogoriva, rude in mineralov granulacije pod 12 mm. Volumen mletja je bil od 50 do 250 ml, odvisno od mletega materiala. Sestavljen je bil iz vibracijske pokrite komore, kamor smo vstavili posodo z diskastimi cilindri, ki so se s pomočjo vibracije vrteli in material se je zmlel. V posodo smo vstavili vse 3 diske, nato pa med prostorčke enakomerno porazdelili od 50 do 100 ml vzorca iz kvartirnika Laborette-27. Posodo smo pokrili s pokrovom, vstavili v zareze v komori in fiksirali z ročico. Komoro smo pokrili s pokrovom in nastavili čas mletja 2 minuti. Ko je bilo mletje končano, smo lahko odprli pokrov komore ter odstranili posodo z vzorcem. Na ta način smo pripravili analitski vzorec.



Slika 9: Mletje vzorca na diskastem finem mlinu Pulverisette-9

Figure 9: Milling the sample at fine disc mill Pulverisette-9

Zmlet analitski vzorec (50-100 g) granulacije pod 1mm smo shranili v stekleno prahovko, opremili z zaporedno številko in tako je bil vzorec pripravljen za nadaljnjo analizo.

3.5 METODE RAZISKOVANJA IN ANALIZIRANJA

Z metodami, ki smo jih uporabili pri našem delu, smo v peletih in surovini določali:

- delež lesnih vrst,
- vsebnost vode,
- vsebnost pepela,
- kurilnost,
- vsebnost ogljika, vodika in dušika,
- porazdelitev velikosti delcev,
- mehansko obstojnost,
- gosototo nasutja.

V nadaljevanju smo posamezne metode predstavili.

3.5.1 Določanje vsebnosti vode v surovini in peletih

Vsebnost vode v surovini in peletih smo določali skladno z referenčno metodo SIST EN 14774-1:2010 Trdna biogoriva - Metode določevanja vlage - Metode sušenja v peči - 1.del: Celotna vlaga - Referenčna metoda. Osnovni princip metode je bil sušenje vzorca v sušilniku Ehret TK/L (slika 10) na 105 °C v zračni atmosferi do konstantne mase. Sušilnik je deloval v območju od 5 °C nad sobno temperaturo do 300 °C, delovna moč motorja je bila 7600 W. Vzorce smo tehtali na tehtnici Radwag APP/C/2, ki je delovala v območju od (5 do 25000 ± 0,1) g, tehtalna plošča je merila (270 x 360) mm.



Slika 10: Sušenje vzorca peletov na 105 °C v sušilniku Ehret TK/L

Figure 10: Drying the sample of pellets in drying chamber Ehret TK/L at 105 °C

Delež vsebnosti vode smo preračunali iz izgube mase vzorca. Tehtali smo tudi referenčni pladenj pred in po sušenju. Tako smo pri preračunu vključili tudi korekcijo zaradi vzgona. Dimenzija pladnja je bila (600 x 500 x 25) mm. Masa vzorca, v katerem smo določali vsebnost vode, je morala znašati med 300 g in 800 g. Pri pripravi vzorca smo morali preprečiti izgubo vode.

Uporabljali smo računalniški program E-vlaga, kjer so se nam zatehte avtomatsko zabeležile. Referenčni pladenj smo položili na tehtnico in zatehto potrdili s tipko "Print". Shranila se je masa pladnja pred sušenjem. Nato smo stehali prvi prazen pladenj. Vzorec smo enakomerno razporedili po pladnju. Debelina sloja ni smela presegati 1 cm. Potrdili smo zatehto in shranila se je masa pladnja in vzorca pred sušenjem. Referenčni pladenj in pladnje z vzorci smo sušili 5 ur na 105 °C. Po sušenju smo referenčni pladenj vzeli iz sušilnika in ga stehali v 10-15 sekundah. Nadaljevali smo s tehtanjem pladnjev z vzorci, ki smo jih ravno tako morali stehati v 10-15 sekundah, da smo se izognili adsorpciji vlage. Program je izračunal in izpisal vsebnost vode v vzorcu.

Vsebnost vode smo izračunali po enačbi (6):

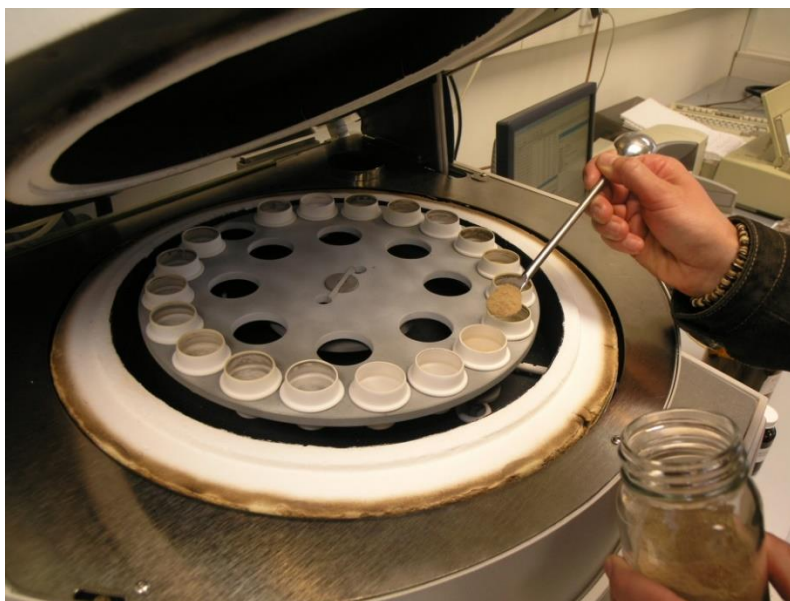
$$w(\%) = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad [\%] \quad \dots (6)$$

m_1	masa praznega pladnja (g)
m_2	masa pladnja in vzorca pred sušenjem (g)
m_3	masa pladnja in vzorca po sušenju (g)
m_4	masa referenčnega pladnja pred sušenjem (g)
m_5	masa referenčnega pladnja po sušenju (g)

3.5.2 Določanje vsebnosti pepela

Vsebnost pepela smo določali v surovini in peletih skladno z referenčno metodo SIST EN 14775:2010 Trdna biogoriva - Metoda določevanja pepela. Vsebnost pepela smo analizirali v termogravimetričnem analizatorju TGA-701 (slika 11). Instrument je bil sestavljen iz peči, kjer smo lahko vzporedno analizirali 19 vzorcev, tehtnice z resolucijo $\pm 0,0001$ g in računalnika, ki nam je rezultate primerno ovrednotil. Instrument je omogočal pretok plinov od 2,5 do 3,5 litrov na minuto. Maksimalna temperatura peči je bila (1000 ± 2) °C. Instrument je meril izgubo mase v odvisnosti od temperature v kontrolirani atmosferi. Vsebnost pepela smo določali v kisikovi atmosferi pri končni temperaturi 550 °C. Uporabljali smo kisik s čistoto 99,5 % in tlakom 2,4 bara. Konstantna masa pepela je bila dosežena, ko je bila razlika v masi med zaporednima tehtanjema manjša od 0,05 %. Po končani analizi vsebnosti pepela se je peč pričela ohlajati in se je avtomatsko odprla. Rezultati analize so se na ekran izpisovali sproti ves čas analize. Merili smo analitsko pripravljen vzorec, meritve smo izvajali v paralelkah.

Standard za določanje vsebnosti pepela predpisuje mejno vrednost za obnovljivost med dvema meritvama 0,3 % absolutno. Obnovljivost je definirana kot srednja vrednost paralelke meritve, ki smo jo določili v dveh različnih laboratorijih na reprezentativnem delu vzetem iz istega osnovnega analitskega vzorca. To dovoljeno odstopanje pri obnovljivosti smo vzeli tudi kot mejno vrednost pri primerjavi vsebnosti pepela v surovini in peletih narejenih iz te surovine.



Slika 11: Določanje vsebnosti pepela v termogravimetričnem analizatorju TGA-701

Figure 11: Determination of ash content in termogravimetric analyzer TGA-701

Enačba za izračun vsebnosti pepela v suhem stanju materiala (7) je bila sledeča:

$$pepel_{bv} = pepel_{analitski} * \frac{100}{100 - w_{an}} \quad [\%] \quad \dots (7)$$

$pepel_{bv}$	vsebnost pepela na brezvodno stanje (%)
$pepel_{analitski}$	vsebnost pepela v analitskem vzorcu (%)
w_{an}	vsebnost vode v analitskem vzorcu (%)

3.5.3 Določanje kurilnosti

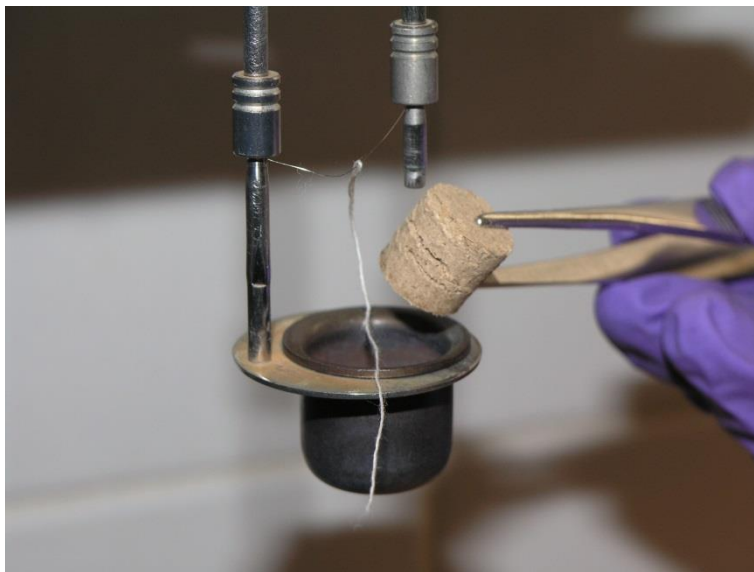
Kurilnost surovine in peletov smo določali skladno z metodo SIST EN 14918:2010 Trdna biogoriva - Metoda za ugotavljanje kalorične vrednosti. Za določanje kurilnosti smo uporabili kalorimetra IKA C-4000 (starejši model) in C-5000 (novejši model). Bombni kalorimeter se je uporabljal za merjenje toplote, ki se sprosti pri sežigu vzorca v zaprti posodi (bombi) obdani z vodo pri nadzorovanih pogojih.

Za tehtanje vzorca smo uporabili tehtnico Sartorius CPA64-0CE. Delovala je v območju od 0 g do 64 g ± 0,0001 g. Tehtalna plošča je imela premer 80 mm.

Potek določanja kurilnosti pri IKI C-4000 in IKI C-5000 se je nekoliko razlikoval. Pri IKI C-4000 smo vzpostavili hlajenje aparata z vodovodno vodo s pretokom 2 litra na minuto. IKA C-5000 je imela zaprt sistem hlajenja. Na delo obeh kalorimetrov je vplivala temperatura okolja, zato ta ni smela preseči 25 °C. Pri IKI C-4000 smo potrebovali tudi polnilno postajo Waterstation-57, preko katere smo z vodo, termostatisirano na 25 °C, napolnili notranjo posodo z določenim volumnom. IKA C-5000 je imela polnjenje s termostatisirano vodo vključeno v sam instrument.

Preskušali smo analitsko pripravljen vzorec. S pomočjo preše smo pripravili briket z maso od 0,5 g do 1,5 g. Vzorec smo zatehtali v lonček iz nerjavečega jekla (slika 12). Bombo smo napolnili s 5 ml demineralizirane vode, lonček z briketom smo vstavili v nosilec bombe ter briket povezali z žičko in bombažno vrvico ter bombo zaprli. Namestili smo jo v posodo kalorimetra (notranja posoda), ki je bila napolnjena z vodo in obdana z adiabatnim plaščem (zunanja posoda). Bomba se je napolnila s 30 bari kisika s čistoto 99,98 %. Pri starejšem modelu smo bombo napolnili ročno s polnilno postajo C-48, pri novejšem modelu kalorimetra pa se je bomba napolnila v instrumentu. V posodo z vodo je bil potopljen občutljiv termometer. Voda je bila konstantno mešana z električnim mešalom, da se je preprečila napaka temperaturne razlike okolice. Ko sta se temperatura vode v notranji posodi in temperatura bombe izenačili, se je vzorec s pomočjo vžigalnega sistema vžgal in zgorel. Popolno zgorevanje smo dosegli s prebitkom kisika. Pri izgorevanju se je lahko temperatura v lončku dvignila na 1000 °C in tlak za nekaj milisekund narasel na približno 200 barov. Pri takih pogojih so zgorele

in oksidirale vse organske snovi, celo anorganski del goriva je do neke mere oksidiral. Sproščena toplota se je prenašala v vodo notranje posode, zato je temperatura vode porasla. Sistem je deloval pod adiabatnimi pogoji, kar je pomenilo, da toplotne izmenjave z okolico ni bilo. Izolacija sistema je morala biti torej čim bolj popolna, vpliv okolja je moral biti čim manjši, kar se je zagotavljalo z ustrezno klimatizacijo prostora, ki je bila med 20 in 25 °C. Test je bil končan 5 do 10 minut po vžigu, ko sta se temperaturi bombe in vode zopet izenačili. Izmerjena temperaturna razlika pred in po zažigu nam je služila za izračun toplotne vrednosti vzorca H_0 . Pri izračunu je bilo potrebno upoštevati toplotno kapaciteto oziroma vodno vrednost sistema. To smo določili s kalibracijo s standardnim referenčnim materialom benzojske kisline (NIST SRM 39j) z znano toplotno vrednostjo 26434 J/g, če smo tehtali v vakuumu in dodanem 1 ml demineralizirane vode v bombo. Pri tehtanju na zraku je bila toplotna vrednost 26453 J/g in pri dodanih 5 ml demineralizirane vode v bombo je bila toplotna vrednost 26464 J/g. Upoštevali smo zadnjo vrednost. Za izračun kurilnosti smo potrebovali še podatke o vsebnosti pepela in analitske vlage, ki smo jih določili na termogravimetričnem analizatorju TGA-701 ter vsebnosti C, H in N, ki smo jih izmerili z elementnim analizatorjem Leco TruSpec CHN.



Slika 12: Določanje kurilnosti – briket namestimo v lonček

Figure 12: Determination of calorific value – putting the briket into the crucible

Pri naših vzorcih smo podajali zgornjo in spodnjo kurilnost preračunano na suho stanje in spodnjo kurilnost preračunano na dostavljeno stanje. Meritve smo izvajali v paralelkah.

Zgornja kurilnost je bila določena pri konstantnem volumnu. Ko je gorivo v kalorimetrski bombi zgorelo, se je sprostila energija. Zaradi konstantnega volumna

kalorimetske bombe, je voda, ki jo je gorivo vsebovalo, kondenzirala, pri tem pa se je sprostila dodatna toplota. Zaradi tega je bila ta kurilnost višja.

Spodnja kurilnost podana na dostavljeno stanje je kurilnost, ki je bila določena pri konstantnem tlaku, kakršno stanje imamo tudi v pečeh, kotlih,... S pomočjo dogovorjenih enačb smo jo preračunali iz zgornje kurilnosti, ki je bila določena na analitskem vzorcu.

Zgornja kurilnost podana na analitsko stanje je bila izvedena na analitskem vzorcu, ki je bil predhodno posušen na zraku ali v sušilni peči pri 30-45 °C - odstranjena je bila prosta voda, v vzorcu pa je ostala še vezana voda, ki pa smo jo lahko odstranili s segrevanjem pri 105 °C. V analitiki določamo to vrednost, potem pa smo izvedli vse preračune z upoštevanjem vseh vplivnih faktorjev (vsebnost proste vode, pepela, žvepla, dušika, vodika).

Standard za določanje kurilnosti predpisuje dovoljeno odstopanje pri obnovljivosti 300 kJ/kg. Obnovljivost je definirana kot dovoljeno odstopanje pri dveh meritvah kurilnosti narejenih v dveh različnih laboratorijih na reprezentativnem delu iz istega osnovnega vzorca. To mejno vrednost za obnovljivost smo vzeli tudi kot mejno vrednost pri primerjavi kurilnosti v surovini in peletih narejenih iz te surovine.

Enačbe (8-12) za preračun kurilnosti na različna stanja:

$$H_{zg-an} = \frac{V_v \cdot \Delta T - Q_{žica, nitka} - Q_i - Q_{N,S}}{m} \quad [\text{kJ/kg}] \quad \dots (8)$$

$$H_{zg-bv} = H_{zg-an} \cdot \frac{100}{100 - w_{an}} \quad [\text{kJ/kg}] \quad \dots (9)$$

$$H_{sp-bv} = H_{zg-bv} + 6,15 \cdot H_{bv}(\%) - 0,8 \cdot (O_{bv}(\%) + N_{bv}(\%)) - 218,3 \cdot H_{bv}(\%) \quad [\text{kJ/kg}] \quad \dots (10)$$

$$H_{sp-ds} = H_{sp-bv} \cdot \frac{100 - w(\%)}{100} \cdot 24,43 \cdot w(\%) \quad [\text{kJ/kg}] \quad \dots (11)$$

$$Q_{N,S} = 94,1 \cdot S_{bv} \cdot m + 42,96 \cdot N_{bv} \cdot m \quad [\text{J}] \quad \dots (12)$$

H_{zg-an}	zgornja kurilnost v analitskem vzorcu (kJ/kg)
H_{zg-bv}	zgornja kurilnost preračunana na brezvodno stanje (kJ/kg)
H_{sp-bv}	spodnja kurilnost preračunana na brezvodno stanje (kJ/kg)
H_{sp-ds}	spodnja kurilnost preračunana na dostavljeno stanje (kJ/kg)
V_v	vodna vrednost (J/K)
ΔT	sprememba temperature (°C)
$Q_{žica, nitka}$	napačne kalorije zaradi vžiga žičke in bombažne nitke (J)
Q_i	napačne kalorije zaradi vžiga (J)

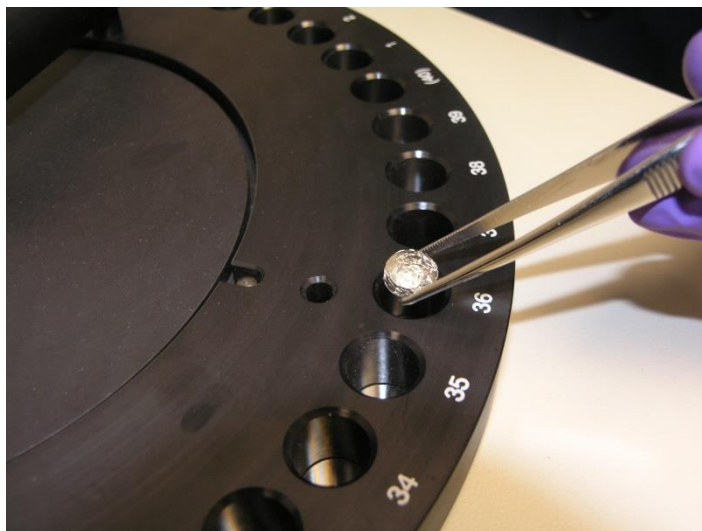
$Q_{N,S}$	napačne kalorije zaradi pretvorbe dušikove in žveplove kisline v NO_2 in SO_2 (J)
H_{bv}	vsebnost vodika v brezvodnem stanju (%)
N_{bv}	vsebnost dušika v brezvodnem stanju (%)
O_{bv}	vsebnost kisika v brezvodnem stanju (%)
S_{bv}	vsebnost žvepla v brezvodnem stanju (%)
m	masa vzorca (g)
$w(\%)$	vsebnost vode v dostavljenem vzorcu (%)
w_{an}	vsebnost vode v analitskem vzorcu (%)

3.5.4 Določanje vsebnosti ogljika, vodika in dušika

Za potrebe izračuna kurilnosti smo morali določiti tudi elementno sestavo vzorca surovine in peletov. Delež ogljika, vodika in dušika smo določali na elementnem analizatorju TruSpec Micro CHN skladno s standardno metodo SIST EN 15104:2011 Trdna biogoriva - Določevanje celotnega ogljika, vodika in dušika - Instrumentalne metode oziroma skladno s standardno metodo SIST EN ISO 16948, ki je prišla v veljavo maja 2015. Stara in nova standardna metoda se pri določanju vsebnosti C, H in N ne razlikujeta. TruSpec Micro CHN je bil instrument zasnovan za določanje vsebnosti ogljika, vodika in dušika v homogenem organskem materialu. Metoda detekcije za C in H je bila infrardeča absorpcija, N pa se je določal s toplotno prevodnostjo plina. Za analize smo uporabljali kisik in helij, oba s čistoto 99,99 %.

Analitsko pripravljene vzorce smo pred analizo sušili v sušilniku EHRET TK/L 4105 dve uri na 106 °C. Nato smo jih prestavili v eksikator in počakali, da so se ohladili na sobno temperaturo. Uporabili smo tehtnico Sartorius CPA 64-OCE, ki je delovala v območju od 0 g do 64 g $\pm$ 0,0001 g. V folijo smo zatehtali približno 0,1 g vzorca in folijo zavili. V folijo zaviti vzorec smo vstavili v avtomatski podajalnik (slika 13), od koder je padel v primarni del cevne peči, ki je bila ogreta na 950 °C, kjer je v toku kisika zgorel. Dokončna oksidacija in stabilizacija produktov gorenja je potekla ob prehodu dimnih plinov skozi sekundarni del cevne peči, ki je bila ogreta na 850 °C, kjer so se iz dimnih plinov odstranili še neželeni produkti izgoravanja: prašni delci, žveplov dioksid in halogenidi. Dimni plini, ki so vsebovali še CO_2 , NO_x , H_2O in O_2 , so se nato zbrali v posodi z znanim volumnom (ballast bank), kjer so se dokončno homogenizirali. Iz posode so se vodili skozi IR detektorski sistem, kjer se je ogljik določal kot CO_2 , vodik pa kot vodna para. Del dimnih plinov se je vodil v alikvotni krogotok, kjer se je kot nosilni plin uporabil helij. V alikvotnem krogotoku so se iz dimnih plinov najprej odstranili CO_2 , H_2O in kisik, NO_x se je reduciral v N_2 . Dušik se je nato določil v TCD (thermal conductivity) detektorju na podlagi razlike med termično prevodnostjo mešanice dušik- helij in termično prevodnostjo čistega helija. Meritve smo izvajali v paralelkah.

Standard za določanje vsebnosti C, H in N predpisuje mejno vrednost za obnovljivost med dvema meritvama dušika 0,11 % absolutno. Predpisano dovoljeno odstopanje pri obnovljivosti za meritev vsebnosti dušika smo vzeli tudi kot mejno vrednost pri primerjavi vsebnosti dušika v surovini in peletih narejenih iz te surovine.



Slika 13: V folijo zaviti vzorec vstavimo v avtomatski podajalnik elementnega analizatorja TruSpec Micro CHN

Figure 13: Wrapped sample in automatic feeder of elemental analyzer TruSpec Micro CHN

Enačba za izračun vsebnosti ogljika na brezvodno stanje materiala (13):

$$C_{bv} = C_{an} \cdot \frac{100}{100 - w_{an}} \quad [\%] \quad \dots (13)$$

Enačba za izračun vsebnosti vodika na brezvodno stanje materiala (14):

$$H_{bv} = \left(H_{an} - \frac{w_{an}}{8,937} \right) \cdot \frac{100}{100 - w_{an}} \quad [\%] \quad \dots (14)$$

Enačba za izračun vsebnosti dušika na brezvodno stanje materiala (15):

$$N_{bv} = N_{an} \cdot \frac{100}{100 - w_{an}} \quad [\%] \quad \dots (15)$$

C, H, N	ogljik, vodik, dušik (%)
bv	brezvodno stanje
an	analitsko stanje
w _{an}	vsebnost vode v analitskem stanju (%)

3.5.5 Določanje porazdelitve velikosti delcev

Surovini, ki jo je proizvajalec pred proizvodnjo peletov zmel, smo določali porazdelitev velikosti delcev skladno s standardoma SIST EN 15149-1:2011 Trdna biogoriva - Določevanje porazdelitve velikosti delcev - 1. del: Nihalna zaslonka metoda z uporabo sita z odprtinami 1 mm in več ter SIST EN 15149-2:2011 Trdna biogoriva - Določevanje porazdelitve velikosti delcev – 2. Del: Vibracijska zaslonka metoda z uporabo sita z odprtinami 3,15 mm in manj. Prvi standard zahteva sejanje skozi horizontalno nihajoča sita z velikostjo odprtin najmanj 1 mm in minimalno površino sita 1200 cm². Drugi standard zahteva sejanje skozi vibrirajoča sita z velikostjo odprtin največ 3,15 mm in minimalno površino sita 250 cm². Uporabljali smo sita proizvajalca Fritsch in tehniko Radwag APP/C/2, ki je delovala v območju od (5 do 25000 ± 0,1) g.



Slika 14: Sejalnik Fritsch - Analysette – 18

Figure 14: Sieving equipment - Analysette – 18

Določali smo masni delež delcev, ki so ostali na sitih proizvajalca Fritsch z velikostmi odprtin 3,15 mm, 2,36 mm, 2 mm, 1 mm, 850 µm, 500 µm, 250 µm, 200 µm, 125 µm in v zbirni posodi. Za določanje masnega deleža delcev 3,15 mm in 1 mm smo uporabili sejalnik Fritsch - Analysette-18 (slika 14), ki je ustrezal standardu SIST EN 15149-1. To je bil vibracijski stresalnik primeren predvsem za določanje masnega deleža delcev ali za ločevanje grobo zrnatega materiala pri velikih količinah vzorca. Gibanje rotacijskega sita je bilo tridimenzionalno. Premier sit, ki so se uporabili pri tem sejalniku, je bil 400 mm. Ko smo material ločili na delce večje od 3,15 mm, na delce

velikosti od 1 mm – 3,15 mm in na delce manjše od 1mm (ostanejo v zbirni posodi), smo sejanje nadaljevali na sejalniku Fritsch -Analysette-3, ki je bil skladen s standardom SIST EN 15149-2. To je bil laboratorijski sejalek z vertikalnim pomikom za točno ločevanje frakcij zrn, sita so imela premer 200 mm. Frakcijo, ki je pri sejalniku Analysette-18 ostala v zbirni posodi, smo presejali še skozi sita z velikostjo odprtín 850 μm , 500 μm , 250 μm , 200 μm in 125 μm . Frakcijo, ki je ostala na sejalniku Analysette-18 na situ 1mm, pa smo na Analysette-3 presejali še skozi siti z velikostjo odprtín 2,36 mm in 2 mm. Iz začetne mase materiala in mase vzorca na posameznem situ smo izračunali masne deleže delcev (x) v 10 velikostnih razredih delcev:

$x > 3,15 \text{ mm}$
 $3,15 \text{ mm} \leq x < 2,36 \text{ mm}$
 $2,36 \text{ mm} \leq x < 2,00 \text{ mm}$
 $2,00 \text{ mm} \leq x < 1,00 \text{ mm}$
 $1,00 \text{ mm} \leq x < 850 \mu\text{m}$
 $850 \mu\text{m} \leq x < 500 \mu\text{m}$
 $500 \mu\text{m} \leq x < 250 \mu\text{m}$
 $250 \mu\text{m} \leq x < 200 \mu\text{m}$
 $200 \mu\text{m} \leq x < 125 \mu\text{m}$
 $x < 125 \mu\text{m}$

3.5.6 Določanje mehanske obstojnosti

Mehanska obstojnost se je določala po standardu SIST EN 15210-1:2010 Trdna biogoriva - Metode za določanje mehanske trdnosti peletov in briketov - 1. del: Peleti. Ustrezna mehanska obstojnost je pomembna v fazi skladiščenja. Slaba mehanska obstojnost pomeni večji delež finih delcev. Mehanska obstojnost je mera odpornosti peletov proti tresljam in površinski obrabi, do katerih pride zaradi postopkov rokovanja in prevoza. Postopek določanja je temeljil na kontrolirani obrabi peletov in testiranju trkov peletov med sabo in v stene testirne naprave. Za določanje mehanske obstojnosti smo uporabili testirno napravo, ki je bila sestavljena iz škatle z notranjimi dimenzijami (300 x 300 x 125) mm in smo jo lahko nepredušno zaprli. Izdelana je bila iz togega materiala z gladkimi in ravnimi površinami. Uporabili smo še sito proizvajalca Fritsch z velikostjo odprtín 3,15 mm in premerom 200 mm za ročno sejanje, posodo in neavtomatsko tehtnico proizvajalca AND, model GX-10K-EC z natančnostjo tehtanja 0,1 g. V posodo smo zatehtali 500 g peletov in jih presejali. Pelete, ki so ostali na situ, smo stehali. Te pelete smo nato vsuli v testirno napravo. Standard predpisuje hitrost vrtenja škatle 50 rotacij na minuto, opravljenih pa mora biti 500 obratov. Vzorec smo izpostavili kontroliranemu tresenju. Po končanem postopku smo vsebino škatle v celoti

izpraznili v posodo. Po postopku smo pelete še enkrat presejali. Količino, ki je ostala na situ, smo stehali, dobljen podatek pa je predstavljal maso peletov po izpostavitvi obrabi. Pri vsaki analizi smo naredili štiri ponovitve. Mehansko obstojnost smo izračunali kot razmerje med maso pred in po izpostavitvi peletov obrabi (16):

$$D_U = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100 \quad [\%] \quad \dots (16)$$

D_U	mehanska obstojnost (%)
m_E	masa predhodno presejanih peletov pred izpostavitvijo v napravi (g)
m_A	masa presejanih peletov po vrtenju v napravi (g)

3.5.7 Določanje gostote nasutja

Gostoto nasutja smo določali skladno s standardno metodo SIST EN 15103:2010. Uporabili smo tehtnico proizvajalca AND, model GX-10K-EC, ki ima natančnost tehtanja 0,1 g in posodo cilindrične oblike izdelane iz ravnega, gladkega materiala, ki je bil odporen na udarce. Razmerje med premerom in višino posode je moralo znašati od 1,25 do 1,50. Potrebovali smo še ravno letev za odstranjevanje odvečnega materiala in ravno leseno podlago debeline okoli 15 mm, ki smo jo uporabili za trk napolnjene posode. Pred meritvijo smo določili maso in volumen merilne posode. Posodo smo postavili na leseno ploščo in jo napolnili z vzorcem, tako da smo material vsipali v posodo z višine okoli 200 do 300 mm od zgornjega roba posode, dokler ni nastal kup. Napolnjeno posodo smo nato prosto spustili na ploščo z višine okoli 150 mm. S tem smo dosegli, da se je vsebina v posodi nekoliko posedla. Zagotoviti je bilo potrebno, da je posoda na ploščo udarila v vertikalni smeri. Postopek smo trikrat ponovili. Posodo smo nato spet do roba dopolnili z materialom, z letvijo odstranili odvečen material in posodo z vsebino stehali. Pri vsakem vzorcu smo naredili štiri ponovitve.

Gostoto nasutja smo izračunali po naslednji enačbi (17):

$$BD_{ar} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \dots (17)$$

BD_{ar}	gostota nasutja (kg/m^3)
m_1	masa prazne posode (kg)
m_2	masa polne posode (kg)
V	neto volumen merilne posode (m^3)

3.6 STATISTIČNA OBDELAVA

Rezultate smo obdelali z uporabo osnovnih statističnih metod s pomočjo programa Microsoft Excel. Računali smo povprečja parametrov pri posameznem proizvajalcu, določili maksimalno in minimalno vrednost. Vrednosti posameznih parametrov pri proizvajalcih smo predstavili grafično s stolpčnimi grafikoni. Za ugotavljanje odvisnosti vsebnosti vode v peletih od relativne zračne vlažnosti smo izračunali determinacijski koeficient. Odvisnost smo prikazali z razsevnim grafikonom. Prav tako smo determinacijski koeficient izračunali pri odvisnosti spodnje kurilnosti peletov v dostavljenem stanju od vsebnosti vode v peletih in odvisnost ponazorili z razsevnim grafikonom. Z izračunom determinacijskega koeficienta smo ugotavljali tudi odvisnost mehanske obstojnosti od vsebnosti vode in pepela v peletih. Oboje smo prikazali z razsevnim grafikonom.

Porazdelitev masnega deleža delcev po 10 velikostnih razredih smo ponazorili s črtnim grafikonom. Črta na grafu povezuje masne delež delcev istega vzorca. To vrsto grafikona smo uporabili, da je prikaz bolj nazoren. Za prikaz kurilnosti smo uporabili raztreseni grafikon in vse tri vrste kurilnosti (zgornjo in spodnjo kurilnost materiala v suhem stanju in spodnjo kurilnost materiala v dostavljenem stanju) prikazali na istem grafikonu pri posameznem proizvajalcu.

Enake vrste grafikonov smo uporabili tudi pri pregledu posameznih parametrov, kjer so vrednosti vseh vzorcev peletov prikazane na enem grafu, podatki pa se glede na proizvajalca ločijo po barvi. Ti grafi so prikazani v prilogi.

S stolpčnimi grafikoni smo prikazali tudi povprečne vrednosti določenega parametra v vzorcih peletov pri vsakem proizvajalcu, pri vsaki povprečni vrednosti pa smo izračunali in prikazali tudi standardni odklon.

4 REZULTATI

4.1 PREGLED LASTNOSTI SUROVINE IN PELETOV IZBRANIH PROIZVAJALCEV

V nadaljevanju so predstavljene ugotovitve o lastnostih surovine in peletov pri sedmih proizvajalcih lesnih peletov v Sloveniji. Zaradi zagotavljanja anonimnosti smo jih označili s črkami od A do G.

4.1.1 Proizvajalec A

Pri proizvajalcu A smo odvzeli 20 vzorcev peletov in 19 vzorcev surovine. Za proizvodnjo peletov so v glavnem uporabili žaganje, pozimi pa so dodajali tudi lesne sekance. V sušilniku so imeli fini mlin, ki je zmlel delce na velikost 5,5 mm. Sekance so dodatno zmleli z grobim mlinom. Žaganje so posušili na 8 % do 12 % vsebnosti vode. Surovino je v največji meri predstavljala smreka, ki so jo dobili v obliki žaganja in je imela odstranjeno skorjo. Med listavci je bila zastopana predvsem bukev, občasno so ji dodali tudi hrast, javor, češnjo. Pri enem vzorcu je proizvajalec surovini primešal koruzni škrob.

V desetih primerih so bili vzorci peletov sestavljeni iz 80 % smreke in 20 % bukve, od tega je bil k surovini enega vzorca dodan škrob, štiri vzorce peletov je sestavljalo 80 % smreke, preostali del sta bila hrast in bukev, dva vzorca sta bila iz 80 % smreke in 20 % hrasta, dva vzorca sta bila ravno tako iz 80 % smreke, medtem ko so listavce v enem primeru predstavljali češnja, javor in hrast, v drugem pa le javor in hrast. Po en vzorec peletov je bil sestavljen iz 100 % smreke, ter 90 % smreke in 10 % bukve.

4.1.1.1 Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu A

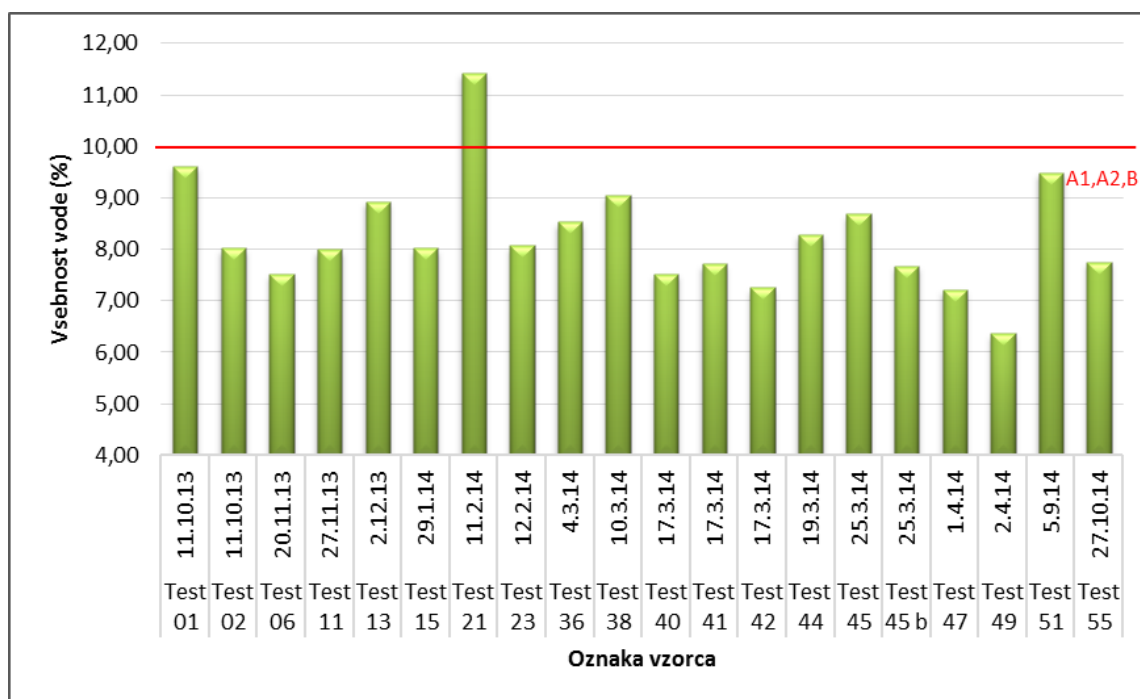
Posamezne vsebnosti vode v peletih prikazuje slika 15. Prvič smo vzorčili v začetku oktobra. Odvzeli smo 2 različna vzorca peletov Test 1 in Test 2. V prvem primeru je surovino sestavljalo 80 % smreke, 20 % češnje, približno odstotek pa je bilo javorja in hrasta. V drugem primeru je bilo tudi 80 % smreke, preostalo je bila bukev. Proizvodni proces je bil enak. Razlika v vsebnosti vode je bila več kot 1,5 %, pri čemer je bila edina razlika le v vrsti surovine.

Pri naslednjem vzorčenju v novembru so bili peleti Test 6 sestavljeni iz 80 % smreke, 12 % hrasta in 8 % javorja. Peleti z oznako Test 11 so bili sestavljeni iz 80 % smreke,

10 % bukve in 10 % hrasta. Vsebnost vode v peletih je bila v obeh primerih pod 8 % (slika 15).

Pri prvih treh odvzemih peletov in surovine, smo surovino odvzeli ločeno iz deponije, kar pomeni, da smo vzeli smrekovo žaganje posebej in mešanico žaganja listavcev posebej. Rezultati analize surovine se niso izkazali za uporabne, zato smo pri naslednjih vzorčenjih surovino jemali s proizvodnje linije.

Peleti z oznako Test 13, 15, 23, 36 in 38 so bili sestavljeni iz 80 % smreke in 20 % bukve. Pri vseh petih vzorcih peletov je bila vsebnost vode med 8 in 9 % (slika 15).



Slika 15: Vsebnost vode v vzorcih peletov proizvajalca A, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 15: Moisture content in samples of pellets at the producer A; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Vzorec peletov Test 21 je bil ob enakem deležu smreke in 20 % hrasta edini primer, ko je bila vsebnost vode večja od 10 % in zato peleti po kvaliteti niso sodili v noben kakovostni razred A1, A2 ali B. Vsebovali so kar 11,4 % vode (slika 15).

17. 3. 2014 smo preverjali, kako različna vsebnost vode v vhodni surovini vpliva na mehansko obstojnost in vsebnost vode v peletih. Pri peletih Test 40 je bila vsebnost vode v vhodni surovini 12 %, pri peletih Test 41 je bila vsebnost 10 % in pri peletih Test 42 je bila 8 %. Pri vseh treh vrstah peletov je bila sestava vhodne surovine enaka in sicer 80 % smreke, 15 % bukve in 5 % hrasta. Vsebnost vode v surovini so pred samim

peletiranjem merili z merilnikom vsebnosti vode proizvajalca Imko, model Trime - GW surface PROBE GS1/GS2. Vsebnost vode v surovini pa v tem primeru ni bistveno vplivala na vsebnost vode v peletih, saj je v vseh treh primerih znašala med 7 in 8 % (slika 15).

Peleti z oznako Test 44 so bili sestavljeni iz 90 % smreke in 10 % bukve in so dosegli povprečno vsebnost vode v peletih pri tem proizvajalcu (slika 15).

Konec marca 2014 je proizvajalec v poizkusni seriji surovini (80 % smreka, 20 % bukev) dodal 2 % koruznega škroba. Peleti s koruznim škrobom Test 45 so imeli za 1 % višjo vsebnost vode kot peleti brez škroba Test 45b (slika 15).

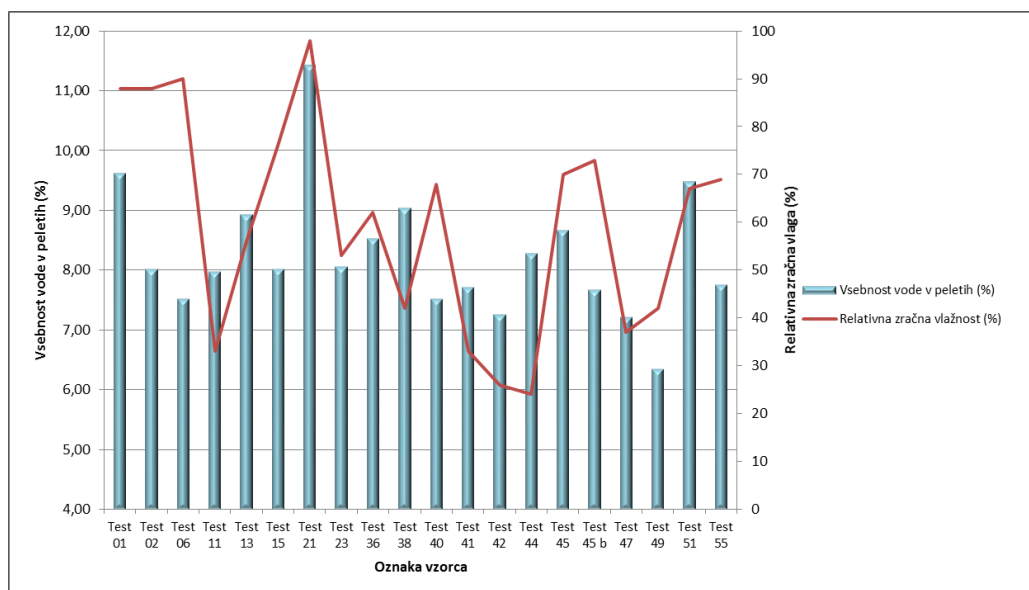
Peleti vzorčeni začetek in konec aprila z oznako Test 47 in Test 49 so bili sestavljeni iz 80 % smreke in 20 % bukve. Peleti Test 49 so imeli tudi najnižjo vsebnost vode izmerjene pri tem proizvajalcu (slika 15).

Septembra 2014 smo preizkušali pelete Test 51, ki so bili narejeni izključno iz smreke. Vsebnost vode je bila 9,49 %, kar je bila tretja najvišja izmerjena vrednost pri tem proizvajalcu (slika 15).

Zadnje vzorčenje je bilo konec oktobra. Pelete Test 55 je predstavljalo 80 % smreke in 20 % bukve in so vsebovali 7,8 % vode (slika 15).

Povprečna vsebnost vode v peletih pri tem proizvajalcu je znašala 8,26 %. Razlika med največjo in najmanjšo vsebnostjo vode v peletih je bila 5,1 %.

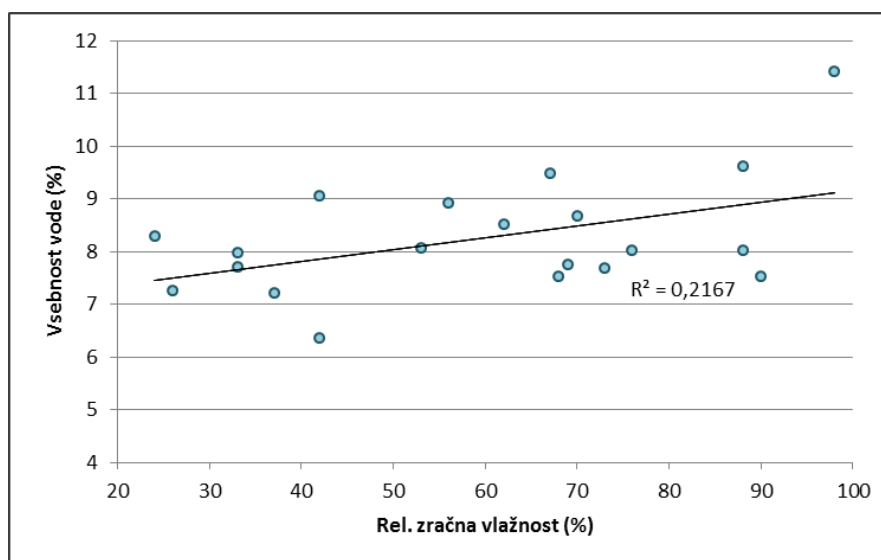
Od oktobra 2013 do oktobra 2014 smo zbrali 20 vzorcev peletov. Pri vsakem vzorčenju smo zabeležili tudi vremenske razmere (padavine in temperaturo), saj smo želeli ugotoviti, kako relativna zračna vlažnost vpliva na vsebnost vode v peletih. Podatke o relativni zračni vlažnosti smo povzeli od Agencije republike Slovenije za Okolje, ki z meteorološke postaje, ki je v neposredni bližini proizvajalca, na internetni strani objavlja polurne podatke o relativni zračni vlažnosti. Slika 16 prikazuje vsebnost vode v peletih in relativno zračno vlažnost v času odvzema vzorca.



Slika 16: Vsebnost vode v peletih proizvajalca A in relativna zračna vlažnost v času odvzema vzorca

Figure 16: Moisture content in samples of pellets at the producer A and relative humidity at the time of sampling

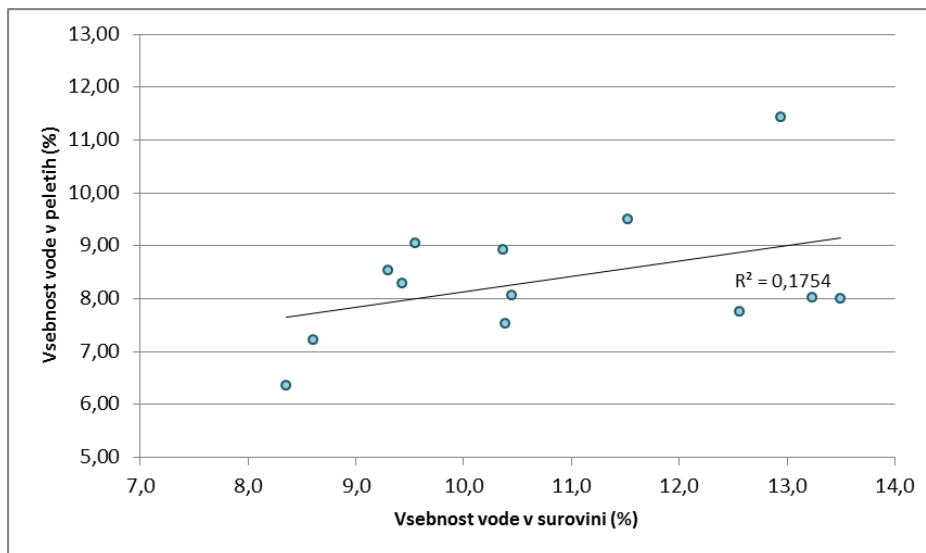
Ugotavljali smo zvezo med relativno zračno vlažnostjo in vsebnostjo vode v peletih (slika 17), vendar je determinacijski koeficient (R^2) znašal le 22 %, kar predstavlja pojasnjeno varianco. Le najvišje določena vsebnost vode v peletih je sovpadala z najvišjo relativno zračno vlažnostjo. Kot smo pričakovali, je šlo za zelo šibko povezanost med vsebnostjo vode v peletih in relativno zračno vlažnostjo in vsebnosti vode v peletih ne moremo pojasniti z okoljsko vlažnostjo.



Slika 17: Vpliv relativne zračne vlažnosti na vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu A

Figure 17: The influence of relative humidity on moisture content of pellets at the producer A

Zanimalo nas je tudi, ali ima vsebnost vode v surovini vpliv na končno vsebnost vode v peletih. V peletirni napravi je sušilnik, ki surovino posuši na določeno vsebnost vode. Vzorec surovine smo iz peletirne naprave jemali šele po tem sušenju. Determinacijski koeficient (R^2) pojasni le 18 % odvisnosti vsebnosti vode v peletih od vsebnosti vode v surovini po sušenju, kar vidimo na sliki 18.



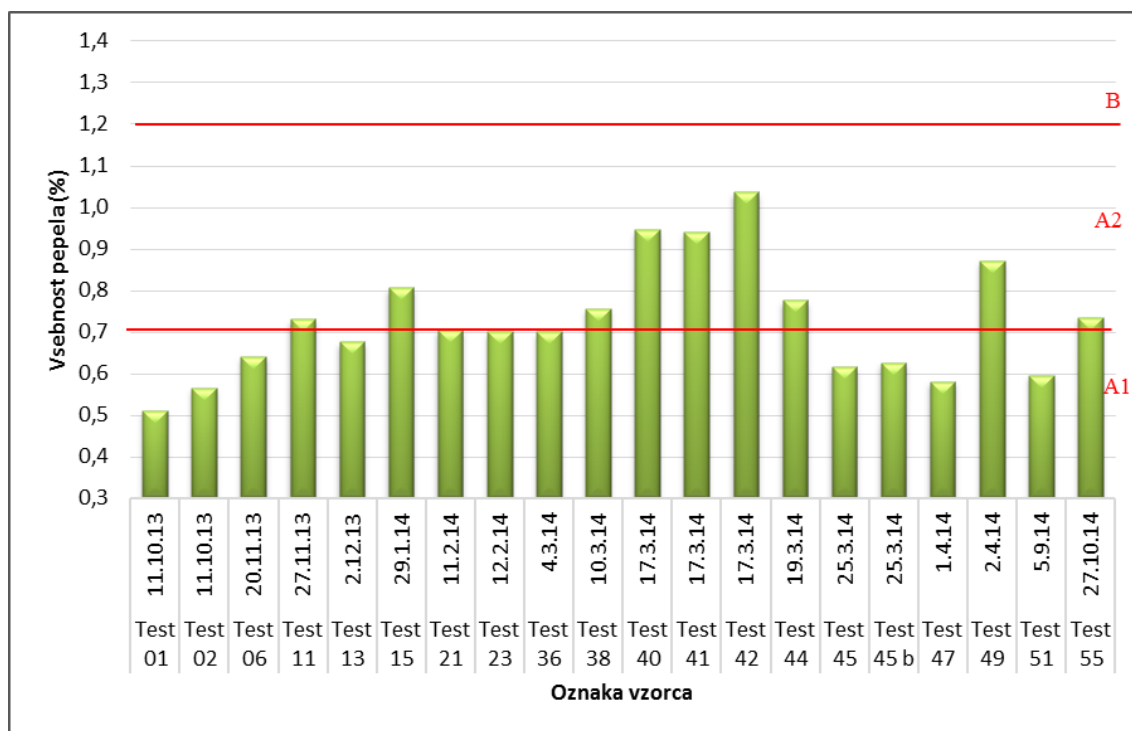
Slika 18: Vpliv vsebnosti vode v surovini na vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu A

Figure 18: The influence of moisture content in raw material on moisture content of pellets at the producer A

Naredili smo tudi Studentov parni t-test za odvisne vzorce, pri katerem smo primerjali vsebnost vode v surovini in peletih iz te surovine. Ugotovili smo, da so med vsebnostjo vode v surovini in vsebnostjo v peletih, ki so narejeni iz te surovine, signifikantne razlike. Iz tega bi lahko sklepali, da se vsebnost vode v surovini in peletih spreminja še tekom proizvodnega procesa, tako da ni značilne povezave med vsebnostjo vode v surovini in vodo v peletih iz te surovine.

4.1.1.2 Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu A

Vsebnost pepela smo določili na 20 vzorcih peletov in ugotovili, da je bila pri polovici vzorcev vsebnost pepela nižja od 0,7 %, kar pomeni, da smo v tem primeru lahko pelete uvrstili v kakovostni razred A1. Pri vseh vzorcih peletov je bila vsebnost pepela nižja od 1,2 %, kar pomeni, da v nobenem primeru niso padli v kakovostni razred B (slika 19).



Slika 19: Vsebnost pepela v vzorcih peletov pri proizvajalcu A, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 19: Ash content in samples of pellets at the producer A; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

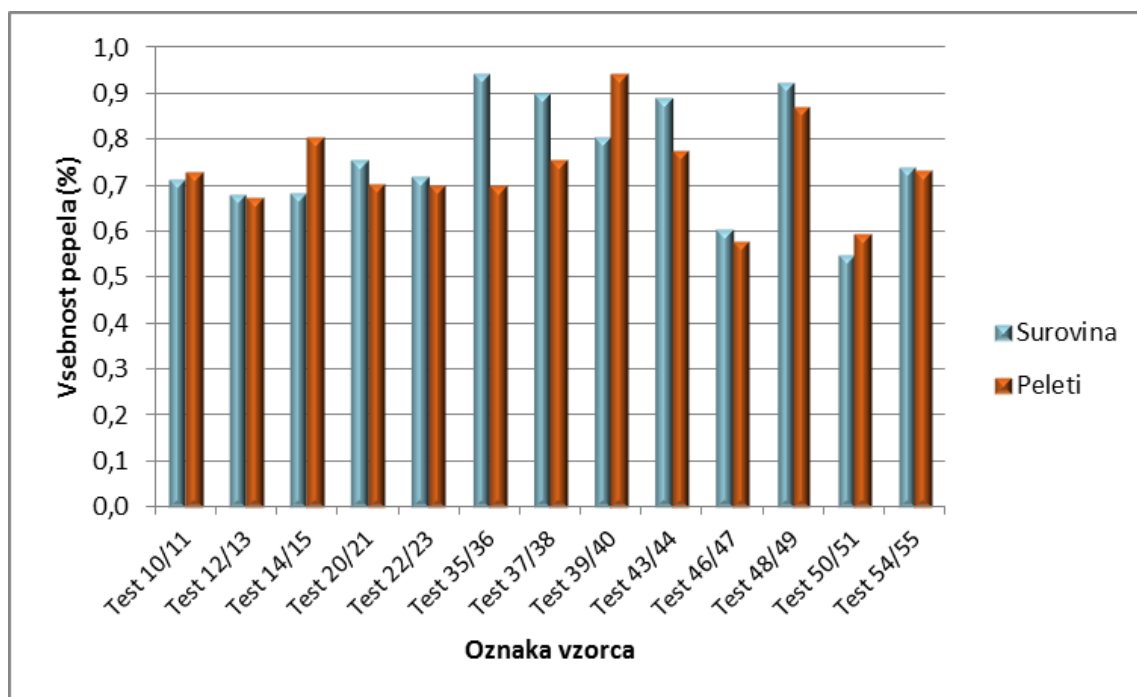
Pri prvem vzorčenju peletov je vzorec vseboval le 0,51 % pepela, kar je bila tudi najnižja vrednost pri tem proizvajalcu (slika 19). Ti peleti so bili sestavljeni iz 80 % smreke brez skorje in 20 % češnje, hrasta in javorja.

Najvišje vsebnosti pepela v peletih smo določili pri vzorčenju z dne 17.3.2014, ko smo odvzeli tri vzorce peletov, ki so se razlikovali le pri vsebnosti vode surovine. Vsebovali so okoli 1 % pepela (slika 19).

Spomladi 2014 je proizvajalec surovini (Test 45) dodal 2 % koruznega škroba in ugotavljali smo lastnosti peletov. Razlika v vsebnosti pepela pri peletih s škrobom ali brez je bila zanemarljiva (0,01 %), kar prikazuje slika 19.

Pelete Test 55 je predstavljalo 80 % smreke in 20 % bukke. Smreko je proizvajalec dobil že brez skorje, tukaj pa je tudi bukev vsebovala manj skorje, zato smo pričakovali nižjo vsebnost pepela. Vsebnost pepela je bila 0,74 %, kar je bilo malo nad povprečjem vsebnosti pepela pri tem proizvajalcu (slika 19).

Povprečna vsebnost pepela vseh vzorcev peletov pri proizvajalcu A je znašala 0,73 %. To je bilo ravno malo nad mejno vrednostjo za kakovostni razred A1, tako smo jih po povprečni vsebnosti pepela lahko uvrstili v kakovostni razred A2.



Slika 20: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu A

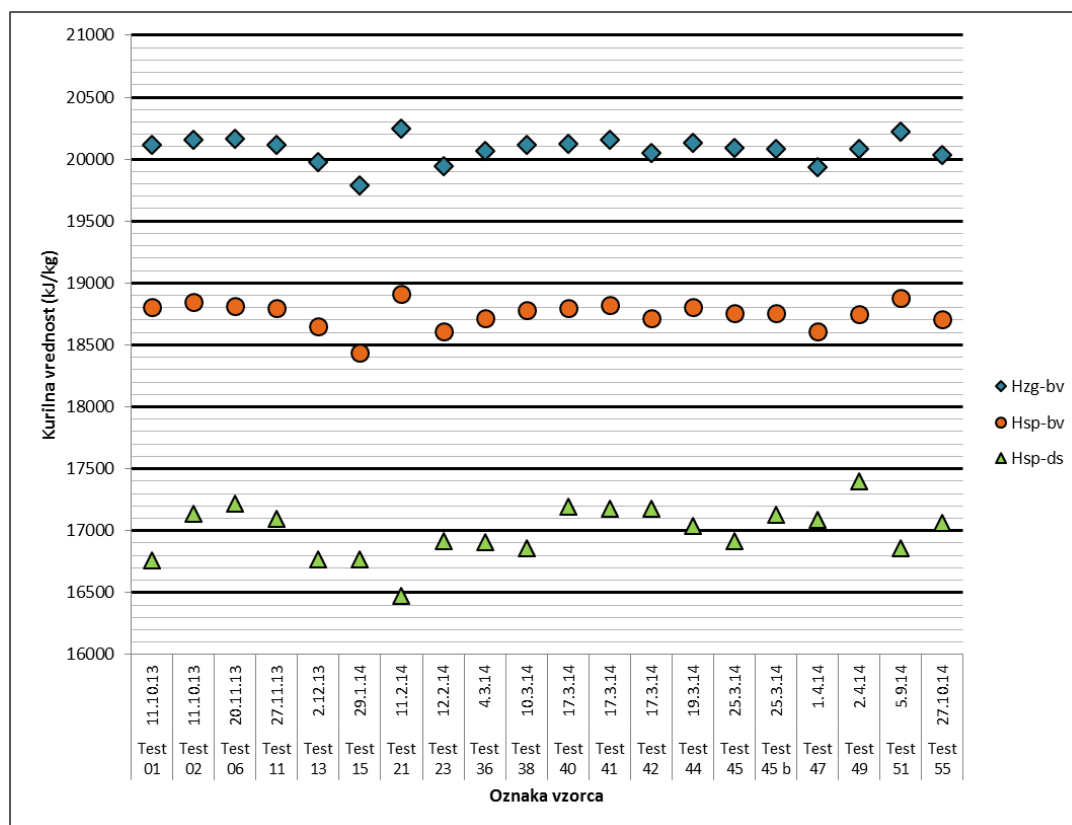
Figure 20: Ash content in raw material and pellets from that raw material at the producer A

Primerjali smo, koliko se vsebnost pepela v surovini razlikuje od vsebnosti pepela v peletih iz te surovine, kar prikazuje slika 20. Skladno s standardno metodo za določanje pepela je dovoljena razlika med vzorcema $R = 0,3 \%$ absolutno, če je pepela manj kot 10% . R je meja za obnovljivost analize pri določanju pepela. Ko smo primerjali razliko v vsebnosti pepela med surovino in peleti, smo ugotovili, da je bila v vseh primerih razlika manjša od dovoljenega R . To je eden od pokazateljev, da so bili vzorci peletov reprezentativni glede na vzorčeno surovino.

4.1.1.3 Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu A

Določali smo zgornjo in spodnjo kurilnost v peletih, ki smo jo preračunali na suho stanje peletov (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds), kar smo prikazali na sliki 21.

Pri analizi kakovosti peletov nas je najbolj zanimala zgornja kurilnost preračunana na suho stanje peletov in spodnja kurilnost dostavljenega stanja peletov. Kurilnost preračunana na suho stanje nam pove, kakšna bi bila kurilnost, če bi bili peleti absolutno suhi. Na podlagi tega smo lahko ocenili, kakšna je bila kakovost samih peletov in koliko je surovinska sestava vplivala na kurilnost.



Slika 21: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hrg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu A

Figure 21: Gross and net calorific value for dry samples of pellets (Hrg-bv, Hsp-bv) and net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at the producer A

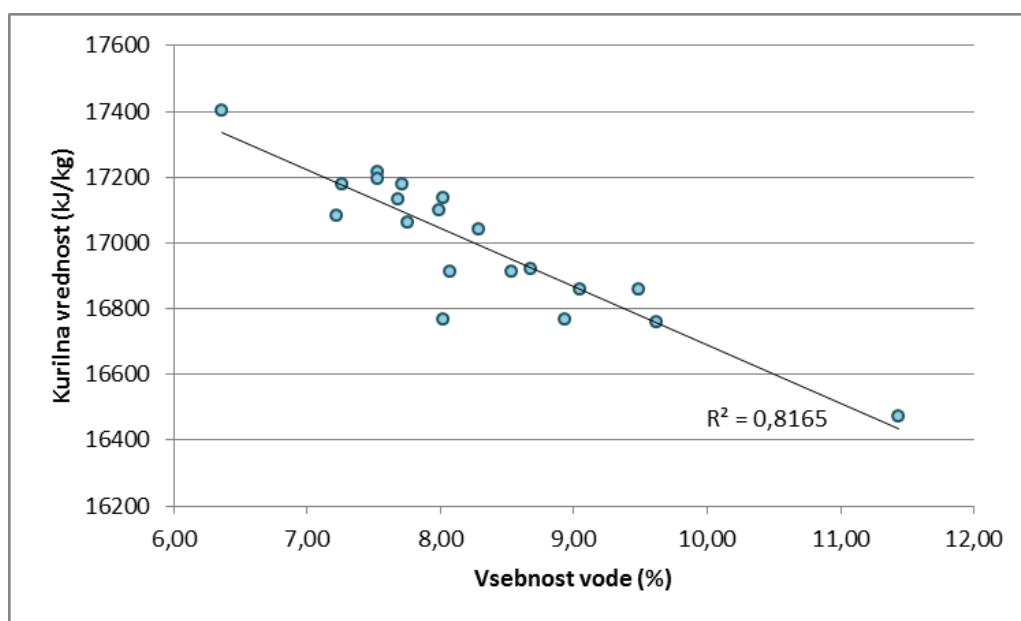
Standard za klasifikacijo peletov za vse tri razrede A1, A2 in B zahteva najnižjo spodnjo kurilnost na dostavljeno stanje vsaj 16500 kJ/kg. Iz slike 21 lahko razberemo, da je pri proizvajalcu A kurilnost v enem primeru (Test 21) padla pod to vrednost (16473 kJ/kg).

Zgornja kurilnost peletov v suhem stanju je dosegala vrednosti od 19789 do 20246 kJ/kg, kar je ponazorjeno na sliki 21. Najvišje kurilnosti so bile dosežene, ko so bili peleti sestavljeni le iz smreke. Le v enem primeru je bila kurilnost s sestavo peletov iz 80 % smreke višja od te vrednosti. V ostalih primerih so bili peleti sestavljeni iz 80 % smreke in v enem primeru iz 90 % smreke. K višji kurilnosti je lahko prispevala tudi večja vsebnost skorje, ki ima višjo kurilnost. Najnižjo kurilnost smo izmerili na vzorcu peletov Test 15, kjer smo testirali, kako starost surovine vpliva na kakovost peletov. Pri proizvajalcu A imajo prakso, da pri proizvodnji peletov uporabljajo sveže, le kakšen dan staro žaganje. V tem primeru pa so žaganje pustili stati na pokriti deponiji tri tedne. Razlog za nižjo kurilnost bi lahko bila razgradnja lesa.

Peleti Test 55 so bili sestavljeni iz 80 % smreke, preostalo je bila bukev. Smreko dobijo že brez skorje, tukaj pa je tudi bukev vsebovala manj skorje, zato smo zaradi manjše vsebnosti skorje pričakovali tudi nižjo kurilnost. Peleti Test 55 so imeli peto najnižjo zgornjo kurilnost preračunano na suho stanje pri tem proizvajalcu (slika 21).

Povprečna spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju pri tem proizvajalcu je znašala 16998 kJ/kg.

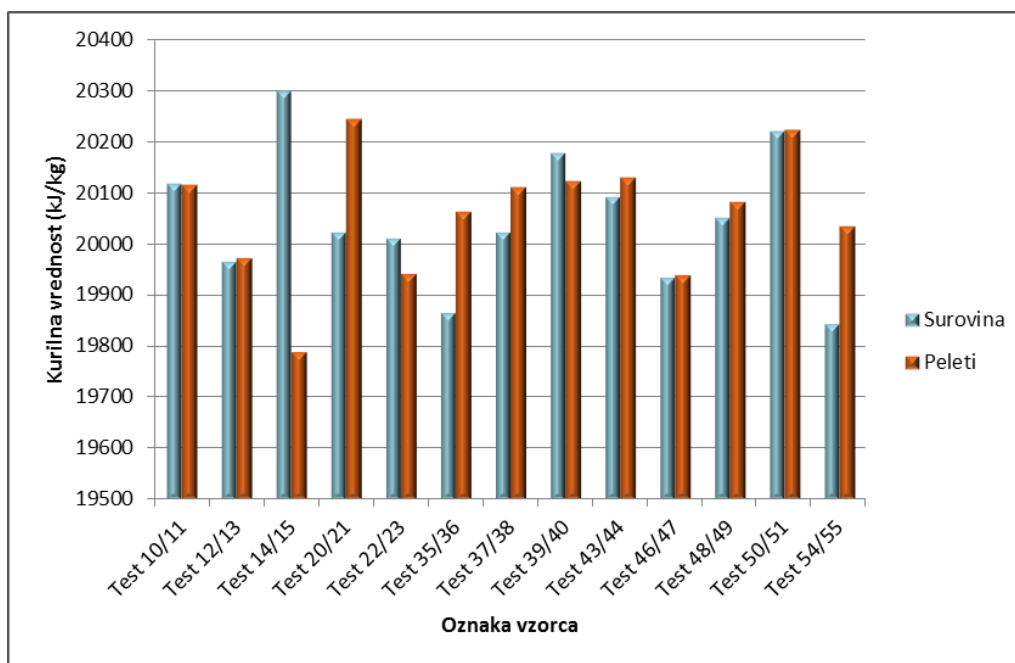
Na spodnjo kurilnost dostavljenih peletov ima največji vpliv vsebnost vode v peletih. Determinacijski koeficient (R^2) je pojasnil 82 % odvisnosti spodnje kurilnosti na dostavljeno stanje od vsebnosti vode v peletih, kar lahko vidimo na sliki 22. Po pričakovanjih nam je to pokazalo veliko povezanost med kurilnostjo in vsebnostjo vode v dostavljenem stanju peletov. Ostali del nepojasnjene variance pa je v določeni meri razložila vrsta in sestava lesa, kar smo lahko sklepali iz kurilnosti preračunane na suho stanje, kar prikazuje slika 21).



Slika 22: Vpliv vsebnosti vode v peletih na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju pri proizvajalcu A

Figure 22: The influence of moisture content in pellets on net calorific value for samples of pellets as received at the producer A

Primerjali smo tudi zgornjo kurilnost pri surovini in pri peletih v suhem stanju, kar je predstavljeno na sliki 23. Če želimo primerjati kurilnost različnega materiala, je smiselno, da primerjamo zgornjo kurilnost suhega materiala. V tem primeru smo se izognili vplivu vsebnosti vode, ki se med materiali lahko razlikuje in bistveno vpliva na kurilnost materiala v dostavljenem stanju. Pri primerjavi kurilnosti suhega matriksa pa smo dejansko preverjali kurilnost samega materiala.



Slika 23: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu A

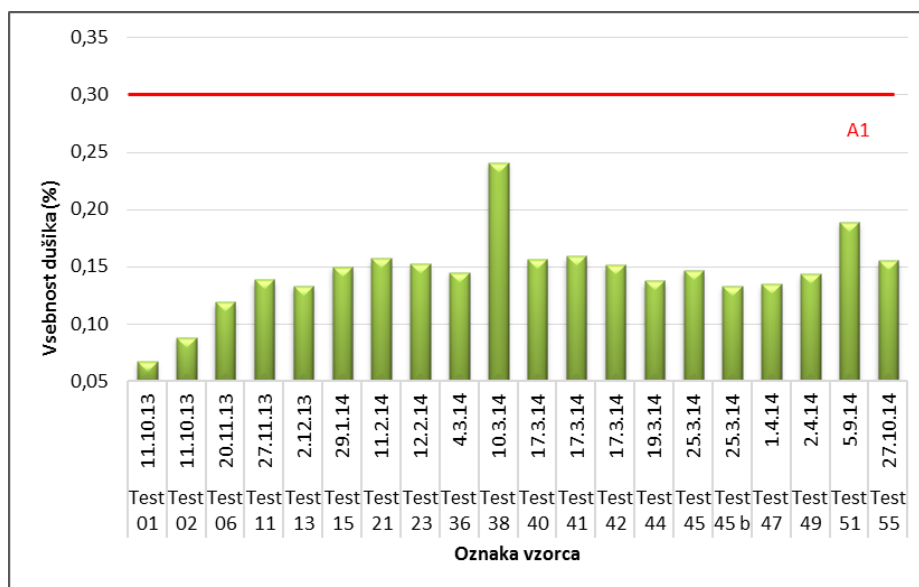
Figure 23: Gross calorific value for dry samples (Hzg-bv) of raw material and samples of pellets from that raw material at the producer A

Standard za določanje kurilnosti dovoljuje razliko v obnovljivosti 300 kJ/kg. V vseh primerih razen v enem je bila razlika v kurilnosti pri surovini in peletih iz te surovine manjša od mejne vrednosti. V tem primeru (Test 14/15) pa je razlika v kurilnosti med surovino in peleti znašala kar 511 kJ/kg.

4.1.1.4 Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu A

Kemična sestava lesa je v splošnem dokaj konstanta. V primeru, da gre vedno za enako vhodno surovino, ki jo je pri proizvajalcu A v večini primerov predstavljala smreka (80 %), ostalo pa je bil les listavcev, je tudi vsebnost dušika dokaj konstantna. Slika 24 prikazuje vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu A.

Standard za razvrščanje lesnih peletov za razred A1 določa, da mora biti vsebnost dušika nižja ali enaka 0,3 % (rdeča črta na sliki 24), za razred A2 nižja ali enaka 0,5 % in za razred B nižja ali enaka 1,0 %. Iz slike 24 lahko razberemo, da je bila vsebnost dušika pri proizvajalcu A v vseh primerih nižja od 0,3 %, kar pomeni, da lahko pelete po vsebnosti dušika uvrstimo v kakovostni razred A1. Najvišja vsebnost dušika je bila v vzorcu peletov Test 38, kjer so bili peleti sestavljeni iz 80 % smreke in 20 % bukve, pri najnižji vsebnosti dušika pa so bili peleti ravno tako sestavljeni iz 80 % smreke, preostali del pa je predstavljala češnja, javor in hrast.

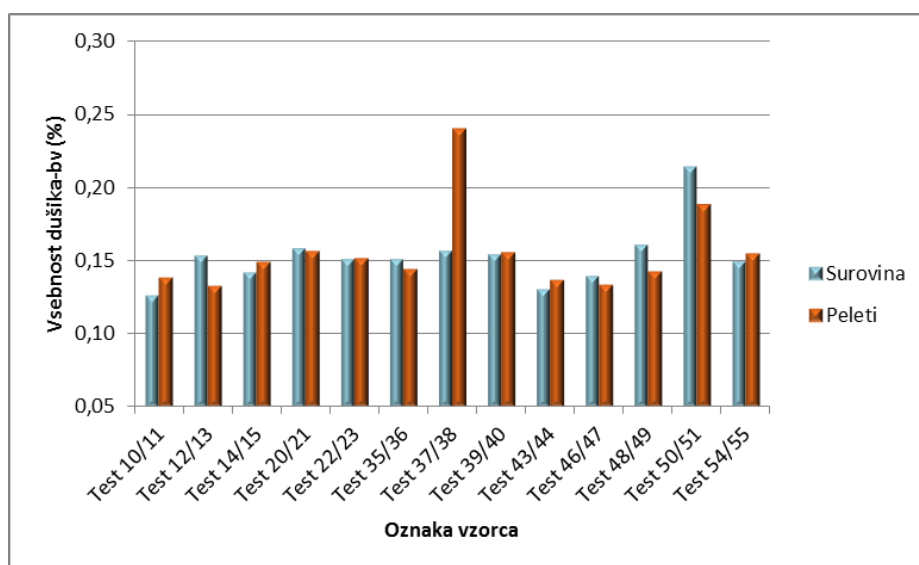


Slika 24: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu A, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 24: Nitrogen content in samples of pellets at the producer A; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Povprečna vsebnost dušika podana na suho stanje pri proizvajalcu A je znašala 0,14 %

Pri pregledu vsebnosti dušika v surovini in peletih iz te surovine, kar prikazuje slika 25, vidimo, da razen v enem primeru ni prišlo do bistvenega odstopanja. Pri surovini Test 37 in peletih Test 38 je bila razlika 0,08 %. To je bilo še vedno znotraj dovoljene meje, ki jo predpisuje standard za določanje ogljika, vodika in dušika in sicer za dušik predpisuje pri obnovljivosti dovoljeno odstopanje 0,11 %.



Slika 25: Vsebnost dušika v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu A

Figure 25: Nitrogen content in raw material and pellets from that raw material at the producer A

4.1.1.5 Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu A

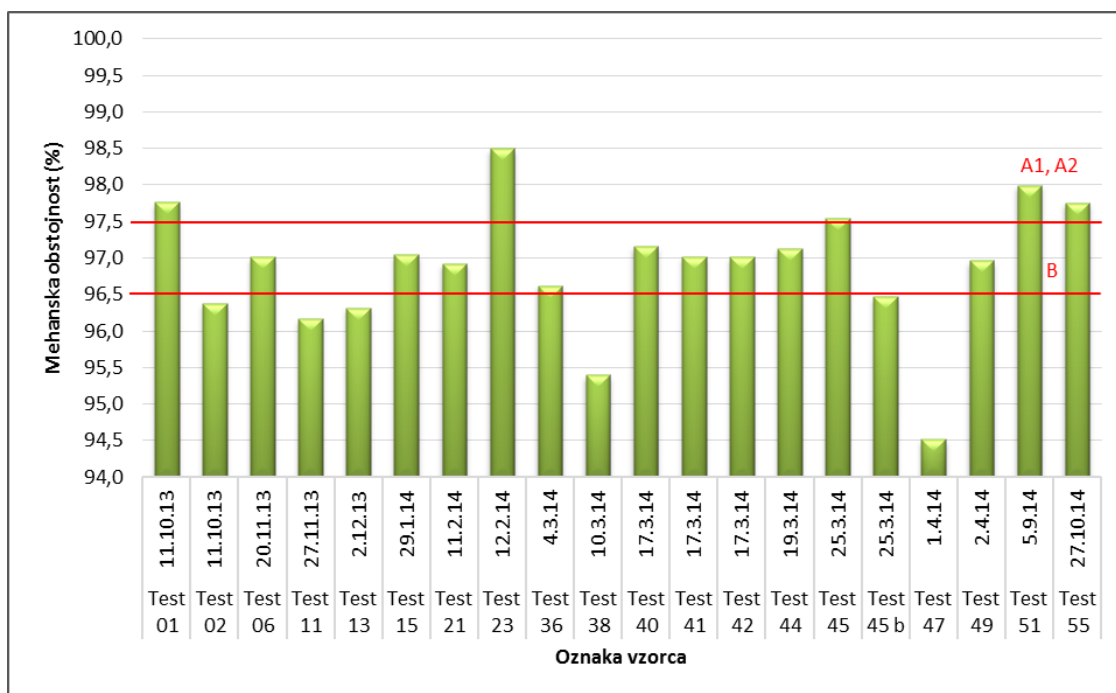
Skladno s standardom za razvrščanje lesnih peletov glede na mehansko obstojnost razvrščamo pelete v razred A1 oziroma A2 pri mehanski obstojnosti $\geq 97,5$ % in v razred B pri mehanski obstojnosti $\geq 96,5$ %. Kot prikazuje slika 26, so peleti proizvajalca A samo v petih primerih dosegli kriterij za uvrstitev v razred A1 oz. A2, v desetih primerih pa smo jih lahko uvrstili v razred B.

Proizvajalec A je pri proizvodnji peletov uporabljal sveže žaganje, pri peletih Test 15 pa je uporabil tri tedne staro žaganje, ker nas je zanimalo, če "uležano" žaganje vpliva na mehansko obstojnost. Mehanska obstojnost teh peletov je znašala 97,04 % in so bili po vrednosti na 8. mestu pri tem proizvajalcu (slika 26).

Konec marca 2014 je proizvajalec v poizkusni seriji surovini (80 % smreka, 20 % bukev) dodal 2 % koruznega škroba. Preverjali smo, kako koruzni škrob vpliva na mehansko obstojnost. Peleti Test 45 z dodanim škrobom so imeli mehansko obstojnost 97,55 %, peleti Test 45b narejeni iz enake surovine, vendar brez škroba pa 96,47 %. Vidimo, da je škrob za več kot 1 % izboljšal mehansko obstojnost peletov. Pelete Test 45 smo lahko tako tudi uvrstili v kakovostni razred A1 oz. A2 (slika 26).

Peleti, vzorčeni začetek in konec aprila z oznako Test 47 in 49, so bili sestavljeni iz 80 % smreke in 20 % bukve. Med tema dvema vzorčenjema so na peletirni napravi pri matrici zamenjali dva valja, ki potiskata surovino skozi matrico. To bi bil lahko vzrok, da je bila v drugem primeru mehanska obstojnost kar za 2,5 % boljša. Valja se čez čas namreč obrabita in se ne moreta več dovolj približati, kar posledično vpliva na dolžino peletov, ki so krajši in tako je verjetno tudi mehanska obstojnost slabša.

Septembra 2014 smo preizkušali pelete Test 51, ki so narejeni iz 100 % smreke. Pričakovali smo višjo mehansko obstojnost. Dosežena je bila druga najvišja vrednost mehanske obstojnosti pri tem proizvajalcu in sicer kar 98,0 % (slika 26).



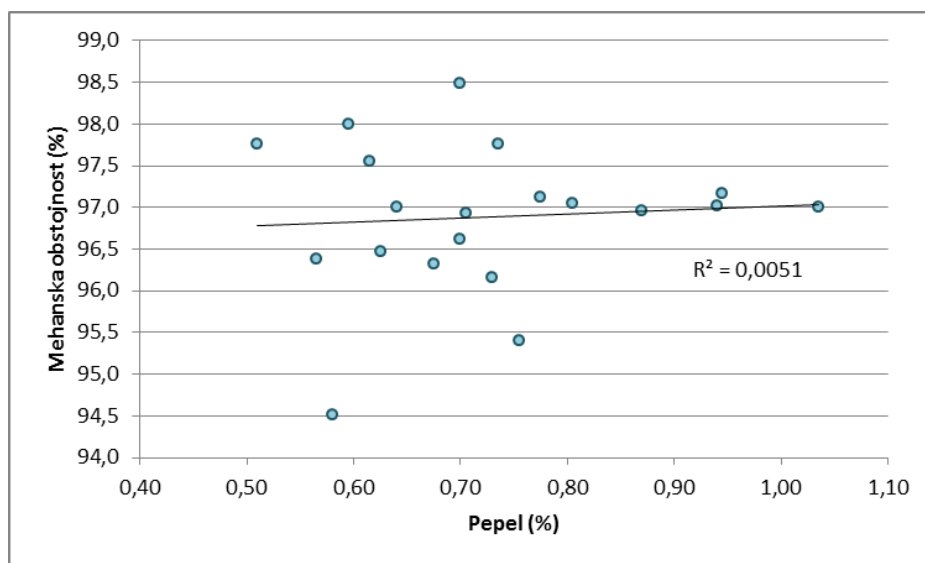
Slika 26: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu A, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 26: Mechanical durability of pellets at the producer A; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Iz slike 26 lahko razberemo, da je bila najvišja mehanska obstojnost 98,5 % dosežena pri peletih Test 23, ki so bili sestavljeni iz 80 % smreke in 20 % bukve. Vsebnost pepela teh peletov je bila 0,70 %, vsebnost vode pa 8,07 %, kar je bilo vse okoli povprečne vsebnosti za pepel in vodo pri tem proizvajalcu. Najnižja obstojnost 94,5 % je bila dosežena pri peletih Test 47. Vzrok bi lahko bila tudi izrabljena matrica, ki so jo takoj za tem zamenjali. V tem primeru so bili peleti ravno tako sestavljeni iz 80 % smreke in 20 % bukve, vendar pa je bila vsebnost pepela le 0,58 % in vsebnost vode 7,22 %, kar je razmeroma malo in bi oba parametra lahko bila pokazatelja slabše mehanske obstojnosti.

Povprečna mehanska obstojnost vzorcev peletov pri tem proizvajalcu je bila 96,9 %, kar jih uvršča v kakovostni razred B.

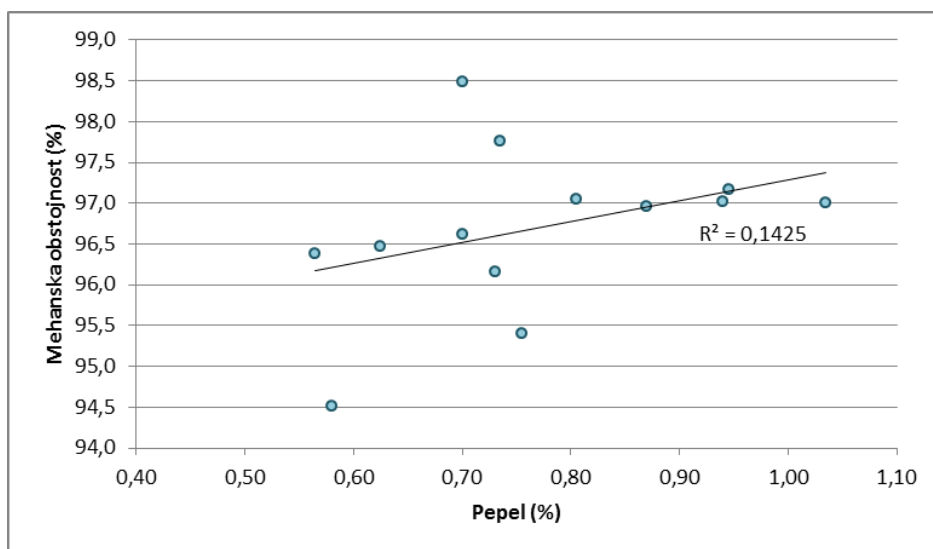
Zanimalo nas je, kako vsebnost negorljivih mineralnih substanc, ki se odražajo v deležu pepela v peletih, vplivajo na mehansko obstojnost peletov. Determinacijski koeficient $R^2 = 0,0051$ je pokazal, da med vsebnostjo negorljivih mineralnih substanc in mehansko obstojnostjo pri proizvajalcu A ni bilo korelacije, kar nam prikazuje slika 27.



Slika 27: Vpliv vsebnosti negorljivih mineralnih substanc (pepel) v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A

Figure 27: The influence of non-combustible mineral substances content (ash) in pellets on mechanical durability of pellets at the producer A

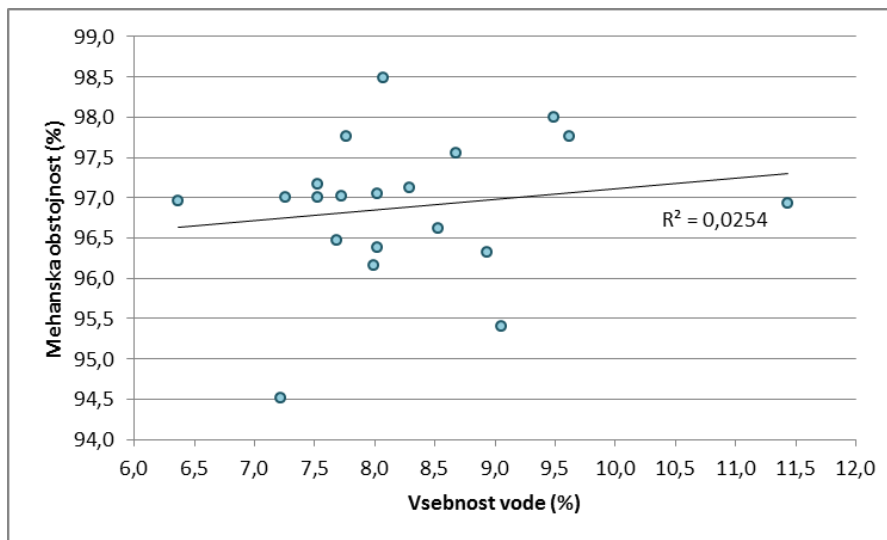
Ker nas je pri tej študiji zanimalo tudi, kako je, če izključimo vpliv vrste surovine na mehansko obstojnost, smo naredili tudi korelacijski diagram, kjer smo vključili le pelete z enako surovinsko sestavo (80 % smreka in 20 % bukev oz. 20 % bukev + hrast). To nam prikazuje slika 28. V tem primeru je bil determinacijski koeficient med vsebnostjo negorljivih mineralnih substanc in mehansko obstojnostjo sicer trikrat večji, vendar še vedno prenizek, da bi lahko govorili o korelaciji.



Slika 28: Vpliv vsebnosti negorljivih mineralnih substanc (pepel) v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A pri podobni sestavi peletov

Figure 28: The influence of ash content in pellets on mechanical durability of pellets at the producer A (similar composition of pellets)

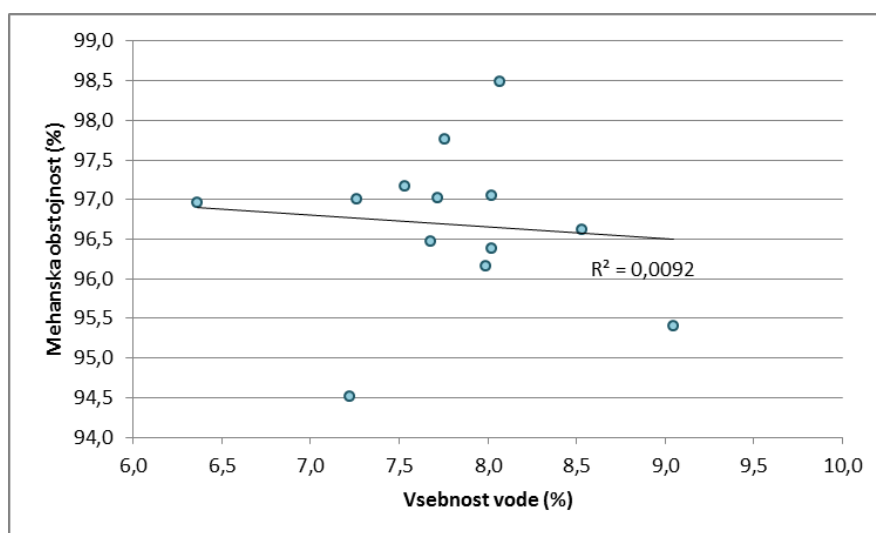
Ugotavljali smo, če vsebnost vode vpliva na mehansko obstojnost. Razsipni grafikon na sliki 29 prikazuje, da ni bilo korelacije med vsebnostjo vode v peletih in njihovo mehansko obstojnostjo.



Slika 29: Vpliv vsebnosti vode v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A

Figure 29: The influence of moisture content in pellets on mechanical durability of pellets at the producer A

Ravno tako nas je pri vsebnosti vode zanimalo, kakšen je vpliv le-te na mehansko obstojnost peletov, če izključimo vpliv vrste surovine. Tudi v tem primeru ni bilo nobene povezave med mehansko obstojnostjo in vsebnostjo vode, pokazal pa se je celo negativen trend (slika 30).

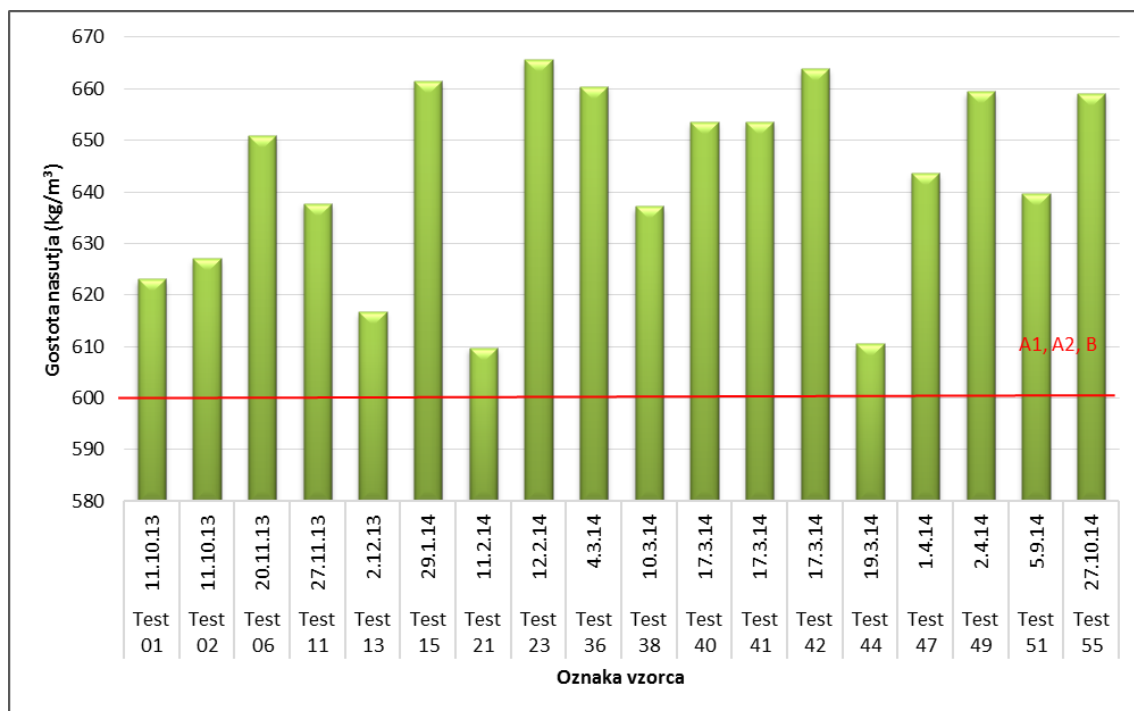


Slika 30: Vpliv vsebnosti vode v peletih na mehansko obstojnost peletov pri proizvajalcu A pri podobni sestavi peletov

Figure 30: The influence of moisture content in pellets on mechanical durability of pellets at the producer A (similar composition of pellets)

4.1.1.6 Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu A

Standard za razvrščanje peletov zahteva minimalno gostoto nasutja za vse tri razrede A1, A2 in B vsaj 600 kg/m^3 , kar na sliki 31 označuje rdeča črta. Na tem grafu vidimo, da so imeli peleti proizvajalca A gostoto nasutja v vseh primerih večjo od 600 kg/m^3 .



Slika 31: Gostota nasutja vzorcev peletov proizvajalca A, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 31: Bulk density in samples of pellets at the producer A; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Največjo gostoto nasutja je imel vzorec peletov Test 23 in sicer $665,6 \text{ kg/m}^3$. Ta vzorec je imel tudi največjo mehansko obstojnost, surovina pa je bila sestavljena iz 80 % smreke in 20 % bukve. Najmanjšo gostoto nasutja je imel vzorec peletov Test 21 in sicer $609,7 \text{ kg/m}^3$. Ti peleti so imeli največjo vsebnost vode in povprečno mehansko obstojnost pri tem proizvajalcu.

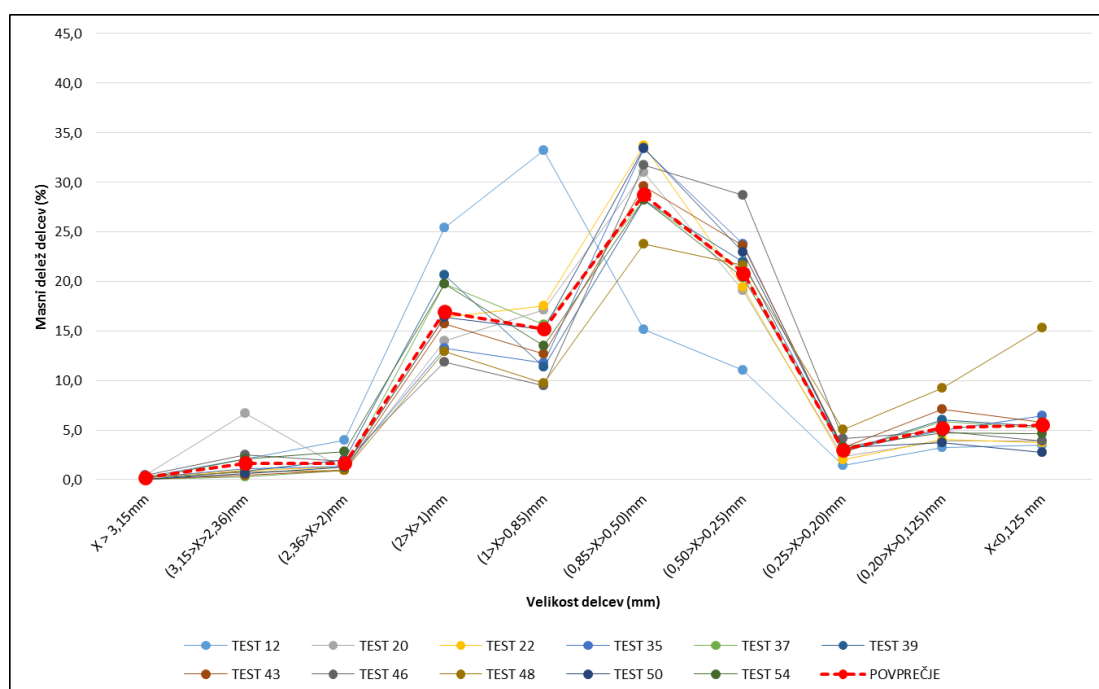
4.1.1.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu A

Porazdelitev velikosti delcev v surovini smo pri proizvajalcu A določili na 11 vzorcih. Šele pri tretjem vzorčenju smo uspeli surovino odvzeti za finim mlinom, za katerim gre surovina direktno v proizvodnjo peletov. Glede na sita, ki smo jih imeli na razpolago, smo delce razporedili v 10 velikostnih razredov. Največji delci (x) so bili v velikostnem

razredu $x > 3,15$ mm, najmanjši delci pa v razredu $x < 125$ μm . Želeli smo ugotoviti, če porazdelitev velikosti delcev vpliva na mehansko obstojnost.

Masni deleži delcev surovine po posameznih velikostnih razredih so prikazani na sliki 32. S črtkano rdečo črto je na grafu označena povprečna vrednost masnega deleža delcev po velikostnih razredih. Največji masni delež delcev je bil dosežen v velikostnem razredu ($0,85 > x > 0,50$) mm in sicer v povprečju 28,8 %, najmanjši pa v velikostnem razredu $x > 3,15$ mm. V razred z največjo velikostjo delcev je bilo povprečno uvrščenih le 0,21 % vseh delcev. Iz grafa lahko razberemo, da je bila porazdelitev delcev pri posameznih vzorcih surovine dokaj konstantna. Izstopal je le vzorec surovine Test 12. Iz vzorca surovine Test 12 so bili narejeni peleti Test 13. Ti peleti so imeli slabšo mehansko obstojnost in po vrednosti mehanske obstojnosti niso dosegli kriterija za uvrstitev v kakovostni razred B. V primerjavi z ostalimi vzorci surovine je imel vzorec Test 12 večji masni delež delcev, ki so bili večji od 0,85 mm. Po porazdelitvi velikosti delcev je nekoliko izstopal tudi vzorec surovine Test 48, ki je imel večji masni delež delcev manjših od 0,2 mm. Peleti Test 49, ki so bili narejeni iz te surovine, so imeli povprečno mehansko obstojnost pri tem proizvajalcu.

Najnižja mehanska obstojnost peletov je bila dosežena pri Testu 47, ti peleti so bili narejeni iz surovine Test 46. Če se osredotočimo le na velikost delcev v tej surovini, potem lahko vidimo, da je bil pri tem vzorcu večji masni delež delcev v velikostnem razredu ($0,50 > x > 0,25$) mm v primerjavi z ostalimi vzorci surovine. Najboljša mehanska obstojnost je bila dosežena pri vzorcu peletov Test 23, tukaj pa so masni deleži delcev po velikostnih razredih sovpadali s povprečnimi vrednostmi vseh vzorcev surovine pri proizvajalcu A.



Slika 32: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu A

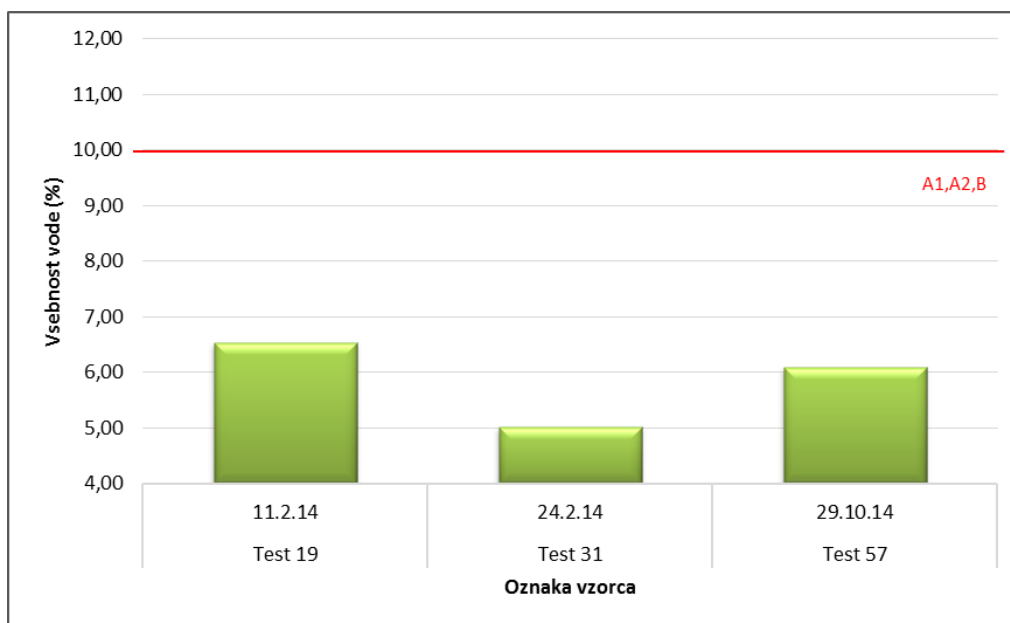
Figure 32: Particle size distribution of raw material at the producer A

4.1.2 Proizvajalec B

Pri proizvajalcu B smo vzorčili trikrat. Uporabljali so smrekovo žaganje, ki so mu dodali približno 0,75 % koruznega škroba. Pred tretjim vzorčenjem so zamenjali matrico. Ker so imeli probleme s proizvodnim procesom, so pri tretjem vzorčenju smrekovini dodajali 3 % škroba. S povečanjem deleža škroba so želeli optimizirati proizvodnjo peletov.

4.1.2.1 Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu B

V proizvodnji peletov so dodajali vodo v obliki razpršene megle. Iz slike 33 lahko razberemo, da vsebnost vode v peletih nikoli ni presegla meje 10 % za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 in B in tudi sicer je bila vsebnost vode v peletih precej nizka. Surovino smo pri proizvajalcu B odvzeli že po sušenju. Ko smo primerjali vsebnost vode v surovini in peletih iz te surovine, je bila v enem primeru razlika celo večja od 8 %. To pomeni, da se je v procesu proizvodnje peletov surovina še dodatno posušila. Povprečna vsebnost vode v teh vzorcih peletov je bila 5,9 %, razlika med maksimalno in minimalno vsebnostjo pa je bila 1,5 %. V povprečju je imel ta proizvajalec v peletih najnižjo vsebnost vode med vsemi obravnavanimi proizvajalci.

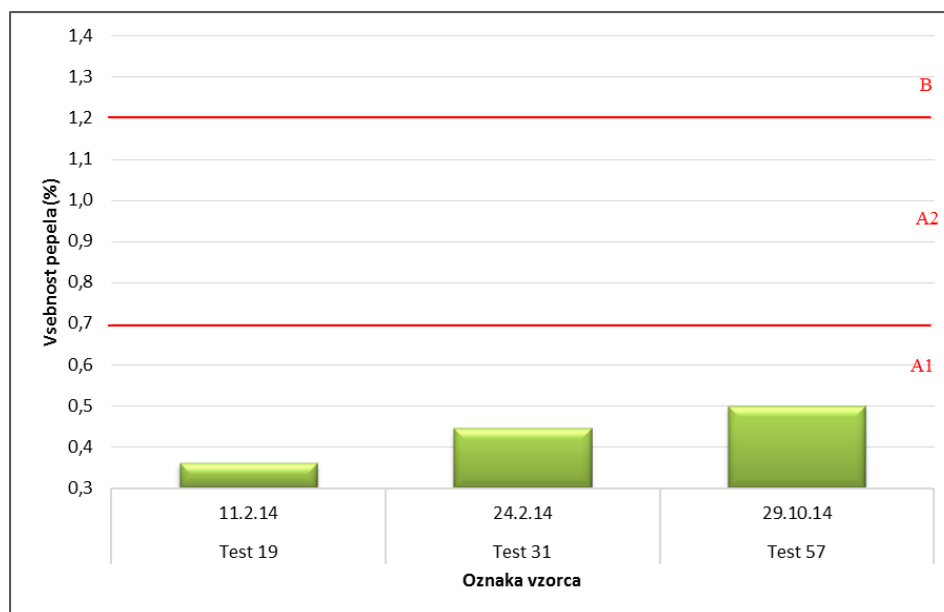


Slika 33: Vsebnost vode v vzorcih peletov proizvajalca B, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 33: Moisture content in samples of pellets at the producer B; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.2.2 Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu B

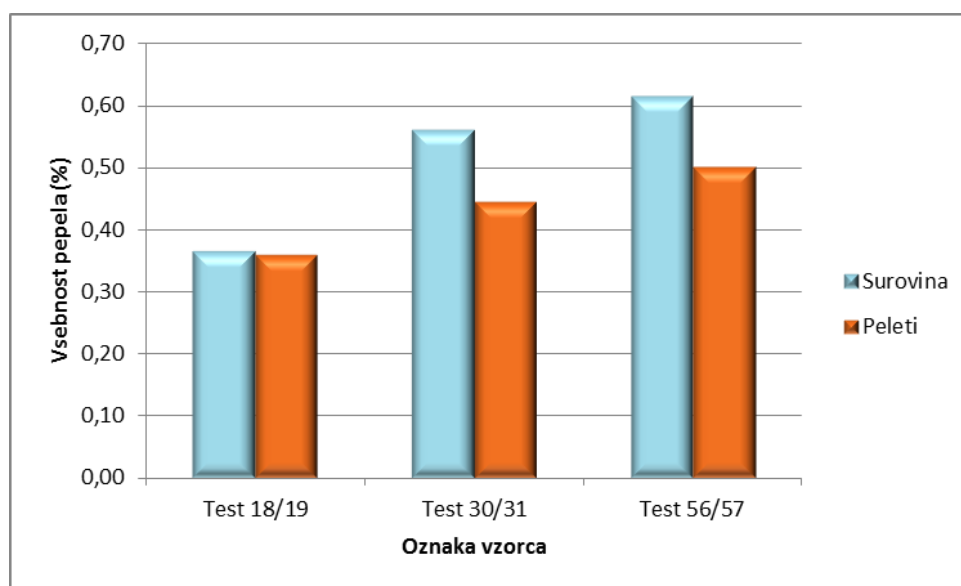
Pri proizvajalcu B so peleti vsebovali le od 0,36 do 0,50 % pepela in v povprečju 0,44 %, kar je bila najnižja vsebnost med vsemi proizvajalci, ki smo jih obravnavali. Pri prvih dveh vzorčenjih so peleti vsebovali 0,75 % koruznega škroba. Vsebnost pepela v peletih nam prikazuje slika 34. Po vsebnosti pepela pelete, ki jih izdeluje proizvajalec B, uvrščamo v kakovostni razred A1.



Slika 34: Vsebnost pepela v vzorcih peletov pri proizvajalcu B, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 34: Ash content in samples of pellets at the producer B; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Primerjali smo tudi vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine. Na sliki 35 lahko vidimo, da je bila vsebnost pepela primerljiva. To je eden izmed pokazateljev, da smo pri vzorčenju odvzeli res tisto surovino, iz katere so bili potem narejeni peleti. Največja razlika je bila 0,12 %, kar je znotraj dovoljene razlike $R = 0,3 \%$ (absolutno), ki jo dopušča standard za določanje vsebnosti pepela.



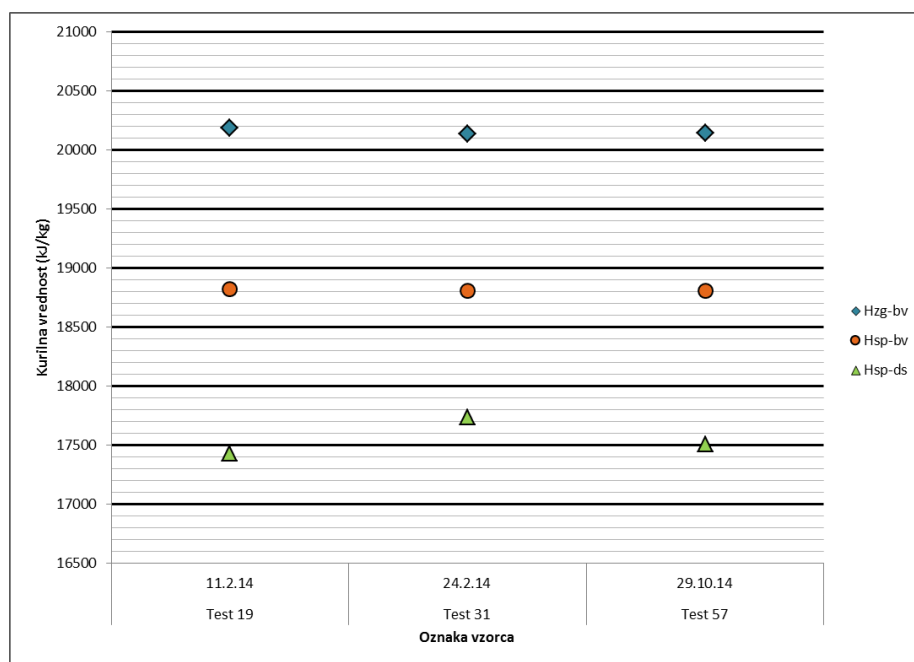
Slika 35: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu B

Figure 35: Ash content in raw material and pellets from that raw material at the producer B

4.1.2.3 Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu B

Ker proizvajalec B uporablja le smrekov les, smo pričakovali višje kurilnosti, saj je znano, da imajo iglavci višjo kurilnost kot listavci. Ker je šlo za enako sestavo peletov, je bila kurilnost pri vseh treh vzorčenjih primerljiva, kar ponazarja slika 36. Do razhajanja je prišlo le pri spodnji kurilnosti peletov v dostavljenem stanju, vzrok pa je bila različna vsebnost vode. Najnižja vrednost je bila pri prvem vzorčenju, ker so peleti vsebovali največ vode ter najvišja pri drugem vzorčenju, kjer je bila vsebnost vode najnižja.

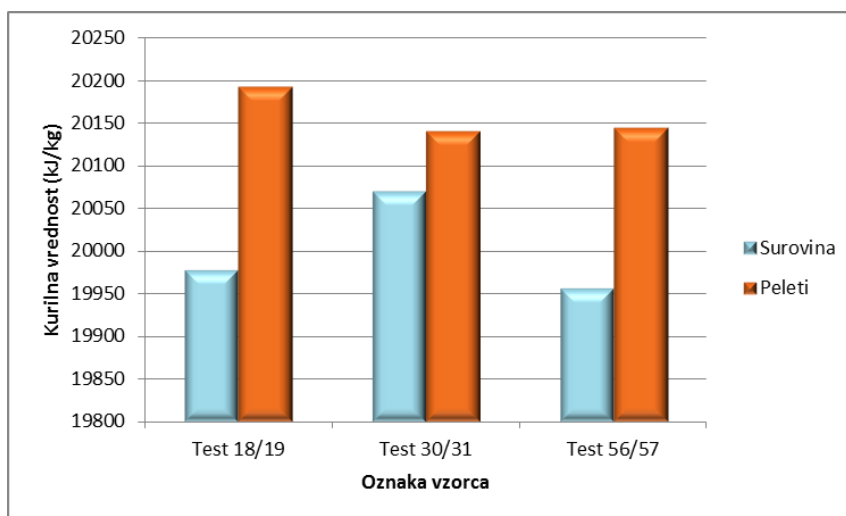
Za vse tri kakovostne razrede peletov A1, A2 in B standard za klasifikacijo peletov zahteva spodnjo kurilnost dostavljenih peletov vsaj 16500 kJ/kg. Vsi vzorci peletov pri tem proizvajalcu so ta kriterij brez problemov dosegli.



Slika 36: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hrg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu B

Figure 36: Gross and net calorific value for dry samples of pellets (Hrg-bv, Hsp-bv) and net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at the producer B

Največja razlika med zgornjo kurilnostjo surovine in peletov v suhem stanju je bila 215 kJ/kg, kar prikazuje slika 37. To je bilo znotraj dovoljene razlike 300 kJ/kg, ki jo predpisuje standard za določanje kurilnosti.

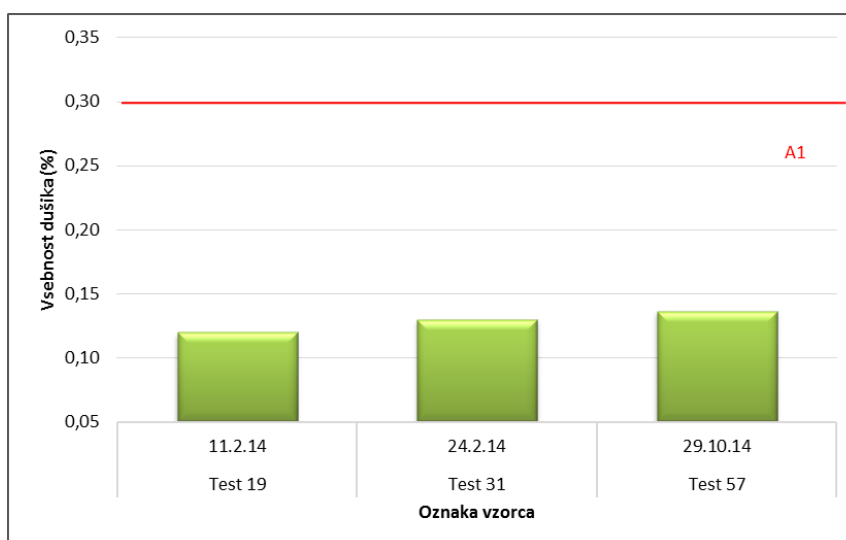


Slika 37: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu B

Figure 37: Gross calorific value for dry samples (Hzg-bv) of raw material and samples of pellets from that raw material at the producer B

4.1.2.4 Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu B

Vsi trije vzorci peletov so imeli podobno vsebnost dušika, kar smo tudi pričakovali, saj gre za enako surovinsko sestavo. Standard za razvrščanje peletov zahteva vsebnost dušika $\leq 0,3 \%$, kar je na sliki 38 ponazorjeno z rdečo črto. Iz grafa vidimo, da je bil ta kriterij pri vseh treh vzorcih peletov dosežen. Podobna je bila tudi vsebnost dušika v sami surovini.



Slika 38: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu B, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 38: Nitrogen content in samples of pellets at the producer B; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.2.5 Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu B

Pri prvem in drugem vzorčenju je bila mehanska obstojnost peletov znotraj razreda B, pri tretjem vzorčenju pa lahko pelete razvrstimo v razred A1, kar je razvidno iz slike 39.



Slika 39: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu B, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 39: Mechanical durability of pellets at the producer B; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Pred tretjim vzorčenjem je proizvajalec zamenjal matrico. Pri novi matrici je prišlo do prevelikega trenja v matrici, kar se je videlo po večji porabi elektrike, peleti so dajali videz, kot bi bili ožgani. Sicer so imeli običajno dolžino. Zaradi omenjenega problema je proizvajalec dodajal več koruznega škroba, ki v matrici deluje tudi kot mazivo. Vendar pa so bili v tem primeru peleti krajši, sklepali so tudi, da je slabša mehanska obstojnost. Tudi to je bil razlog, da so dodajali več koruznega škroba. Kljub dodajanju več škroba (3 %), pa se je po porabi elektrike še vedno videlo, da je trenje preveliko. Problem so poizkušali rešiti tudi s spreminjanjem nastavitev (npr. valji bližje ali bolj daleč od matrice), vendar neuspešno. Iz slike 39 lahko razberemo, da so imeli ravno peleti iz tretjega vzorčenja najboljšo mehansko obstojnost. Torej je bila bojazen proizvajalca, da peleti ne bi dosegli ustrezne mehanske obstojnosti odveč. Če bi proizvajalec pravočasno analiziral obstojnost, bi lahko bolj pravilno pristopil k težavi, saj mu mehanska obstojnost dejansko ni povzročala problemov.

Povprečna mehanska obstojnost vzorcev peletov pri tem proizvajalcu je bila 97,52 %, kar jih uvršča v kakovostni razred A1.

Pri tem proizvajalcu nismo ugotavljali, ali sta vsebnost vode in pepela v peletih pokazatelja mehanske obstojnosti, saj sta večjo vlogo pri obstojnosti imela obrabljenost matrice in dodajanje škroba.

4.1.2.6 Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu B

Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu B je bila med 654 in 665 kg/m³, kar prikazuje slika 40. Gre za minimalno razliko v vrednostih. Največjo gostoto nasutja peletov pri tretjem vzorčenju bi lahko pripisali tudi temu, da so bili peleti krajši. Peleti iz vseh vzorčenj zadoščajo kriteriju za uvrstitev v vse tri razrede, kar na grafu označuje rdeča črta.



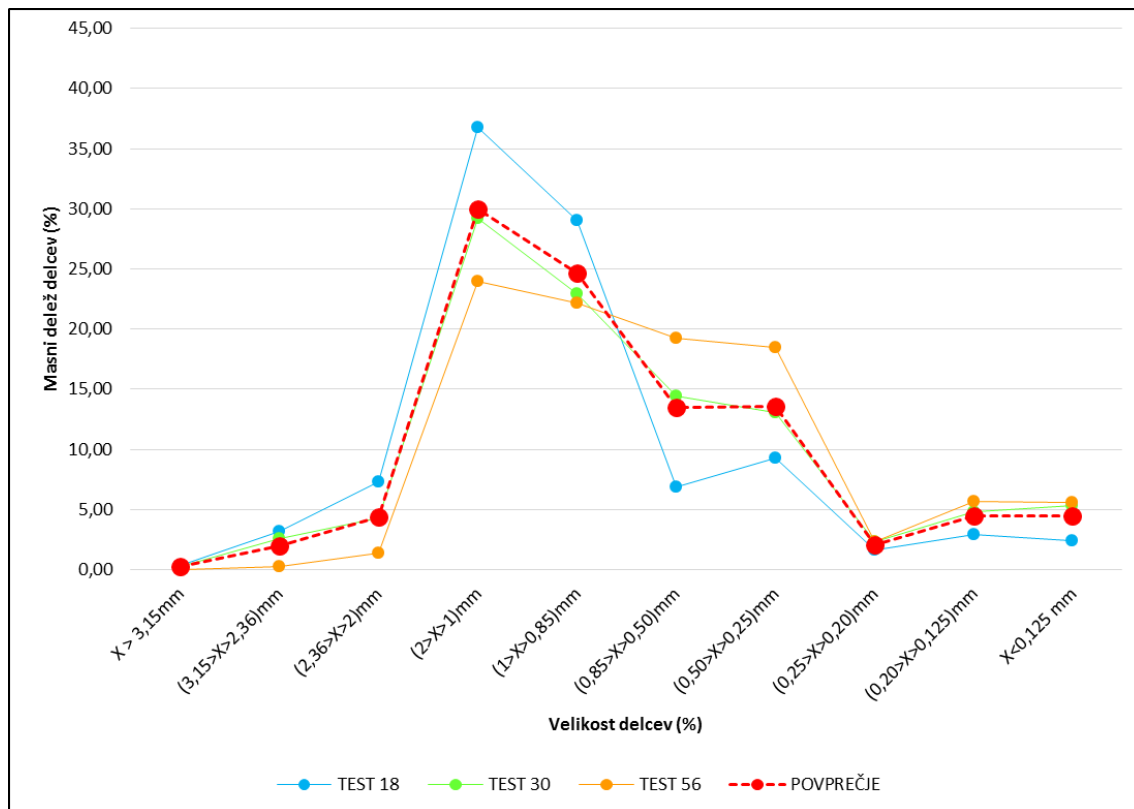
Slika 40: Gostota nasutja vzorcev peletov proizvajalca B, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 40: Bulk density in samples of pellets at the producer B; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.2.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu B

Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu B smo določili na treh vzorcih. Največji masni delež delcev je bil v velikostnem razredu od 1 do 2 mm, najmanjši masni delež pa je bil določen v velikostnem razredu $x > 3,15$ mm. Pri tretjem vzorcu v surovini sploh ni bilo prisotnih delcev večjih od 3,15 mm. Masni deleži delcev po posameznih velikostnih razredih so prikazani na sliki 41. Najboljša mehanska obstojnost je bila dosežena pri peletih narejenih iz surovine Test 56, ki je imela v primerjavi z ostalima dvema vzorcema surovine večji masni delež delcev, ki so bili

manjši od 0,85 mm. Rdeča črtkana črta na grafu prikazuje povprečje masnih deležev delcev po velikostnih razredih vseh treh vzorcev proizvajalca B.



Slika 41: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu B

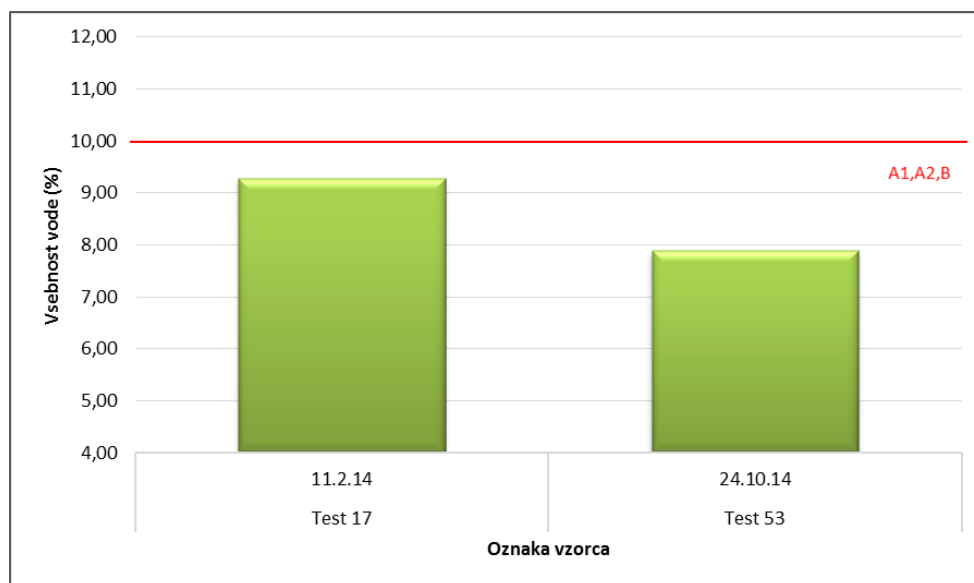
Figure 41: Particle size distribution of raw material at the producer B

4.1.3 Proizvajalec C

Pri proizvajalcu C smo vzorce peletov in surovine odvzeli februarja in oktobra 2014. V tem vmesnem obdobju ni prišlo do posegov v peletirno napravo, zato smo pričakovali, da bo matrica bolj obrabljena. Njihovi peleti so bili sestavljeni le iz smreke. Smrekovo surovino je sestavljalo 50 % skobljancev, 30 % sekancev in 20 % žaganja.

4.1.3.1 Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu C

Pri proizvajalcu C je vsebnost vode v peletih vedno dosegla kriterij za razvrstitev v kakovostni razred A1, A2 oziroma B, kar prikazuje rdeča črta na sliki 42. Pri drugem vzorčenju je bila vsebnost vode v peletih skoraj 1,5 % nižja.



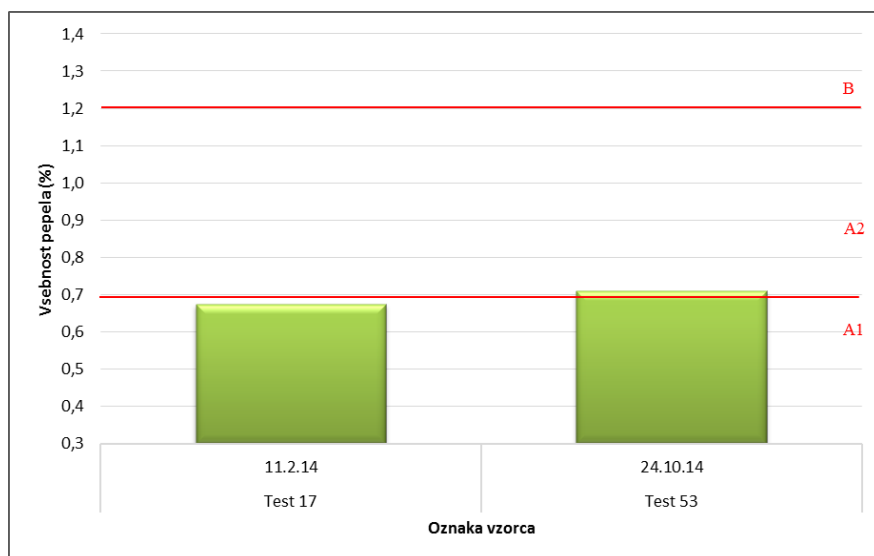
Slika 42: Vsebnost vode v vzorcih peletov pri proizvajalcu C, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 42: Moisture content in samples of pellets at the producer C; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Primerjave med vsebnostjo vode v peletih in surovini nismo naredili, saj surovina pri odvzemu še ni bila dokončno posušena in primerjava ne bi bila smiselna. Surovino smo sicer odvzeli iz peletirne naprave, vendar se je le-ta v nadaljnjem procesu peletiranja še dodatno posušila.

4.1.3.2 Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu C

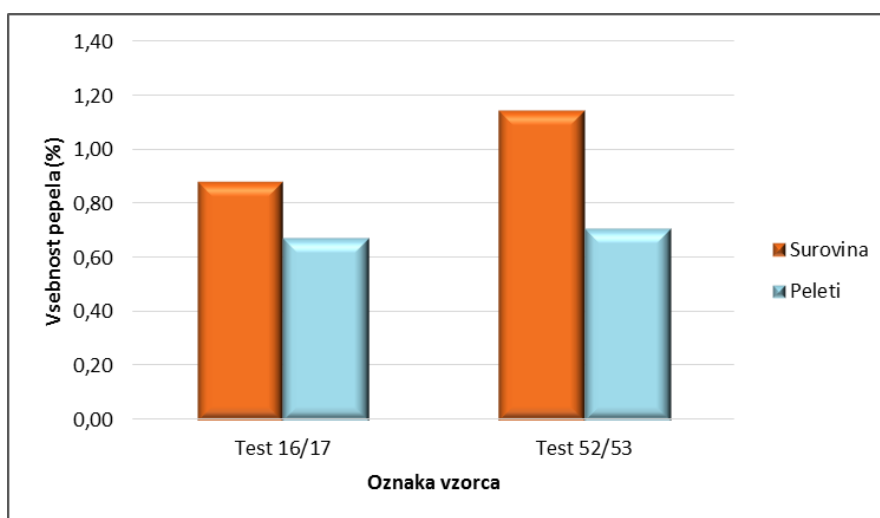
Na sliki 43, ki prikazuje vsebnost pepela v peletih proizvajalca C, lahko vidimo, da sta bili vrednosti obeh vzorcev ravno okoli 0,7 %. Ta vrednost je na grafu ponazorjena z rdečo črto in razmejuje kakovostni razred A1 in A2. V prvem primeru smo pelete še lahko uvrstili v razred A1, v drugem primeru pa so z vsebnostjo pepela 0,71 % padli že v razred A2.



Slika 43: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu C, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 43: Ash content in samples of pellets at the producer C; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Primerjali smo vsebnost pepela v surovini in peletih, ki smo jih dobili iz te surovine. V drugem primeru lahko vidimo (slika 44), da je bila razlika v vsebnosti pepela pri surovini in peletih precejšnja. Dovoljena razlika skladno s standardom za določevanje pepela je 0,3 %, v našem primeru pa je razlika znašala 0,44%. Iz tega lahko sklepamo, da vzorca surovine oziroma peletov nismo pravilno odvzeli. Pri našem vzorčenju je peletirna naprava mirovala in proizvajalec nam je predlagal, naj vzamemo zadnjo narejeno vrečo peletov in surovino, ki se še nahaja v peletirni napravi. Na ta način naj bi si zagotovili pravi vzorec, vendar se to ni obneslo.



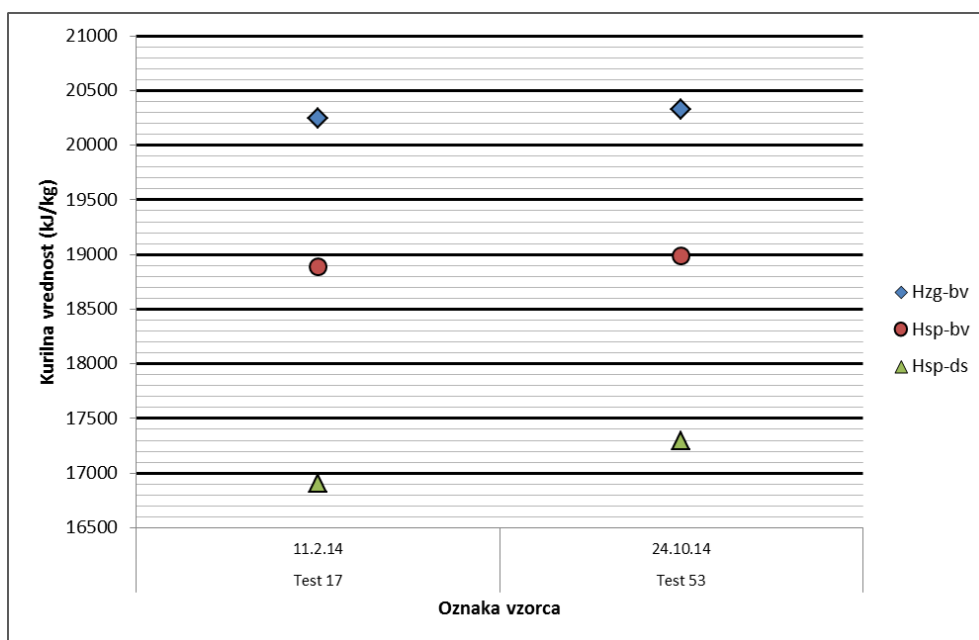
Slika 44: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu C

Figure 44: Ash content in raw material and pellets from that raw material at the producer C

4.1.3.3 Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu C

Zgornja in spodnja kurilnost peletov, ki je bila preračunana na suho stanje peletov, se med prvim in drugim vzorčenjem skoraj ni razlikovala, kar ponazarja tudi slika 45. Glede na to, da je šlo za enako surovinsko sestavo, smo take vrednosti tudi predvideli. Do razlike je prišlo pri spodnji kurilnosti, ki je določena v dostavljenemu stanju peletov. Pri drugem vzorčenju je bila kurilnost za 390 kJ/kg višja in sicer na račun vsebnosti vode v peletih, ki je bila za 1,5 % nižja kot pri peletih iz prvega vzorca.

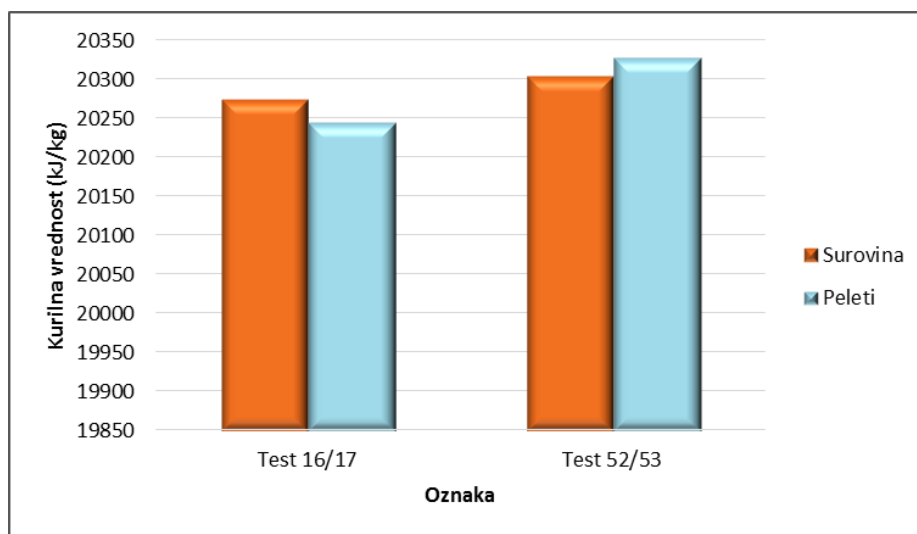
Oba vzorca peletov lahko uvrstimo v kakovostni razred A1, A2 oziroma B, saj je bila v obeh primerih spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju višja od mejne vrednosti 16500 kJ/kg.



Slika 45: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu C

Figure 45: Gross and net calorific value for dry samples of pellets (Hzg-bv, Hsp-bv) and net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at the producer C

Iz slike 46 lahko razberemo, da ni bilo velike razlike v kurilnosti med surovino in peleti. Razlika je bila med 20 in 30 kJ/kg.

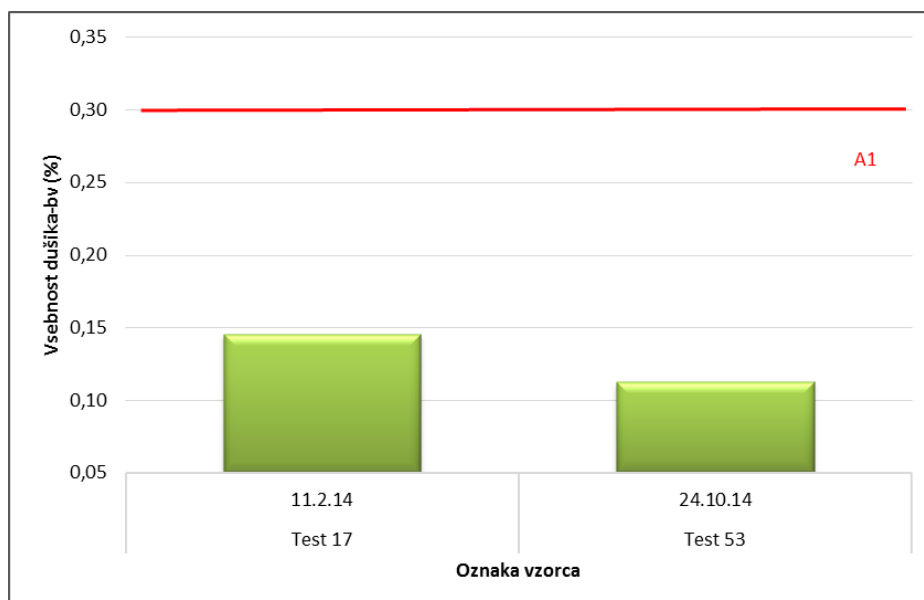


Slika 46: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu C

Figure 46: Gross calorific value for dry samples (Hzg-bv) of raw material and samples of pellets from that raw material at the producer C

4.1.3.4 Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu C

Ker je šlo za enako surovinsko sestavo peletov, je bila tudi vsebnost dušika v peletih primerljiva. Oba vzorca sta imela vsebnost dušika nižjo od 0,15 %, zahtevana meja za klasifikacijo v razred A1 pa je $\leq 0,3$ % vsebnosti dušika (slika 47).



Slika 47: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu C, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

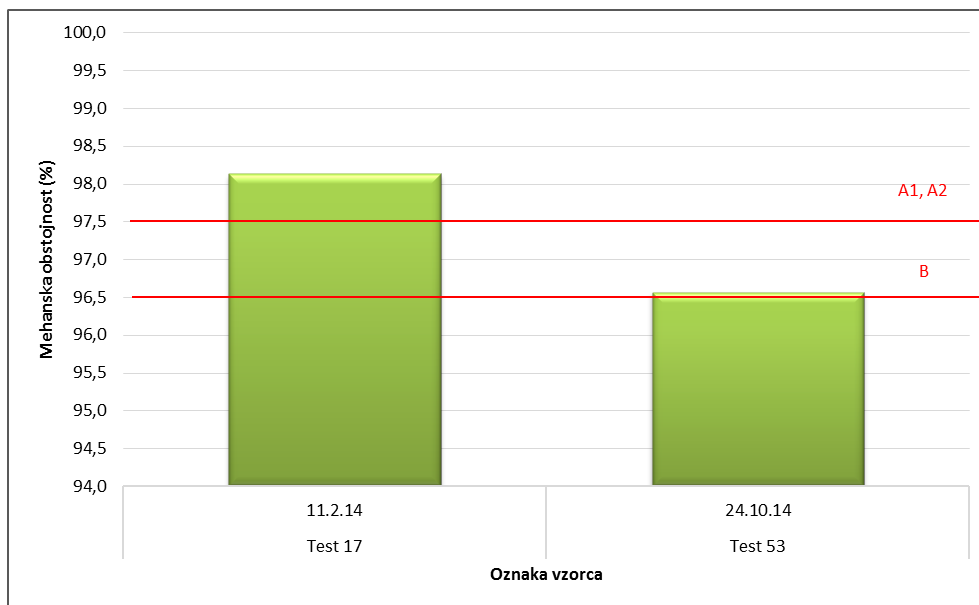
Figure 47: Nitrogen content in samples of pellets at the producer C; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Vsebnost dušika v surovini in peletih je bila pri prvem vzorcu peletov in surovine enaka, v drugem primeru pa se je razlikovala za 0,02 %.

4.1.3.5 Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu C

Pri drugem vzorcu smo v primerjavi s prvim vzorcem pričakovali slabšo mehansko obstojnost peletov. V osem mesečnem obdobju med našima dvema vzorčenjema proizvajalci matrice niso zamenjali ali obnovili, kar je bila ustaljena praksa pri ostalih proizvajalcih. Bolj izrabljena matrica pa naj bi prispevala k slabši mehanski obstojnosti.

Naše domneve so potrdili tudi rezultati, ki so prikazani na sliki 48, saj je mehanska obstojnost peletov v prvem vzorcu znašala 98,1 % in tako so peleti dosegli kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A1 oz. A2. Pri drugem vzorcu peletov, ko je bila matrica že obrabljena, pa je bila mehanska obstojnost za 1,6 % nižja. V tem primeru uvrščamo pelete v razred B.



Slika 48: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu C, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 48: Mechanical durability of pellets at the producer C; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

4.1.3.6 Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu C

Gostoto nasutja peletov pri proizvajalcu C smo ponazorili na sliki 49. Pri obeh vzorcih peletov je bila gostota nasutja okoli 620 kg/m^3 . Oba vzorca zadoščata kriteriju uvrstitve v vse tri kakovostne razrede. Čeprav je bila pri drugem vzorcu peletov mehanska

obstojnost peletov bistveno nižja, pa to ni imelo pomembnega vpliva na gostoto nasutja, če jo primerjamo s prvim vzorcem peletov.

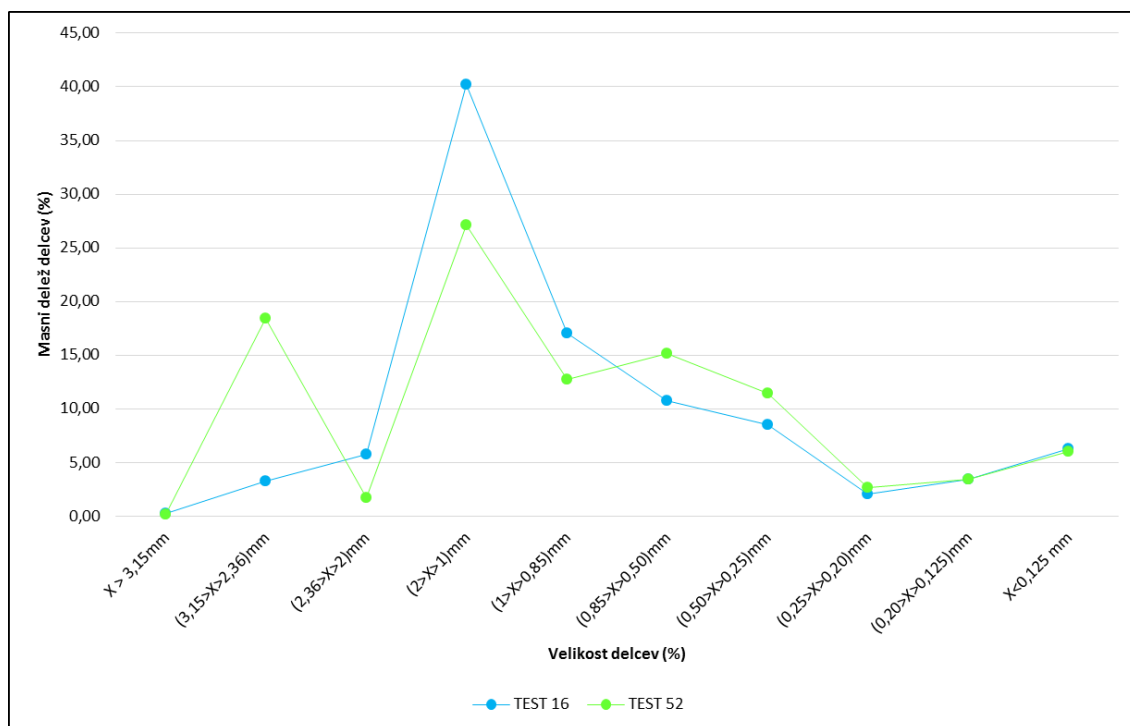


Slika 49: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu C, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 49: Bulk density in samples of pellets at the producer C; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.3.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu C

Na dveh vzorcih surovine Test 16 in 52 proizvajalca C smo naredili sejnalno analizo in porazdelili delce po velikostnih razredih. Iz slike 50 lahko vidimo, da je prišlo do odstopanja v masnem deležu delcev v velikostnem razredu od 2,36 mm do 3,15 mm. Vzorec surovine Test 52 je imel v tem razredu večji masni delež in sicer 18,4 %, kar je odstopalo tudi od povprečja vzorcev surovine vseh proizvajalcev, na katerih smo določili porazdelitev velikosti delcev. Vzorec peletov Test 17, ki je bil narejen iz surovine vzorca Test 16, je imel za 1,5 % boljšo mehansko obstojnost kot peleti, ki so bili narejeni iz surovine vzorca Test 52. Tudi pri tem proizvajalcu se je izkazalo, da večji masni delež večjih delcev slabo vpliva na mehansko obstojnost.



Slika 50: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu C

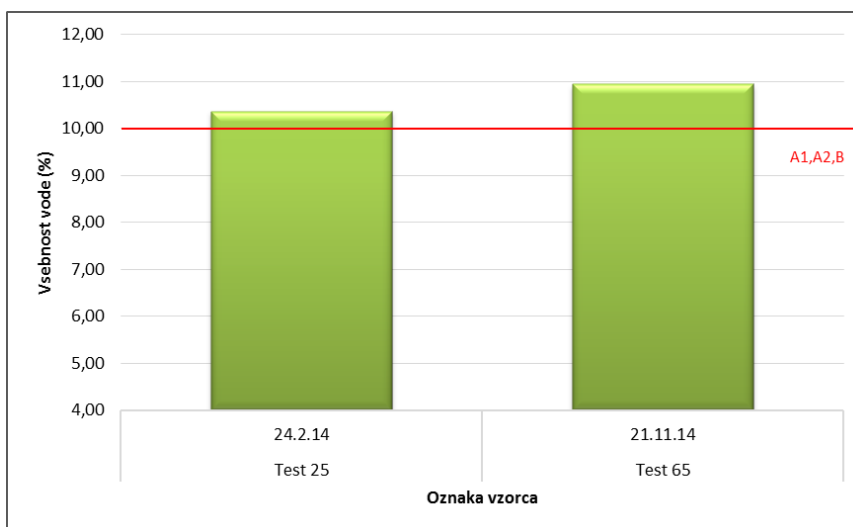
Figure 50: Particle size distribution of raw material at the producer C

4.1.4 Proizvajalec D

Pri proizvajalcu D smo vzorčili dvakrat. Pri prvem vzorčenju februarja 2014 je surovino sestavljalo 95 % smreke, ostalo pa je predstavljala bukev, hrast in bor. Pri drugem vzorčenju novembra 2014 pa je bilo v surovini 90 % smreke in 10 % bukve.

4.1.4.1 Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu D

Pri obeh vzorčenjih pri proizvajalcu D je bila vsebnost vode v peletih višja od 10 %, kar je grafično prikazano na sliki 51. Vsebnost vode v peletih je bila previsoka za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 oziroma B. Vsebnost vode v surovini, ki je bila že sušena in odvzeta iz peletirne naprave, je bila pri prvem vzorčenju 15,9 % in pri drugem vzorčenju 11,4 %. Sklepamo lahko, da se vsebnost vode v surovini v procesu peletiranja še spreminja in iz vsebnosti vode v surovini v tem primeru ne moremo sklepati na vsebnost vode v peletih.

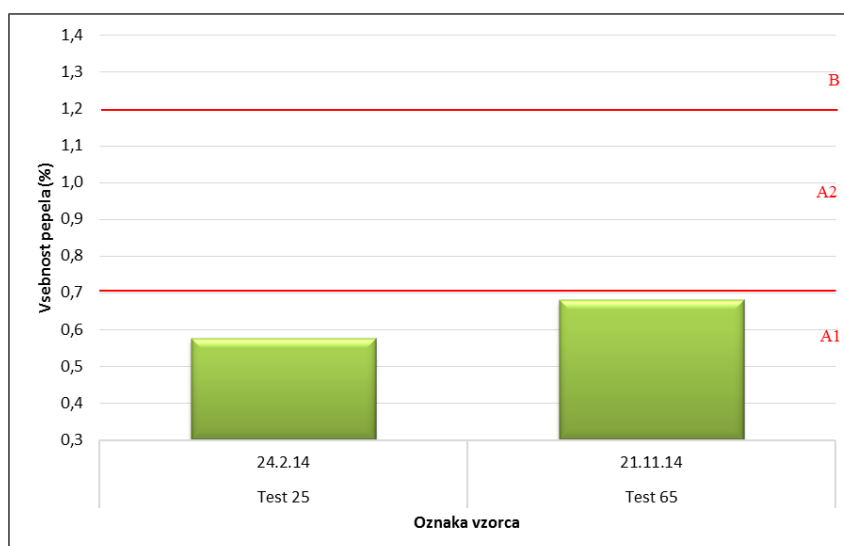


Slika 51: Vsebnost vode v vzorcih peletov pri proizvajalcu D, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 51: Moisture content in samples of pellets at the producer D; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.4.2 Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu D

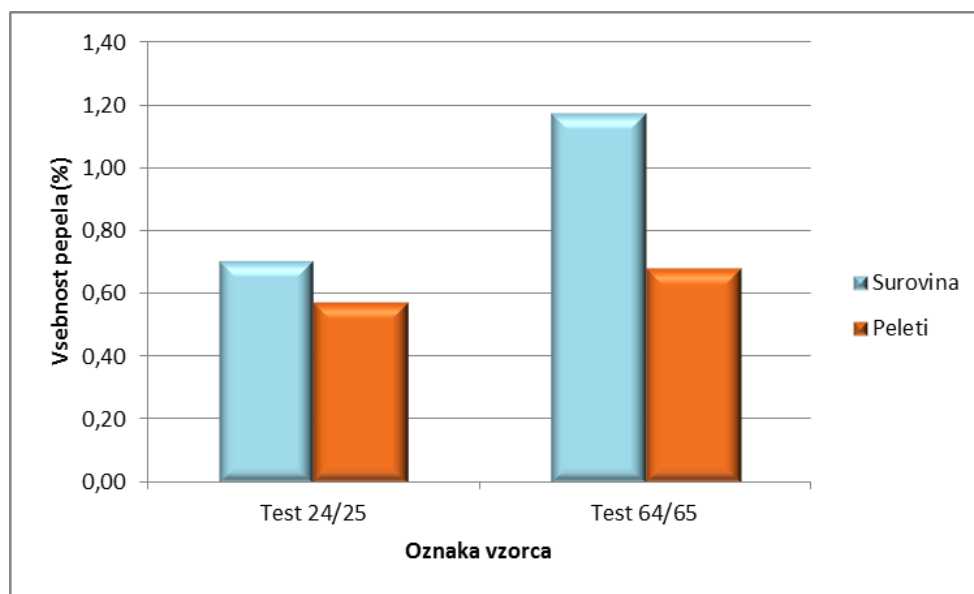
Oba vzorca peletov sta vsebovala manj kot 0,7 % pepela, kar je zgornja meja za uvrstitev v kakovostni razred A1. Pri prvem vzorčenju je bila pri peletih, ki so vsebovali 95 % smreke, vsebnost pepela 0,58 %, pri drugem vzorčenju pa so peleti sestavljeni iz 90 % smreke vsebovali 0,68 % pepela.



Slika 52: Vsebnost pepela v vzorcih peletov pri proizvajalcu D, rdeči črte na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 52: Ash content in samples of pellets at the producer D; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Na sliki 53 lahko vidimo, da vsebnost pepela v surovini in peletih pri drugem vzorčenju ni bila primerljiva. Razlika v vsebnosti pepela v surovini in peletih je bila prevelika, saj je znašala 0,5 %. Dovoljena razlika skladno s standardom za določanje pepela je 0,3 %. Iz tega lahko sklepamo, da vzorec surovine ali peletov ni bil pravilno odvzet. Pri tem proizvajalcu imajo kompleksno in veliko peletirno napravo, zato je bil odvzem surovine iz naprave zahteven. Ocenili smo, kje in kdaj približno moramo odvzeti surovino, da bodo potem iz te surovine v procesu peletiranja nastali tudi peleti. Kot kažejo rezultati, pa smo se pri oceni verjetno zmotili.

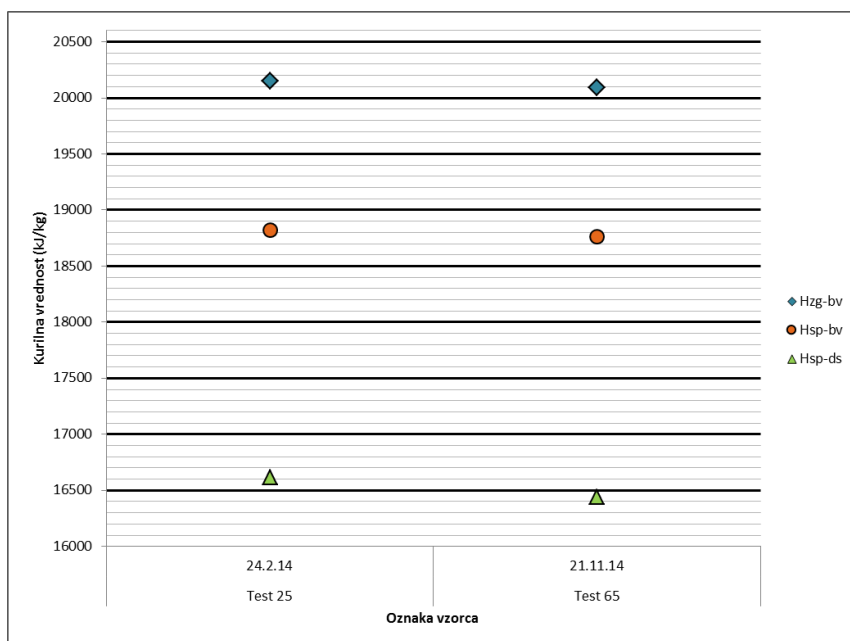


Slika 53: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu D

Figure 53: Ash content in raw material and pellets from that raw material at the producer D

4.1.4.3 Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu D

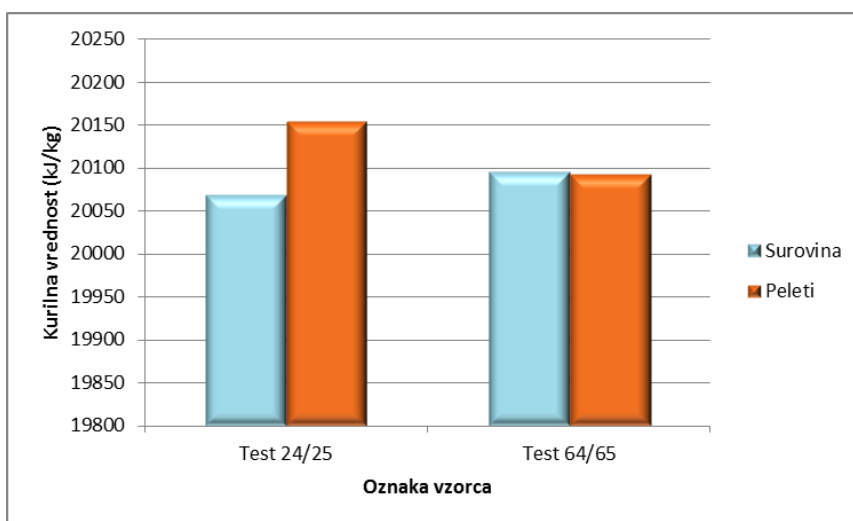
Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju pri proizvajalcu D sta bili primerljivi s kurilnostjo pri ostalih proizvajalcih. Spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju pa je bila v primerjavi z ostalimi proučevanimi proizvajalci nekoliko nižja. Razlog je bil v tem, da so peleti vsebovali več kot 10 % vode, kar neposredno vpliva na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju. Vzorec peletov Test 65 je imel najnižjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju med vsemi vzorci peletov pri vseh proizvajalcih. Zahtevana vrednost kurilnosti peletov v dostavljenem stanju za razvrstitev v vse tri kakovostne razrede je 16500 kJ/kg. Prvi vzorec peletov pri proizvajalcu D zadošča temu kriteriju, pri drugem vzorcu dostavljenih peletov pa je bila kurilnost za 63 kJ/kg prenizka. To je ponazorjeno tudi na sliki 54.



Slika 54: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu D

Figure 54: Gross and net calorific value for dry samples of pellets (Hzg-bv, Hsp-bv) and net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at the producer D

Graf na sliki 55 prikazuje zgornjo kurilnost surovine in peletov iz te surovine v suhem stanju. V prvem primeru je bila razlika v kurilnosti med surovino in peleti 85 kJ/kg, v drugem primeru pa le 3 kJ/kg. To je znotraj dovoljene, ki jo predpisuje standard za določanje kurilnosti.

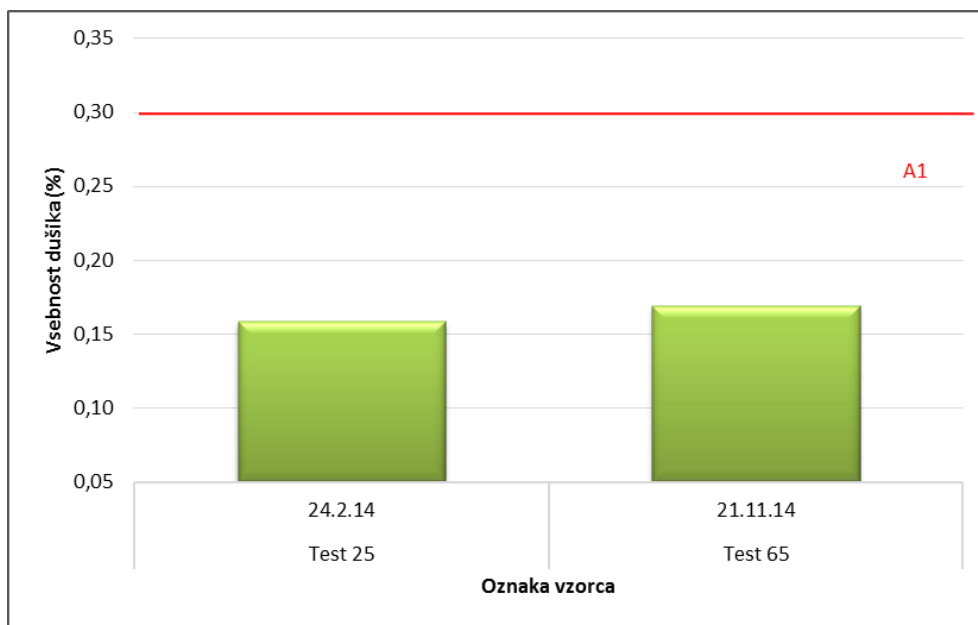


Slika 55: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu D

Figure 55: Gross calorific value for dry samples (Hzg-bv) of raw material and samples of pellets from that raw material at the producer D

4.1.4.4 Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu D

Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu D je bila pri obeh vzorcih med 0,16 % in 0,17 %, kar je znotraj območja za kakovostni razred A1, ki ga na spodnji sliki 56 ponazarja rdeča črta. Vsebnost dušika v surovini pri drugem vzorčenju je bila 0,25 %. V tem primeru je bila razlika v vsebnosti dušika v surovini in peletih večja, kot jo dovoljuje standard za določanje ogljika, dušika in vodika v trdnih biogorivih.

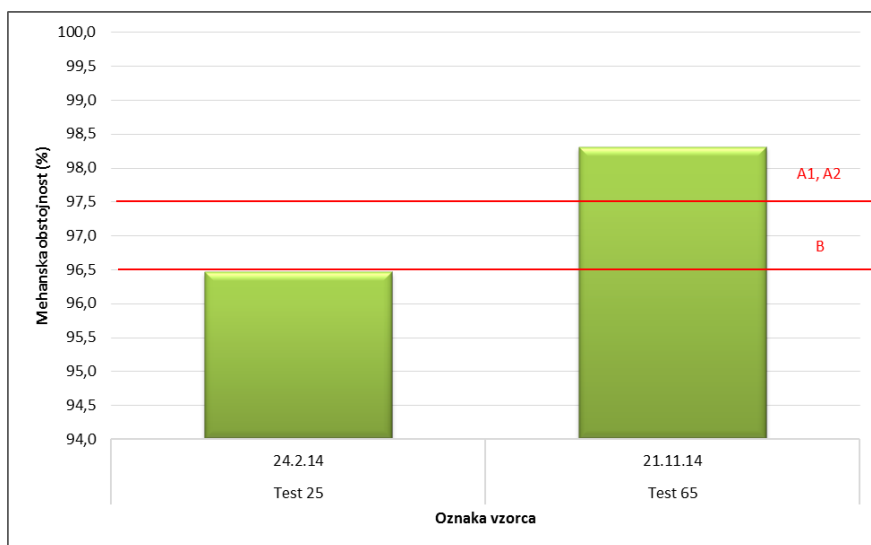


Slika 56: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu D, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 56: Nitrogen content in samples of pellets at the producer D; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.4.5 Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu D

Vzorec peletov pri prvem vzorčenju je z vrednostjo mehanske obstojnosti 96,46 % ravno za malo zgrešil uvrstitev v kakovostni razred B, kar lahko razberemo iz slike 57. Drugi vzorec peletov pa lahko z vrednostjo mehanske obstojnosti 98,31 % uvrstimo v kakovostni razred A1. Razlika v mehanski obstojnosti med obema vzorcema peletov pri tem proizvajalcu je bila tako skoraj 2 %, čeprav sta imela vzorca dokaj podobno surovinsko sestavo. Do razlike med obema vzorcema je prišlo pri masnih deležih velikosti delcev v surovini, kar je opisano v poglavju 4.1.4.7.

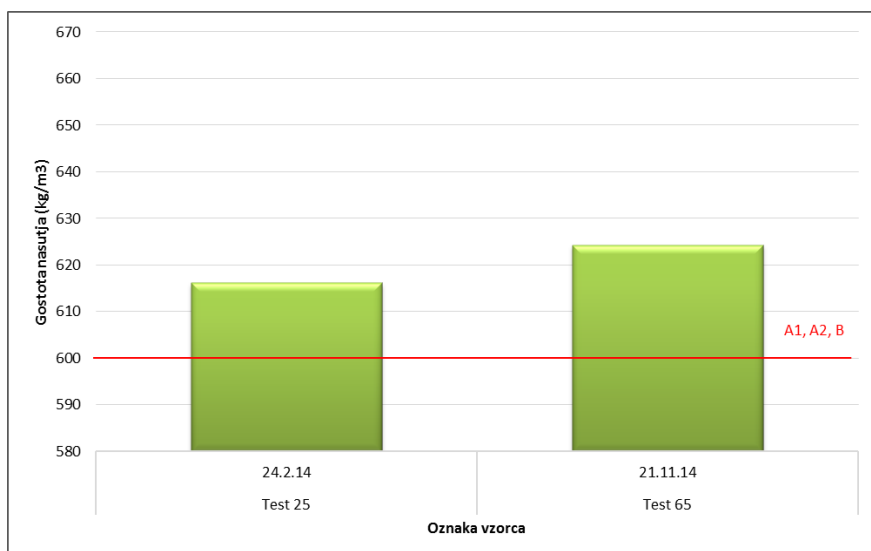


Slika 57: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu D, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 57: Mechanical durability of pellets at the producer D; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

4.1.4.6 Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu D

Z vrednostjo gostote nasutja so peleti proizvajalca D pri obeh vzorcih dosegli kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A1, A2 in B, kar prikazuje slika 58. Razlika med obema vzorcema je bila 8 kg/m^3 . Pri tako majhni razliki v gostoti nasutja med vzorcema in le pri dveh odvzetih vzorcih težko govorimo o razlogih za take vrednosti.



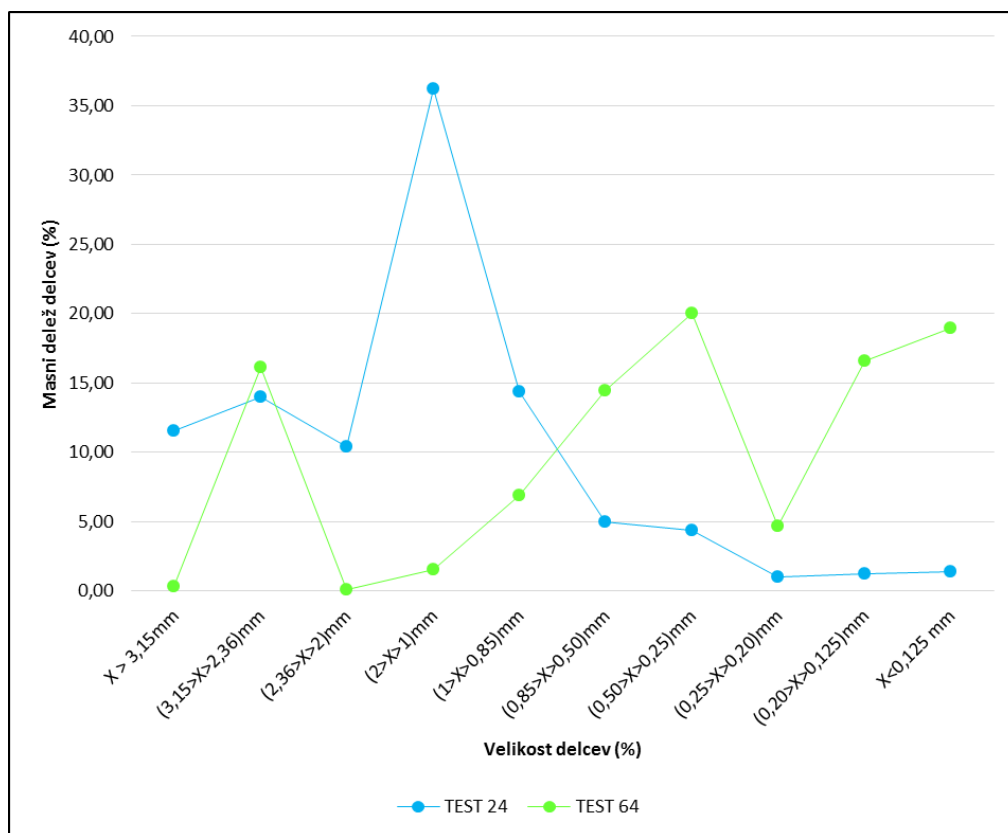
Slika 58: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu D, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 58: Bulk density in samples of pellets at the producer D; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.4.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu D

Porazdelitev velikosti delcev v vzorcih surovine pri proizvajalcu D se je med obema vzorcema precej razlikovala. Vzorec surovine Test 24 je imel največji masni delež delcev v velikostnem razredu od 1 do 2 mm. Vzorec surovine Test 64 pa je imel masni delež delcev od 16 % do 20 % kar v štirih velikostnih razredih in sicer v razredu z velikostjo delcev od (2,36-3,15) mm, z velikostjo delcev od (0,25-0,50) mm, z velikostjo delcev od (0,125-0,20) mm in v razredu z velikostjo delcev manjših od 0,125 mm.

Masni delež delcev, ki so bili večji od 1 mm, je v surovini Test 24 znašal 86,6 %, v surovini Test 64 pa le 25 %. Peleti, ki so bili narejeni iz surovine vzorca Test 24, so imeli mehansko obstojnost 96,5 %, peleti narejeni iz surovine vzorca Test 64 pa so imeli za skoraj 2 % boljšo mehansko obstojnost. Tudi v tem primeru se je izkazalo, da je bila pri peletih, ki so imeli v surovini večji masni delež večjih delcev, slabša mehanska obstojnost. Mešanica delcev z različnimi velikostmi prispeva k boljši kakovosti peletov. Tudi to je bil lahko eden od razlogov, da so imeli peleti, ki so bili narejeni iz surovine Test 64, boljšo mehansko obstojnost.



Slika 59: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu D

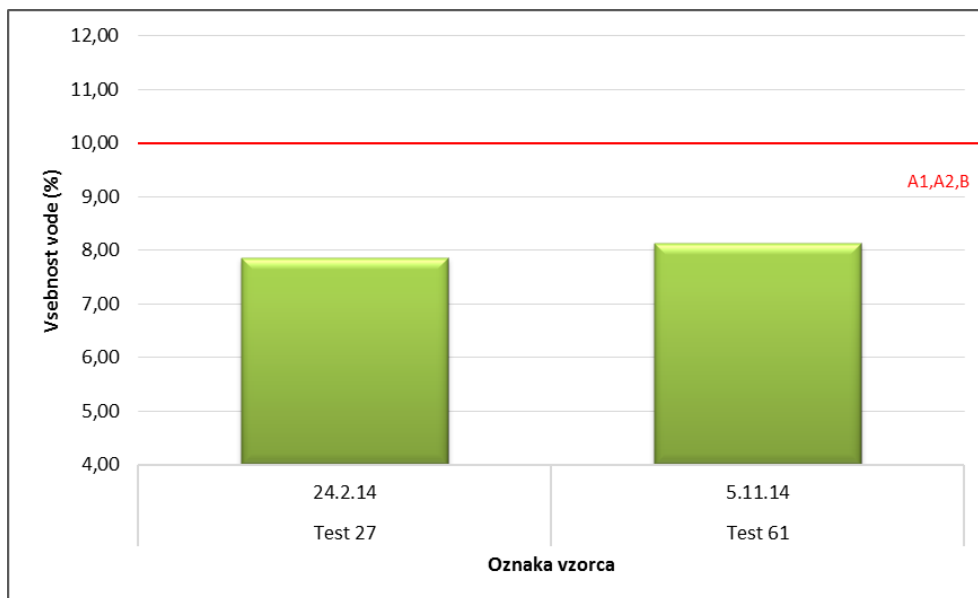
Figure 59: Particle size distribution of raw material at the producer D

4.1.5 Proizvajalec E

Pri proizvajalcu E smo vzorčili pozimi in jeseni 2014 in obakrat odvzeli vzorec surovine in vzorec peletov. Surovino je vedno predstavljala mešanica listavcev in iglavcev v razmerju 7:3. Tako je prvi vzorec vseboval 50 % bukve, 20 % jesena in hrasta, preostalo pa je bila smreka. Polovico drugega vzorca je ravno tako predstavljala bukev, 20 % je bilo hrasta in gabra, preostalo je bila ravno tako smreka.

4.1.5.1 Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu E

Proizvajalec E je imel vsebnost vode v peletih pri obeh vzorcih peletov okoli 8 %. To je zadovoljiva vrednost za uvrstitev peletov v kakovostne razrede A1, A2 in B, kar je prikazano tudi na spodnji sliki.



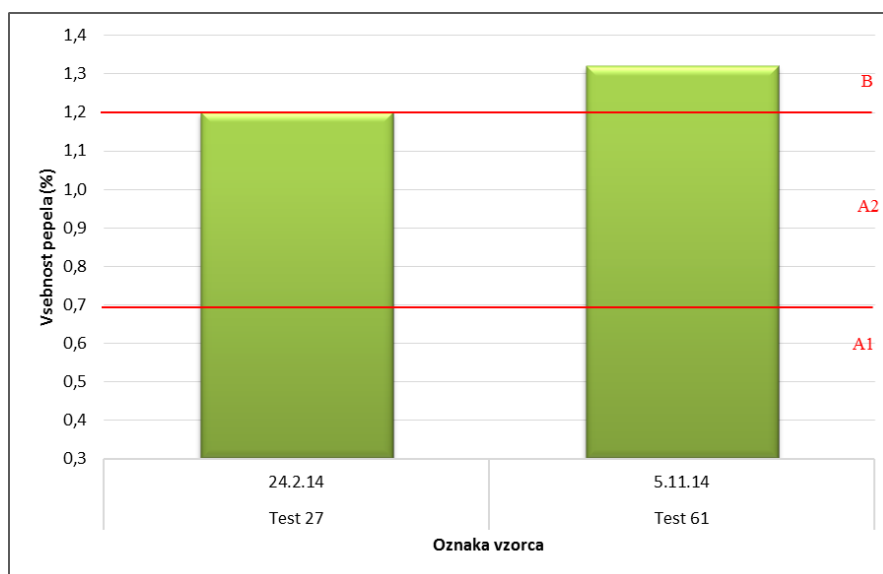
Slika 60: Vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu E, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 60: Moisture content in samples of pellets at the producer E; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Pri drugem vzorčenju so uporabili bolj suho vhodno surovino, vendar se na vsebnosti vode v peletih to ni odrazilo. Surovina pri prvem vzorčenju je vsebovala 21,9 % vode, surovina pri drugem vzorčenju pa 11,3 % vode. Surovina je bila odvzeta v procesu peletiranja in pri odvzemu nismo vedeli, v kakšni fazi sušenja je bila.

4.1.5.2 Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu E

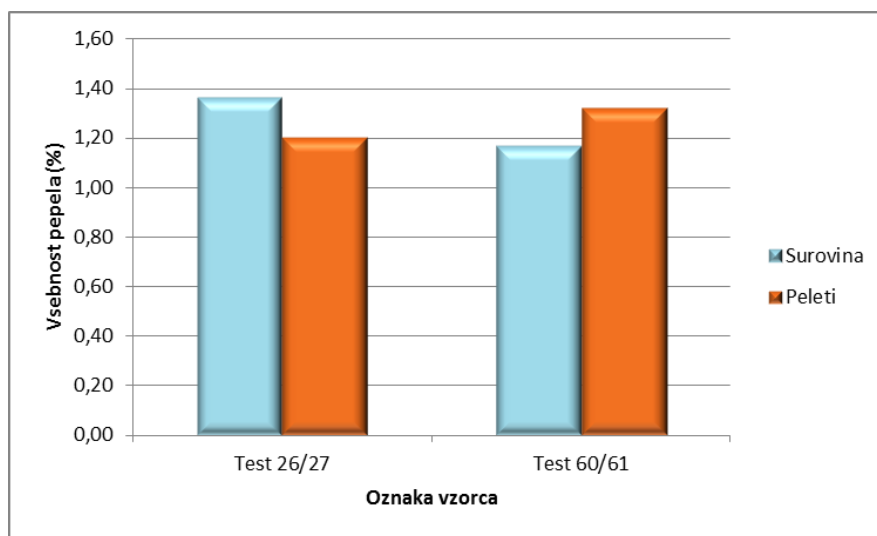
Pelete proizvajalca E lahko po vsebnosti pepela pri prvem vzorcu ravno še uvrstimo v kakovostni razred A1, v drugem primeru pa z vsebnostjo pepela 1,32 % v kakovostni razred B. To je bila tudi najvišja vsebnost pepela v vzorcih peletov med vsemi proizvajalci, ki smo jih proučevali. Tudi povprečna vsebnost pepela obeh vzorcev peletov je bila med vsemi proučevanimi proizvajalci najvišja. So edini proizvajalci, ki so imeli v surovini večjo vsebnost listavcev kot iglavcev. Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu E in mejne vrednosti za kakovostne razrede so prikazani na sliki 61.



Slika 61: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu E, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 61: Ash content in samples of pellets at the producer E; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Pri primerjavi vsebnosti pepela v surovini in peletih iz te surovine, je bila pri prvem vzorčenju razlika 0,17 %, pri drugem pa 0,15 %, kar je ponazorjeno tudi na sliki 62. To je bilo vse znotraj mej obnovljivosti, ki jih predpisuje standard za določanje pepela.



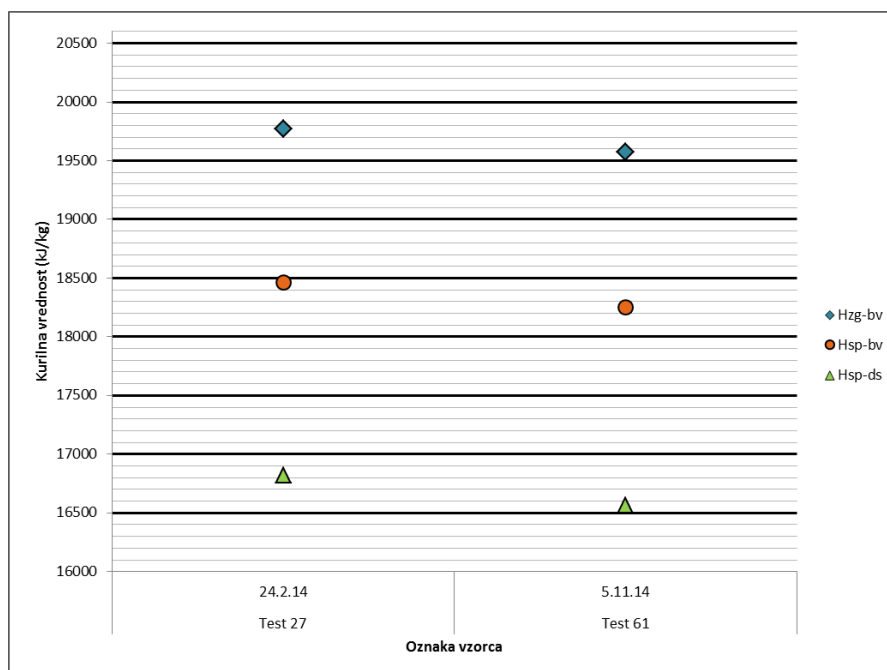
Slika 62: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu E

Figure 62: Ash content in raw material and pellets from that raw material at the producer E

4.1.5.3 Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu E

Spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju je dosegla kriterij 16500 kJ/kg za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 in B. Zgornjo in spodnjo kurilnost suhih peletov in spodnjo kurilnost dostavljenih peletov pri proizvajalcu E prikazuje slika 63. Povprečna zgornja kurilnost peletov v suhem stanju je bila najnižja med vsemi izbranimi proizvajalci. Tako vrednost smo tudi pričakovali, saj so bili peleti pri tem proizvajalcu sestavljeni pretežno iz listavcev, ki imajo v primerjavi z iglavci nižjo kurilnost.

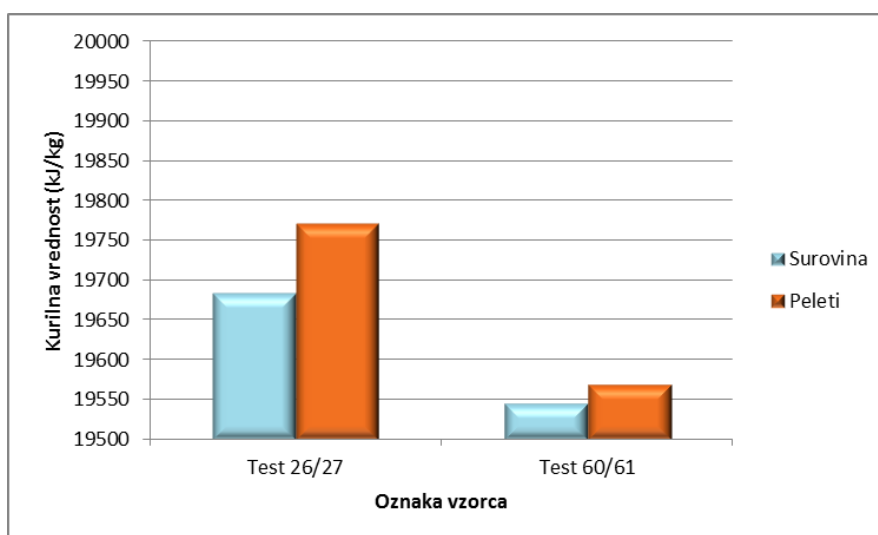
Glede na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju pa je bil ta proizvajalec na predzadnjem mestu, ker je imel za več kot 2,5 % nižjo vsebnost vode v peletih kot proizvajalec D, ki je bil po spodnji kurilnosti peletov v dostavljenem stanju na zadnjem mestu vseh proučevanih proizvajalcev. Vidimo, da kljub temu da imajo peleti v suhem stanju najnižjo kurilnost, na kar vpliva vrsta surovine, pa je za kurilnost v dostavljenem stanju odločujoča vsebnost vode.



Slika 63: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu E

Figure 63: Gross and net calorific value for dry samples of pellets (Hzg-bv, Hsp-bv) and net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at the producer E

Zgornja kurilnost surovine in peletov iz te surovine v suhem stanju (Hzg-bv) je bila primerljiva. Razlika v kurilnosti (Hzg-bv) med surovino in peleti pri prvem vzorčenju je bila 87 kJ/kg, pri drugem pa 24 kJ/kg (slika 64). Razlika je bila znotraj dovoljene obnovljivosti, ki jo predpisuje standard za določanje kurilnosti v trdnih biogorivih.

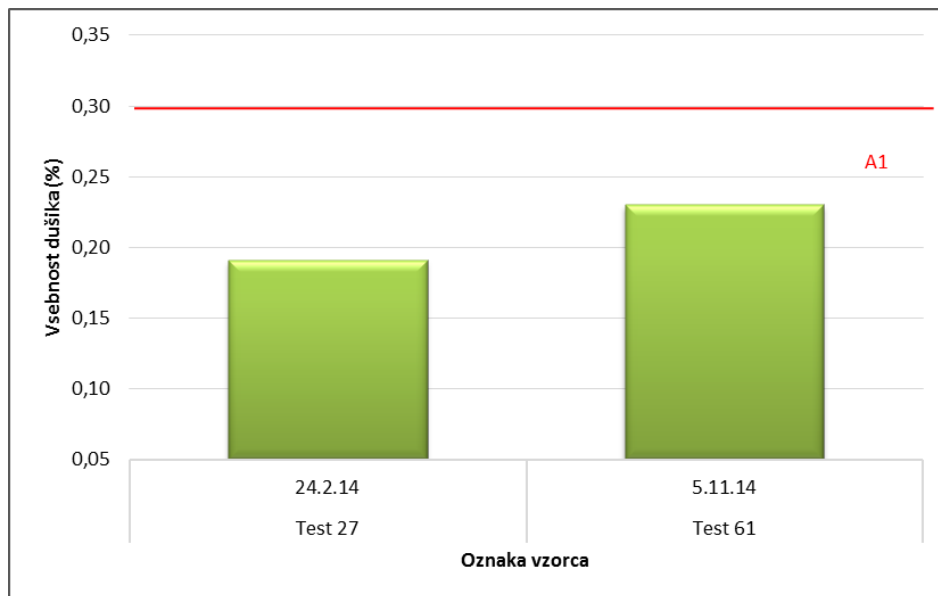


Slika 64: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu E

Figure 64: Gross calorific value for dry samples (Hzg-bv) of raw material and samples of pellets from that raw material at the producer E

4.1.5.4 Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu E

Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu E je bila primerna za uvrstitev v kakovostni razred A1, kar je prikazano tudi na sliki 65. Vsebnost dušika v peletih in surovini je bila nekoliko višja kot v materialu do sedaj obravnavanih proizvajalcev. Razlika v vsebnosti dušika med surovino in peleti iz te surovine je bila pri prvem vzorčenju 0,02 %, v drugem primeru pa razlike v vsebnosti dušika ni bilo.



Slika 65: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu E, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

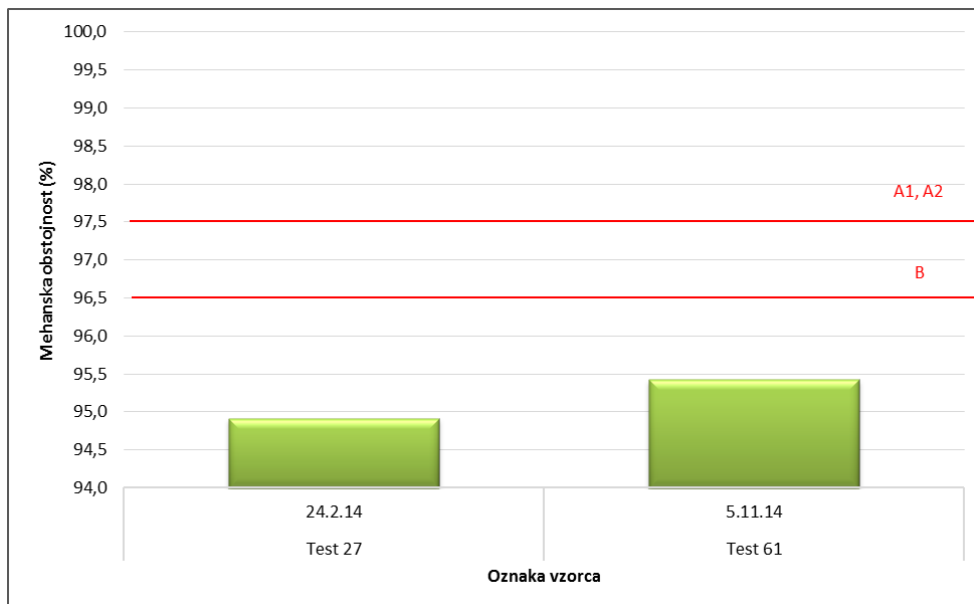
Figure 65: Nitrogen content in samples of pellets at the producer E; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.5.5 Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu E

Proizvajalec E je matrico približno na 3 tedne obnovil ali zamenjal. Vzdrževana matrica je pomemben dejavnik, ki vpliva na mehansko obstojnost peletov. Po prvem vzorčenju so z nastavitvami peletirne naprave želeli izboljšati mehansko obstojnost - matrico so zamenjali z obnovljeno, potem pa še z novo matrico ter z novimi valjčki, uporabljati so začeli tudi bolj suho vhodno surovino.

Iz slike 66 lahko razberemo, da nobeden od dveh vzorcev peletov pri tem proizvajalcu ni dosegel kriterija za uvrstitev v kakovostni razred B. Mehanska obstojnost obeh vzorcev peletov je bila tudi najnižja med vsemi vzorci peletov izbranih proizvajalcev. Kljub temu, da je proizvajalec veliko pozornosti posvetil izboljšanju mehanske obstojnosti peletov, pa vrednosti niso bile zadovoljive. Prvi vzorec peletov je imel mehansko obstojnost 94,9 %, drugi pa 95,4%. Vzrok za slabšo mehansko obstojnost bi

lahko bila surovinska sestava, saj jo je pri tem proizvajalcu predstavljalo 70 % listavcev in le 30 % iglavcev.



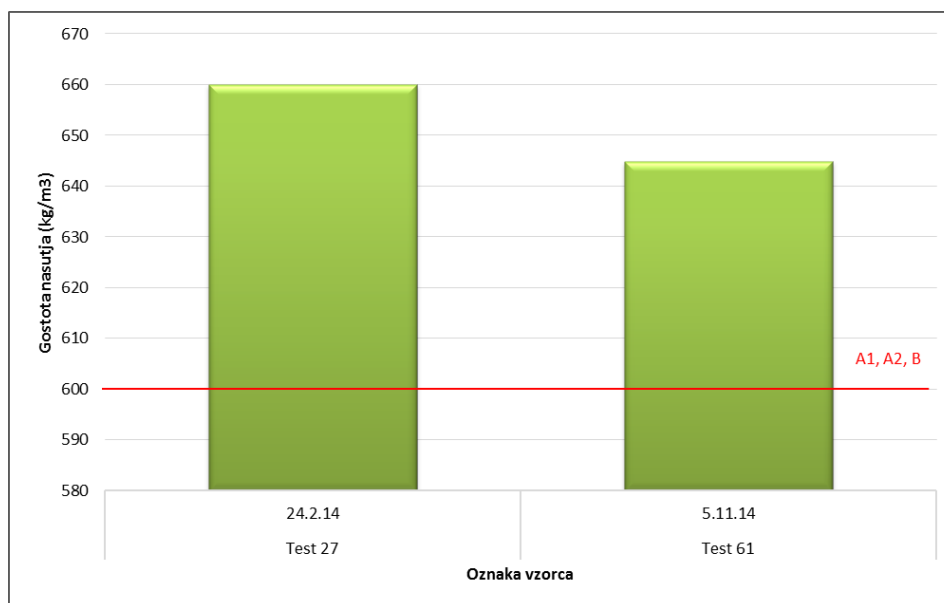
Slika 66: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu E, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 66: Mechanical durability of pellets at the producer E; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.5.6 Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu E

Proizvajalec E je imel drugo najvišjo gostoto nasutja peletov med vsemi proučevanimi proizvajalci. Razlog bi lahko bil v tem, da so imeli zaradi najslabše mehanske obstojnosti posledično več manjših delcev peletov. Gostota nasutja se namreč določa tako, da se posoda s predpisanimi dimenzijami napolni z vzorcem peletov, nato pa se prosto spusti na ploščo z višine 15 cm. Pri tem se manjši delci lažje prerazporedijo po razmikih med peleti in tako je gostota nasutja lahko večja.

Slika 67 prikazuje gostoto nasutja obeh vzorcev peletov proizvajalca E in mejno vrednost za uvrstitev v razrede A1, A2 in B. Vidimo, da sta bili vrednosti gostote nasutja obeh vzorcev peletov signifikantno nad kritično mejo za razvrščanje v vse tri razrede.

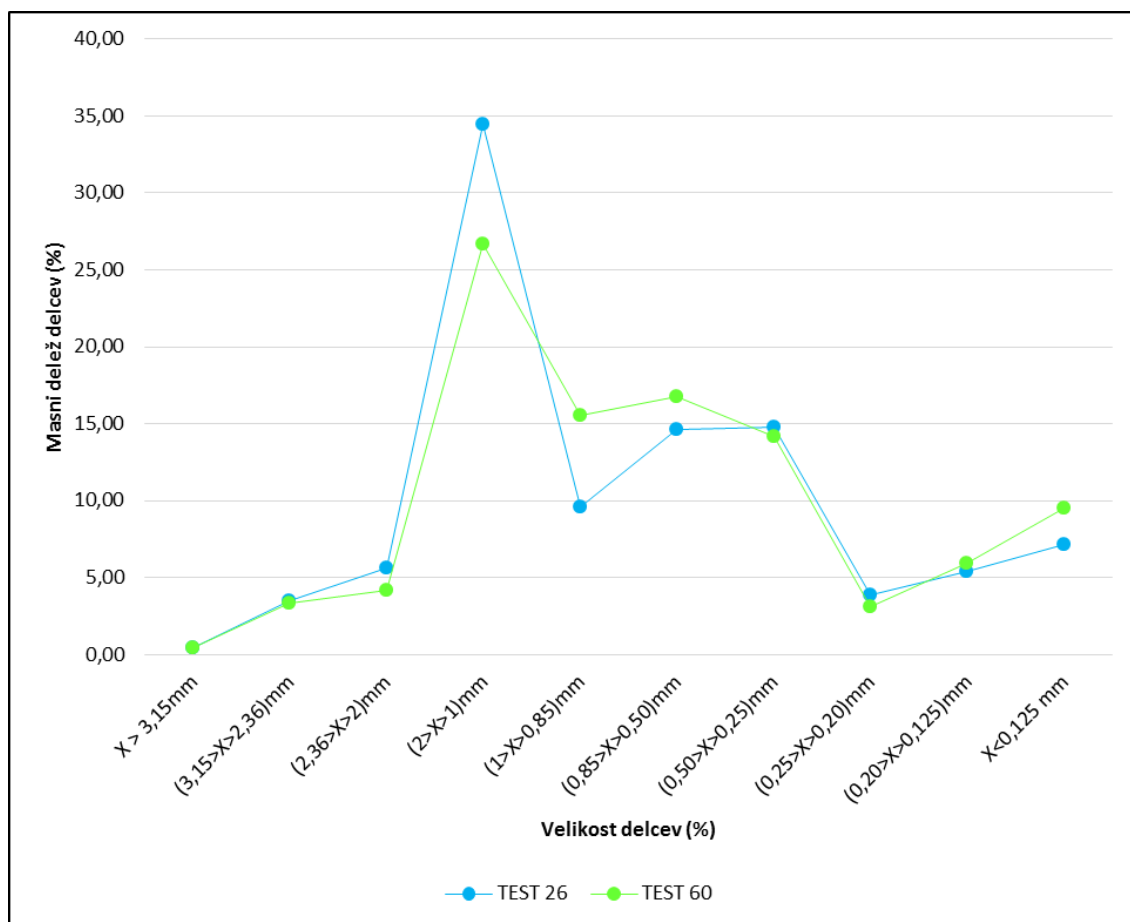


Slika 67: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu E, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 67: Bulk density in samples of pellets at the producer E; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.5.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu E

Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri obeh vzorcih surovine proizvajalca E je bila precej podobna. Masne deleže delcev surovine po posameznih razredih prikazuje slika 68. Največji masni delež delcev je bil pri obeh vzorcih v velikostnem razredu od 1 do 2 mm. Mehanska obstojnost posameznega vzorca peletov, ki so bili narejeni iz surovine Test 26 oziroma iz surovine Test 60, je bila v obeh primerih slabša in je dosegla vrednosti okoli 95 %. Pri tem proizvajalcu bi na podlagi porazdelitve velikosti delcev v posamezni surovini težko sklepali na mehansko obstojnost peletov.



Slika 68: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu E

Figure 68: Particle size distribution of raw material at the producer E

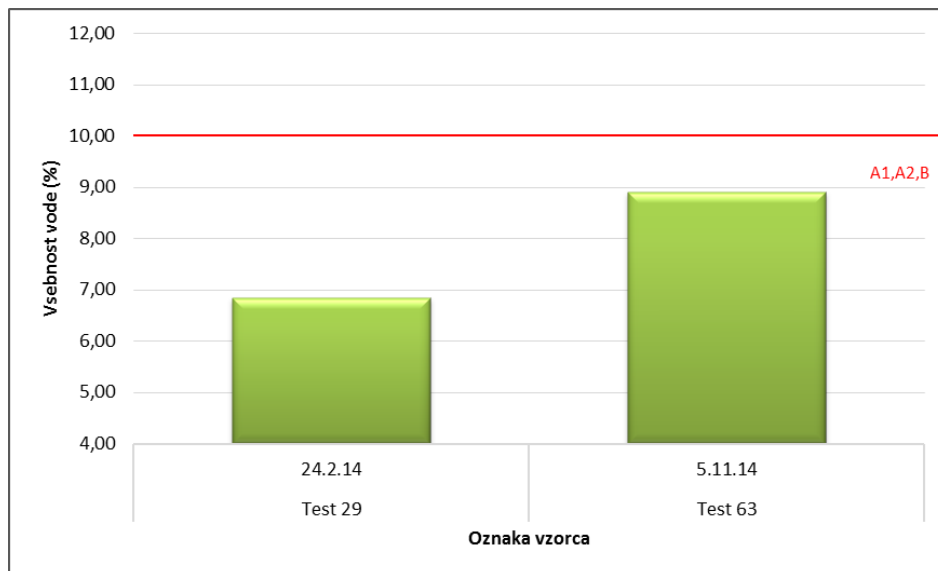
4.1.6 Proizvajalec F

Pri proizvajalcu F smo vzorce surovine in peletov odvzeli februarja in novembra 2014. Pri prvem vzorčenju je material vseboval 70 % smreke in 30 % listavcev - od tega predvsem bukev, okoli procenta je bilo hrasta in prav toliko akacije. V drugem primeru pa je material vseboval 90 % smreke, preostalo je bila bukev.

4.1.6.1 Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu F

Februarski vzorec peletov proizvajalca F je vseboval 6,84 % vode, novembrski pa 8,91 %. Vsebnost vode v obeh vzorcih peletov je bila primerna za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 oziroma B, kar prikazuje graf na sliki 69. Vsebnost vode v surovini je bila v obeh primerih okoli 11 %. Vsebnost vode v surovini se je v peletirni napravi kontrolirala vsake 3 do 4 minute in glede na vrednost je bila vodena regulacija sušenja. Surovina se je sušila na temperaturi 440 °C, čas sušenja je bil 3 do 4 sekunde.

Iz vsebnosti vode v surovini nismo mogli sklepati na vsebnost vode v peletih. V povprečju so imeli peleti pri tem proizvajalcu drugo najnižjo vsebnost vode.

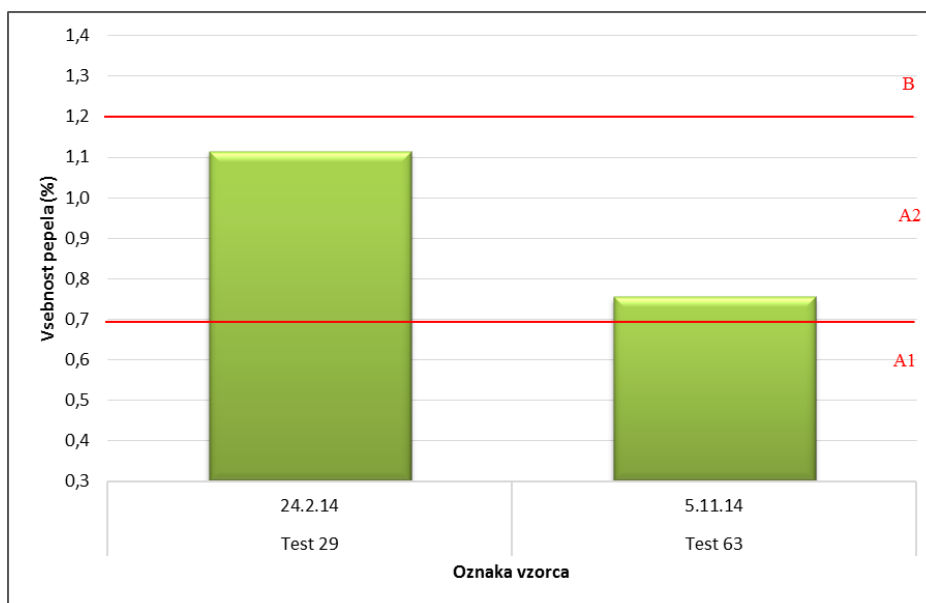


Slika 69: Vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu F, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 69: Moisture content in samples of pellets at the producer F; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.6.2 Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu F

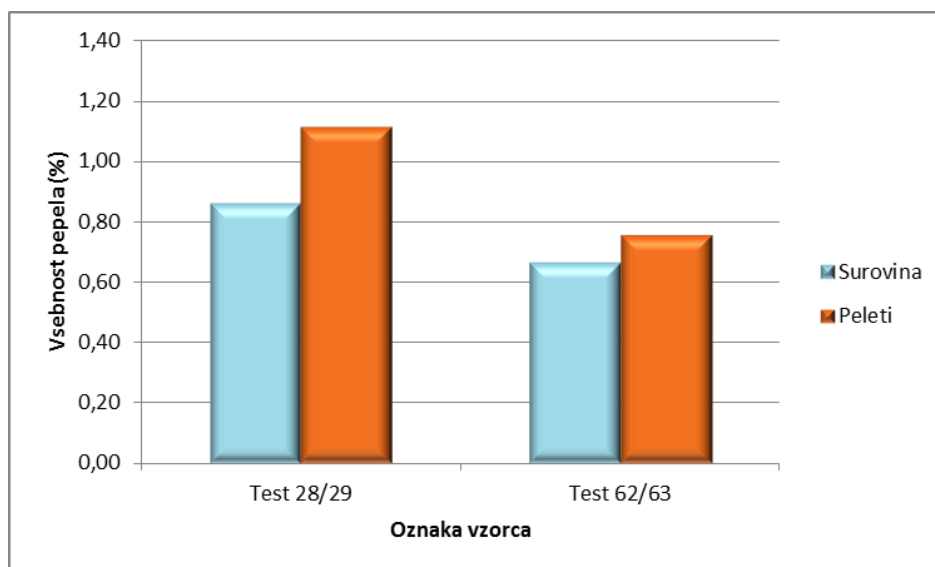
Glede na vsebnost pepela v obeh vzorcih lahko pelete proizvajalca F uvrstimo v kakovostni razred A2 (slika 70). Drugi vzorec peletov je imel 0,36 % manj pepela kot prvi vzorec peletov. Prvi vzorec je vseboval 70 % smreke, drugi vzorec pa 90 %.



Slika 70: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu F, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 70: Ash content in samples of pellets at the producer F; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Ko smo primerjali vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine (slika 71), je bila razlika v obeh primerih znotraj dovoljene meje za obnovljivost 0,30 %, ki jo predpisuje standard za določanje pepela.

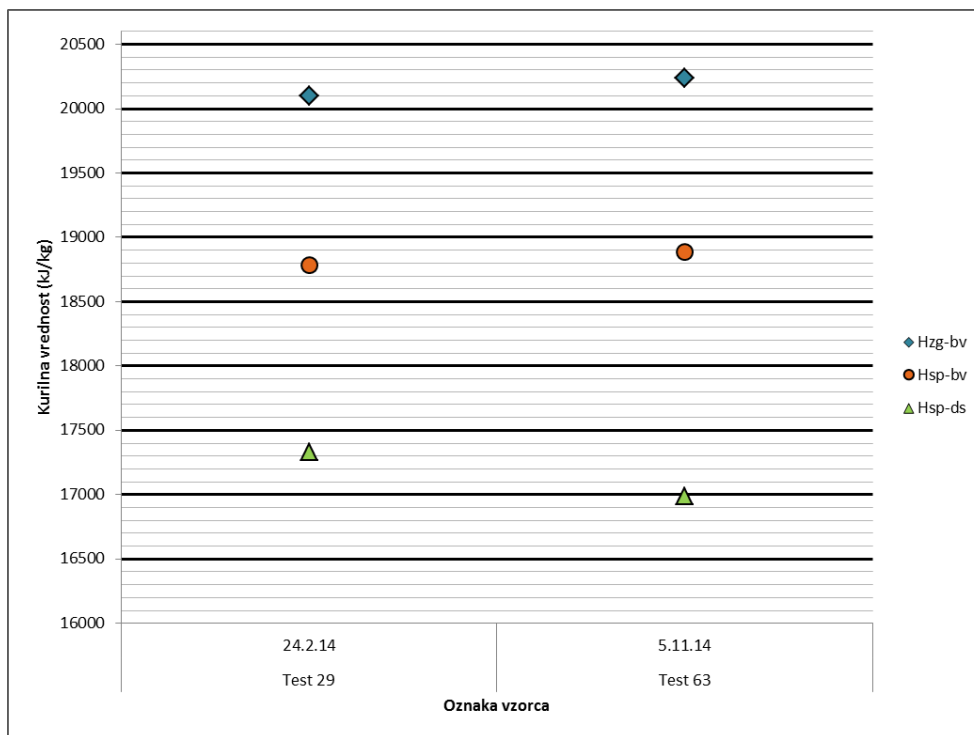


Slika 71: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu F

Figure 71: Ash content in raw material and pellets from that raw material at the producer F

4.1.6.3 Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu F

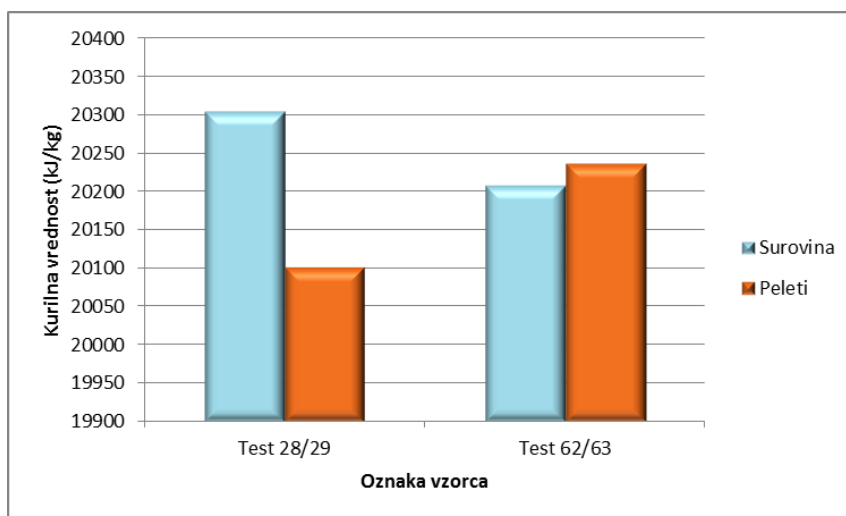
Kurilnost peletov v dostavljenem stanju pri proizvajalcu F je bila nad mejno vrednostjo 16500 kJ/kg, ki je spodnja meja za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 in B. Zgornja kurilnost peletov v suhem stanju je bila pri vzorcu Test 63 višja kot pri vzorcu Test 29. Višja zgornja kurilnost pri vzorcu Test 63 ne preseneča, saj so bili peleti v tem primeru sestavljeni iz 90 % smreke, pri vzorcu Test 29 pa le iz 70 % smreke, preostali del pa so bili listavci, ki imajo nižjo kurilnost kot iglavci. Ko primerjamo spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju, pa vidimo, da je bila v drugem primeru kurilnost nižja. Razlog je bil v višji vsebnosti vode v tem vzorcu peletov Test 63, ki je za več kot 2 % višja kot v vzorcu Test 29. Vse opisane kurilnosti so prikazane na sliki 72.



Slika 72: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hsp-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu F

Figure 72: Gross and net calorific value for dry samples of pellets (Hsp-bv, Hsp-bv) and net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at the producer F

Razlika v zgornji kurilnosti surovine in peletov iz te surovine je bila znotraj dovoljenih mej, ki jih predpisuje standard za določanje kurilnosti. Razlika v kurilnosti med surovino in peleti je v prvem primeru znašala 203 kJ/kg, v drugem primeru pa 29 kJ/kg, kar ponazarja slika 73.

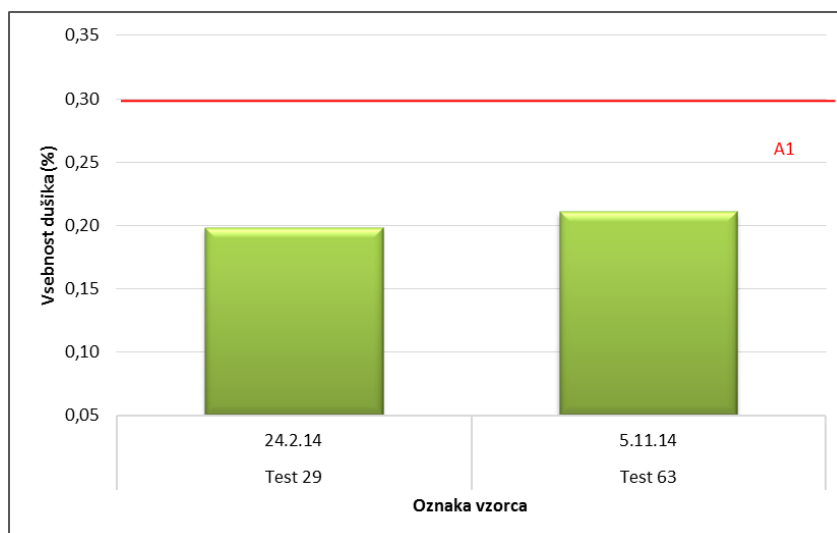


Slika 73: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu F

Figure 73: Gross calorific value for dry samples (Hzg-bv) of raw material and samples of pellets from that raw material at the producer F

4.1.6.4 Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu F

Vsebnost dušika v dveh vzorcih peletov odvzetih pri proizvajalcu F je prikazana na sliki 74. Vsebnost dušika v peletih je bila v obeh primerih okoli 0,20 %, kar jih uvršča v kakovostni razred A1. Tudi vsebnost dušika v surovini je bila primerljiva s to vrednostjo in pri obeh vzorčenjih je znašala razlika v vsebnosti dušika med surovino in peleti iz te surovine 0,01 %.



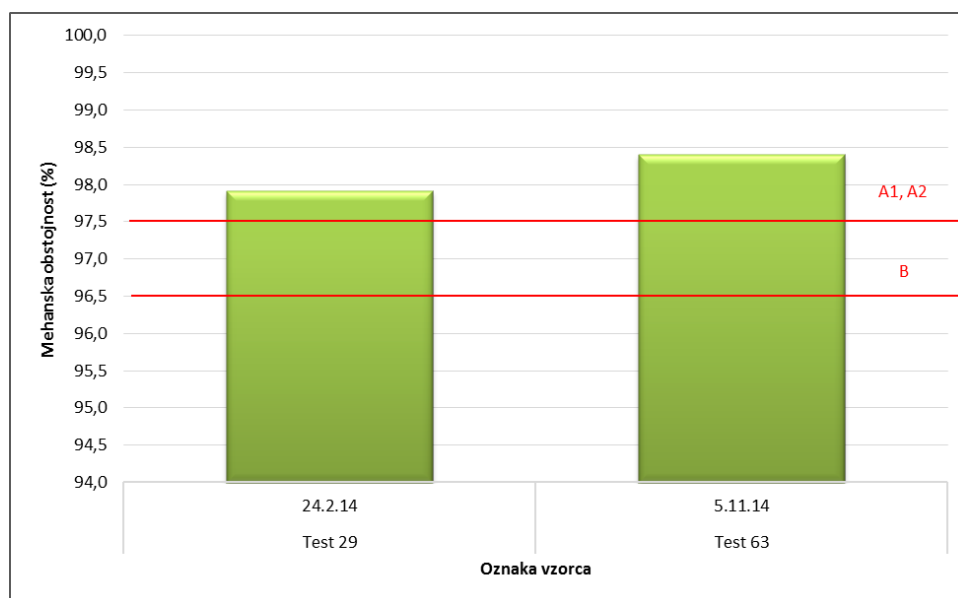
Slika 74: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu F, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 74: Nitrogen content in samples of pellets at the producer F; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.6.5 Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu F

Proizvajalec F je zamenjal ali obnovil matrico v peletirni napravi na vsakih 700 do 900 ton proizvedenih peletov, maksimalna proizvodnja peletov na eni matrici pa je bila 1200 ton. Kapaciteta njihove stiskalnice je bila 3 t/h, kar pomeni, da so matrico zamenjali oziroma obnovili na približno dva tedna. Vzdrževana matrica v peletirni napravi je zelo pomembna za dobro mehansko obstojnost peletov.

Iz grafa na sliki 75 lahko razberemo, da sta oba vzorca peletov dosegla mehansko obstojnost za uvrstitev v kakovostni razred A1 oz. A2. S povprečno vrednostjo mehanske obstojnosti obeh vzorcev peletov 98,16 % je bil proizvajalec F na drugem mestu vseh obravnavanih proizvajalcev.

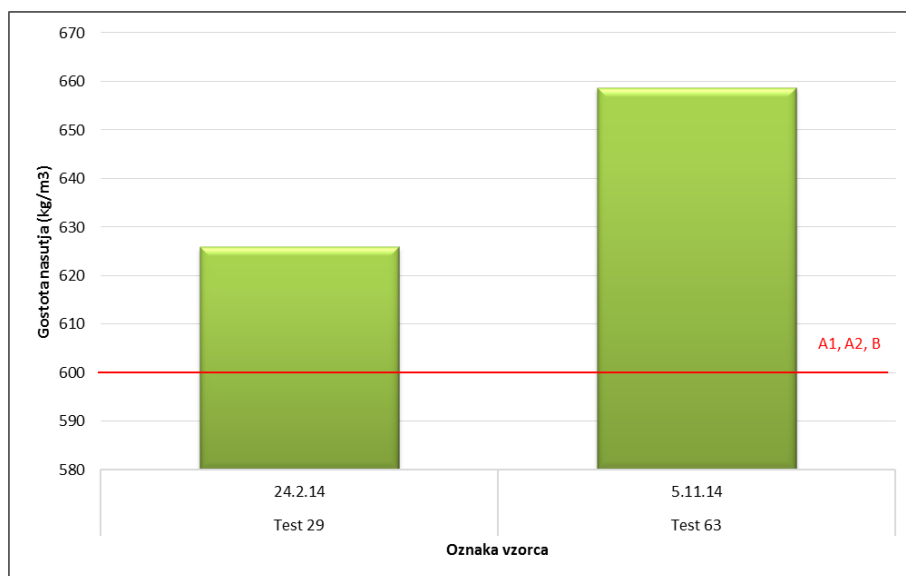


Slika 75: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu F, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 75: Mechanical durability of pellets at the producer F; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

4.1.6.6 Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu F

Gostota nasutja obeh vzorcev peletov pri proizvajalcu F je dosegla kriterij za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 in B. Povprečna gostota nasutja obeh vzorcev peletov je bila $642,3 \text{ kg/m}^3$, meja za uvrstitev v razrede pa je 600 kg/m^3 . Gostota nasutja peletov je bila pri drugem vzorčenju lahko večja na račun večje vsebnosti vode v peletih pri tem vzorcu.

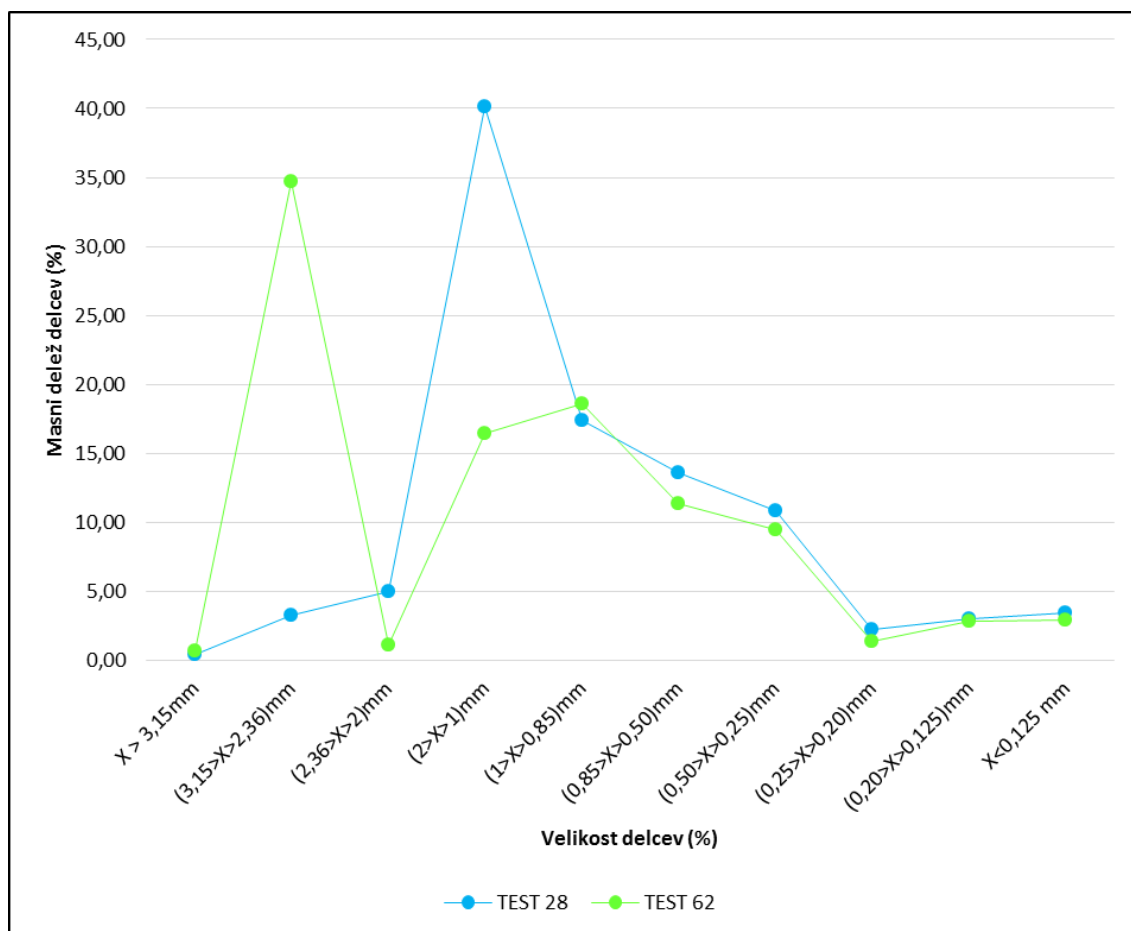


Slika 76: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu F, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 76: Bulk density in samples of pellets at the producer F; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.6.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu F

Porazdelitev velikosti delcev surovine pri proizvajalcu F se je pri obeh obravnavanih vzorcih surovine v prvih štirih velikostnih razredih precej razlikovala, v naslednjih šestih razredih pa so bili masni deleži delcev podobni, kar lahko razberemo tudi iz slike 77. Vzorec surovine Test 28 je imel tako kot večina vzorcev največji masni delež delcev v velikostnem razredu od 1 do 2 mm. Vzorec surovine Test 62 pa je imel največji masni delež delcev v velikostnem razredu od 2,36 do 3,15 mm. Mehanska obstojnost peletov narejenih iz teh dveh surovin je bila okoli 98 %. Vzorec peletov narejenih iz surovine Test 62 je imel za 0,5 % boljšo mehansko obstojnost kot Test 28. To je bila premajhna razlika, da bi na podlagi le-te lahko iz porazdelitve velikosti delcev sklepali na mehansko obstojnost.



Slika 77: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri proizvajalcu F

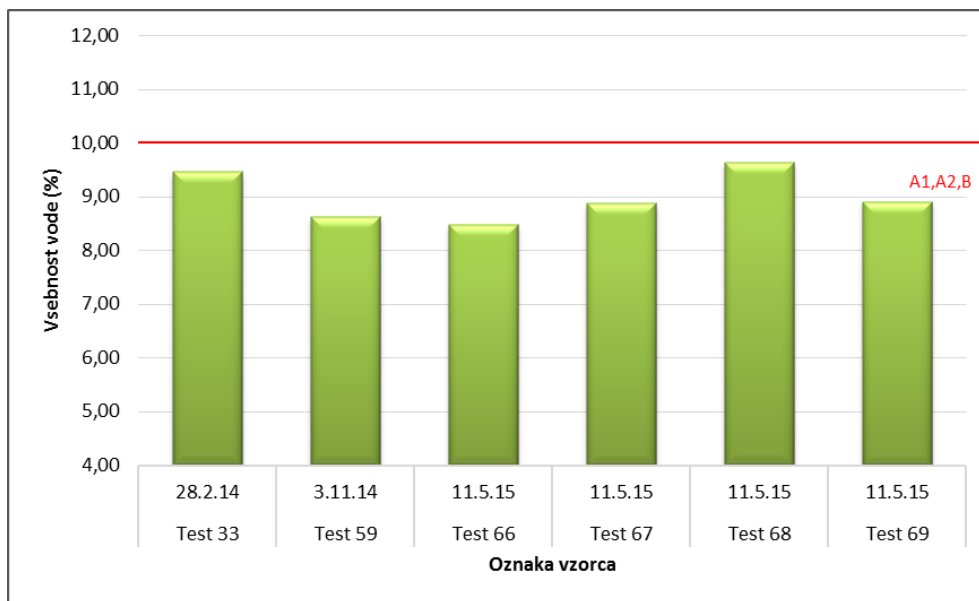
Figure 77: Particle size distribution of raw material at the producer F

4.1.7 Proizvajalec G

Pri proizvajalcu G smo vzorce peletov in surovine odvzeli februarja in novembra 2014 ter maja 2015. Pri zadnjem vzorčenju smo odvzeli štiri različne vzorce peletov, surovine pa nismo vzorčili. Ker je imel ta proizvajalec material z največ skorje, nas je zanimalo, kako vsebnost skorje vpliva na vsebnost pepela, kurilnost in mehansko obstojnost. Pri zadnjem odvzemu nas porazdelitev velikosti delcev v surovini ni zanimala, zato surovine nismo vzorčili. Pri prvem vzorčenju nam je tehnološki proces onemogočal, da bi pridobili surovino po finem mletju, zato sejalne analize surovine v prvem primeru nismo naredili. Material je predstavljal predvsem jelka, nekaj je bilo smreke in okoli 2 % do 3 % buke. Pri proizvodnji peletov je bilo 8 % do 20 % materiala v obliki skobljancev, ki so bili že posušeni in so bili brez skorje, preostali material pa je bil v obliki sekancev in žaganja, kjer skorja ni bila odstranjena.

4.1.7.1 Vsebnost vode v surovini in peletih pri proizvajalcu G

Vsebnost vode smo izmerili v šestih vzorcih peletov. Meja 10 % za kakovostne razrede A1, A2 in B, v nobenem primeru ni bila prekoračena, kar je prikazano na sliki 78. Povprečna vsebnost vode v vzorcih peletov pri proizvajalcu G je bila 9,0 %, kar jih uvršča na predzadnje mesto po vsebnosti vode vseh proučevanih proizvajalcev.



Slika 78: Vsebnost vode v peletih pri proizvajalcu G, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 78: Moisture content in samples of pellets at the producer G; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

V procesu proizvodnje peletov so preko dozirne naprave surovini dodajali vodo in jo na ta način kondicionirali. Surovino Test 32 in Test 58 smo odvzeli po kondicioniranju in sušenju in je imela obakrat vsebnost vode med 11 % in 12 %.

4.1.7.2 Vsebnost pepela v surovini in peletih pri proizvajalcu G

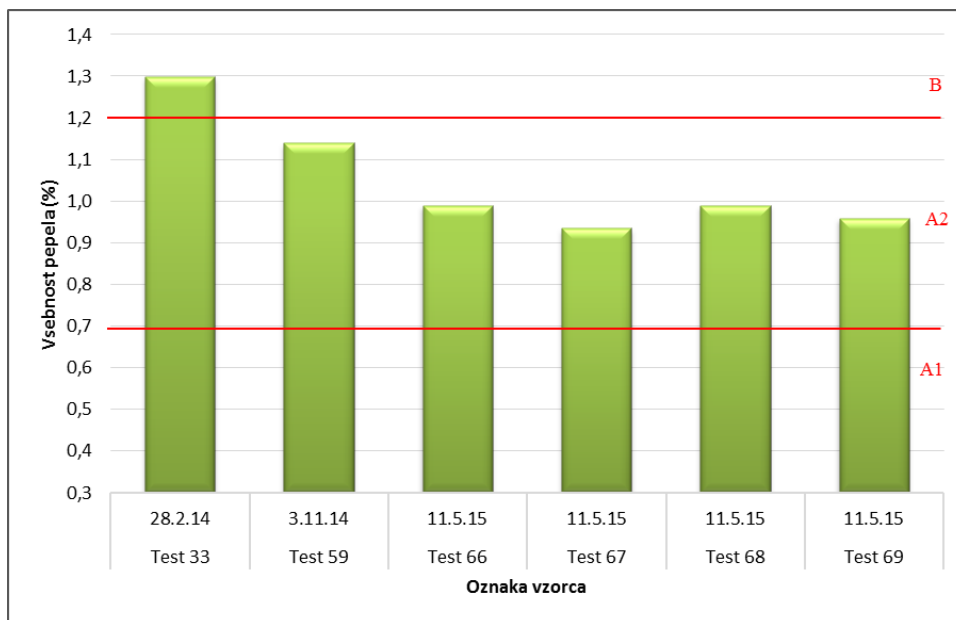
Material vzorca peletov Test 33 sta predstavljali jelka in smreka, od tega je bilo 8 % suhih skobljancev brez skorje, ostalo pa je bilo žaganje in sekanci, ki so vsebovali skorjo. Vsebnost pepela v tem vzorcu peletov je bila 1,3 %, kar je tudi druga najvišja vsebnost pepela v vzorcih peletov pri proučevanih proizvajalcih (slika 79).

Pri drugem vzorčenju so bili peleti Test 59 sestavljeni predvsem iz jelke, nekaj smreke in okoli 1% bukve. 10 % materiala je bilo v obliki skobljancev, preostalo je bilo v obliki žaganja in sekancev. Vsebnost pepela pri tem vzorcu je bila 1,14 % (slika 79).

Maja 2015 smo odvzeli 4 različne vrste vzorcev peletov. Peleti vzorca Test 66 so bili proizvedeni 2 tedna pred našim obiskom. Material je predstavljalo 15 - 20 % skobljancev brez skorje narejenih iz jelke, 80 % žaganja in sekancev s skorjo ravno tako iz jelke in 2-3 % bukve. Ta vzorec peletov je vseboval 0,99 % pepela (slika 79).

Peleti iz vzorca Test 67 so bili proizvedeni en teden pred našim odvzemom. Sestava peletov je bila enaka kot pri peletih Test 66. Ta vzorec je vseboval najnižjo vsebnost pepela pri tem proizvajalcu in sicer 0,94 %. Peleti iz vzorca Test 68 so bili narejeni dva dneva pred našim obiskom, sestava peletov je bila enaka kot pri vzorcu Test 66 in 67, tudi vsebnost pepela je bila primerljiva. Zadnji vzorec peletov smo odvzeli sami, material ni vseboval skobljancev, žaganja je bilo zelo malo, prevladovali so sekanci, ki so vsebovali skorjo. Pričakovali smo višjo vsebnost pepela, vendar ta vzorec po vsebnosti pepela pri tem proizvajalcu ni izstopal (slika 79).

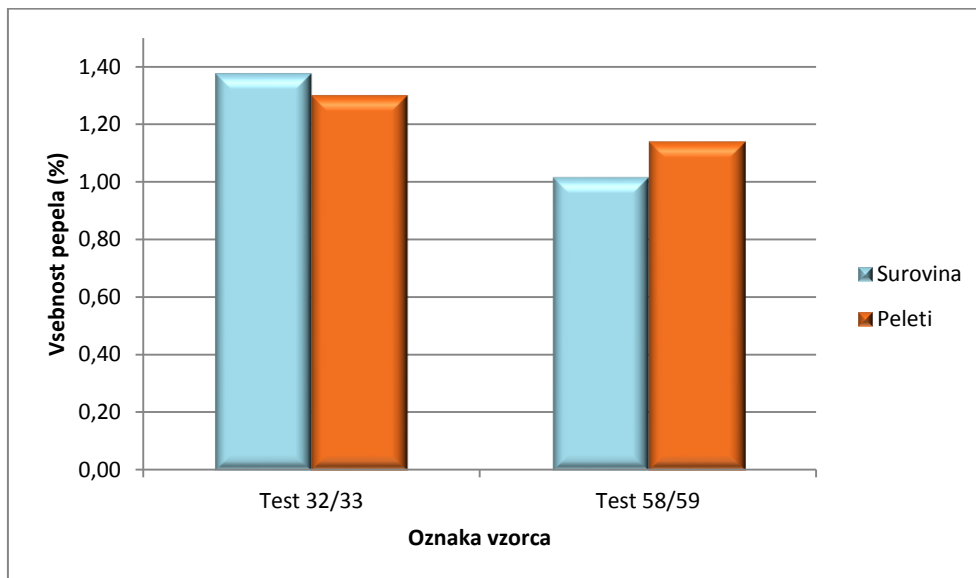
Pri proizvajalcu G so bile v povprečju višje vsebnosti pepela v peletih in surovini, saj pri večini materiala skorje niso odstranjevali. Skorja pa je tisti dejavnik, ki precej prispeva h količini pepela v peletih. Iz slike 79 lahko razberemo, da pri prvem vzorčenju pelete po vsebnosti pepela uvrstimo v kakovostni razred B, kjer je vsebnost pepela nad drugo rdečo črto na grafu. Vsi preostali vzorci peletov pri tem proizvajalcu so glede na vsebnost pepela dosegli kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A2. Povprečna vsebnost pepela v peletih pri tem proizvajalcu je bila 1,05 %, kar jih v povprečju uvršča na predzadnje mesto izbranih proizvajalcev.



Slika 79: Vsebnost pepela v peletih pri proizvajalcu G, rdeči črti na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 79: Ash content in samples of pellets at the producer G; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Vzorec surovine smo odvzeli pri prvih dveh vzorčenjih. Pri primerjavi vsebnosti pepela med surovino in peleti iz te surovine, kar prikazuje slika 80, vidimo, da ni bilo velike razlike. V prvem primeru je bila razlika v vsebnosti pepela med surovino in peleti 0,08 % in v drugem primeru 0,12 %, standard za določanje vsebnosti pepela pa pri obnovljivosti dovoljuje razliko 0,3 %.



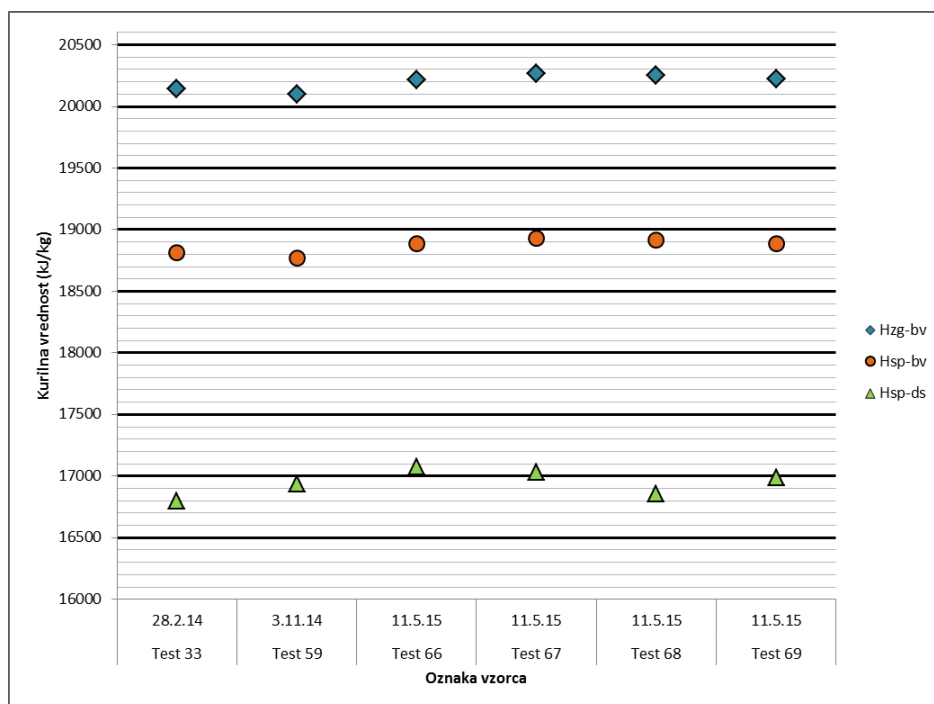
Slika 80: Vsebnost pepela v surovini in peletih iz te surovine pri proizvajalcu G

Figure 80: Ash content in raw material and pellets from that raw material at the producer G

4.1.7.3 Kurilnost surovine in peletov pri proizvajalcu G

Zgornja kurilnost vzorcev peletov pri proizvajalcu G je dosegla vrednosti od 20102 do 20267 kJ/kg. Glede na povprečno zgornjo kurilnost peletov v suhem stanju so bili med proučevanimi proizvajalci na drugem mestu. Višje kurilnosti je proizvajalec G dosegel na račun iglavcev in večje vsebnosti skorje v primerjavi z ostalimi proizvajalci, kar oboje prispeva k višji zgornji kurilnosti suhega materiala.

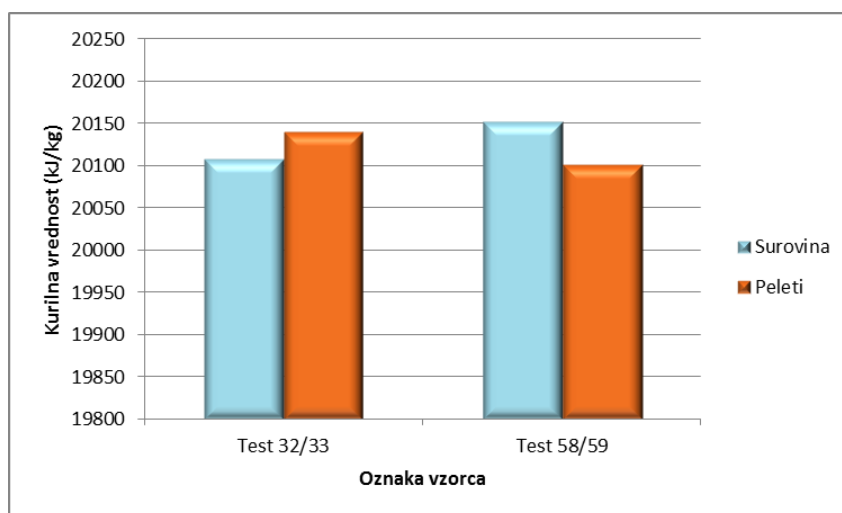
Spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju pa je bila pod povprečjem v primerjavi z ostalimi proizvajalci. Razlog je bil v višji vsebnosti vode pri proizvajalcu G, saj so bili vzorci s povprečno vsebnostjo vode v peletih 9,0 % na predzadnjem mestu med proizvajalci.



Slika 81: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri proizvajalcu G

Figure 81: Gross and net calorific value for dry samples of pellets (Hzg-bv, Hsp-bv) and net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at the producer G

Primerjali smo zgornjo kurilnot surovine in peletov iz te surovine. Razlika v kurilnosti pri obeh vzorčenjih je bila minimalna in je znašala v prvem primeru 32 kJ/kg in v drugem 51 kJ/kg, kar prikazuje slika 82.

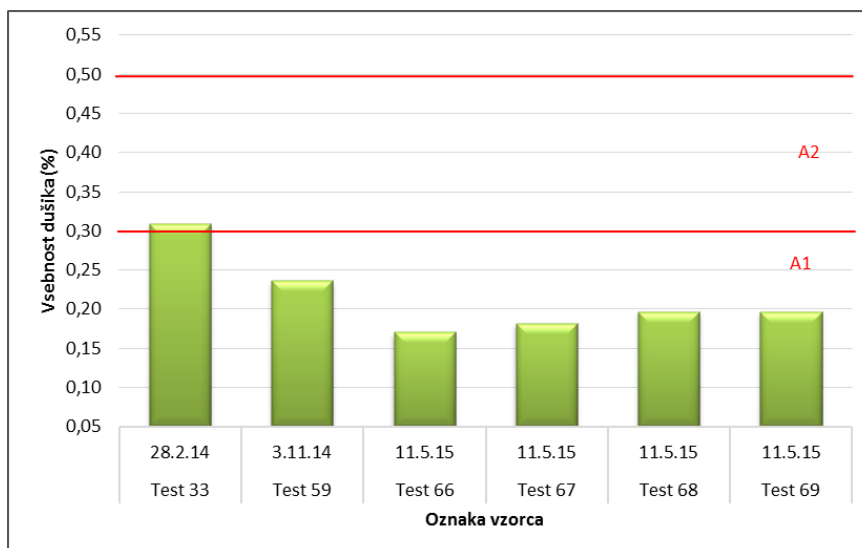


Slika 82: Zgornja kurilnost preračunana na suho stanje (Hzg-bv) surovine in peletov iz te surovine pri proizvajalcu G

Figure 82: Gross calorific value for dry samples (Hzg-bv) of raw material and samples of pellets from that raw material at the producer G

4.1.7.4 Vsebnost dušika v surovini in peletih pri proizvajalcu G

Vsebnost dušika v vzorcu peletov Test 33 pri proizvajalcu G je bila nad mejno vrednostjo za uvrstitev v kakovostni A1. To je bil tudi edini primer vzorca peletov med vsemi vzorci pri obravnavanih proizvajalcih, ki ni dosegel vrednosti za kakovostni razred A1. Povprečna vsebnost dušika vseh vzorcev peletov proizvajalca G je znašala 0,22 % in je dosegla najvišjo vsebnost med vsemi proizvajalci. Vsebnost dušika v vzorcih peletov in mejne vrednosti za kakovostni razred A1 in A2 so prikazani na sliki 83. K višji vsebnosti dušika bi lahko prispevala vrsta materiala, saj je bil le pri tem proizvajalcu material sestavljen pretežno iz jelke. Znano je tudi, da skorja vsebuje več dušika kot les, proizvajalec pa skorje ni odstranjeval. Tudi vsebnost dušika v surovini pri prvem in drugem vzorčenju je bila med 0,24 in 0,30 %.

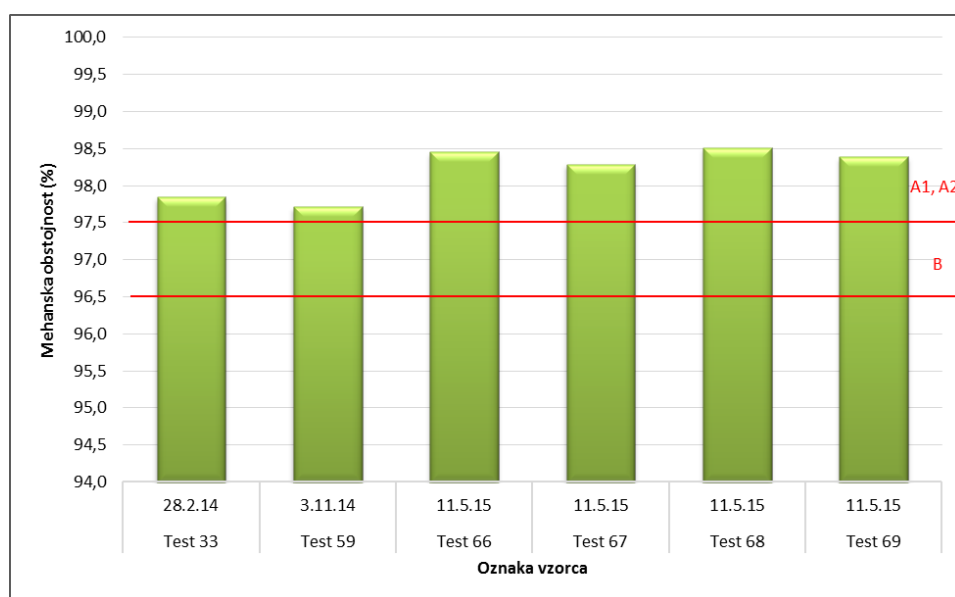


Slika 83: Vsebnost dušika v peletih pri proizvajalcu G, rdeči črti na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 83: Nitrogen content in samples of pellets at the producer G; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

4.1.7.5 Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu G

Vseh šest vzorcev peletov je glede na mehansko obstojnost doseglo kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A1 oz. A2, kjer je meja 97,5 % in je na sliki 84 ponazorjena z zgornjo rdečo črto. Proizvajalec G je imel najboljšo mehansko obstojnost peletov med vsemi obravnavanimi proizvajalci. Povprečna vrednost mehanske obstojnosti vseh vzorcev peletov je bila 98,20 %.



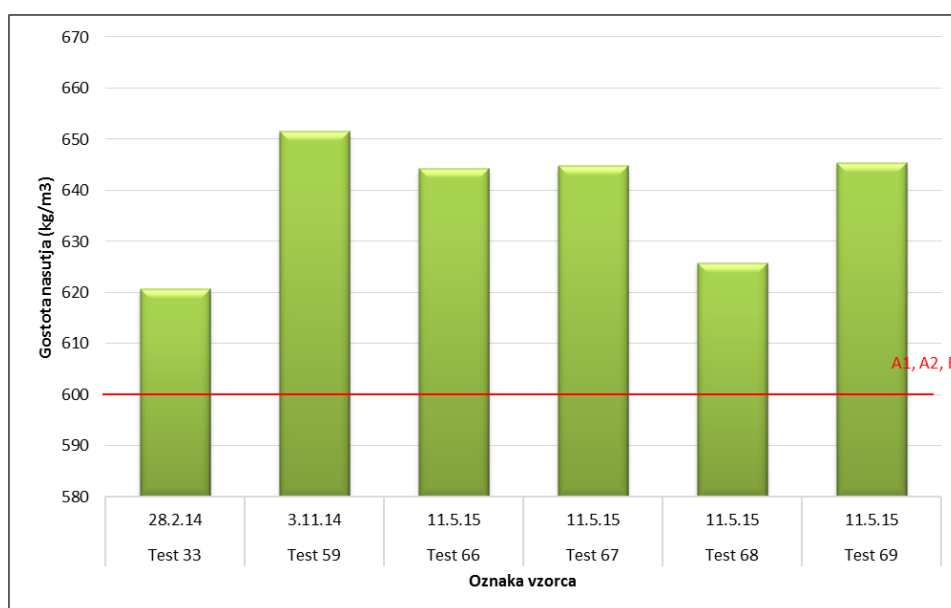
Slika 84: Mehanska obstojnost peletov pri proizvajalcu G, rdeči črti na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 84: Mechanical durability of pellets at the producer G; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Dejavnikov, ki prispevajo k boljši mehanski obstojnosti pri tem proizvajalcu, je več. Eden od dejavnikov je lahko višja povprečna vsebnost vode v peletih. Tudi vsebnost pepela v peletih je v primerjavi z ostalimi proizvajalci višja in po nekaterih raziskavah je tudi večja vsebnost pepela pokazatelj boljše mehanske obstojnosti. Nezanemarljiv je tudi sam proces proizvodnje peletov. Pri proizvodnji peletov k surovini v peletirni napravi dodajajo vodo. To vodo pridobijo v procesu čiščenja dimnih plinov. Voda naj bi vsebovala prašne delce in tako tudi lignin, ki deluje kot vezivo in prispeva k boljši mehanski obstojnosti.

4.1.7.6 Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu G

Gostote nasutja vseh vzorcev peletov pri proizvajalcu G so bile ustrezne za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 in B, kar je ponazorjeno na sliki 85. Povprečna gostota nasutja peletov je bila pri tem proizvajalcu $638,8 \text{ kg/m}^3$. Najvišja gostota nasutja peletov pri vzorcu Test 59 je sovpadla z najnižjo mehansko obstojnostjo. Pri preverjanju korelacije med mehansko obstojnostjo in gostoto nasutja peletov pa nismo ugotovili povezave.



Slika 85: Gostota nasutja peletov pri proizvajalcu G, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 85: Bulk density in samples of pellets at the producer G; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.1.7.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini pri proizvajalcu G

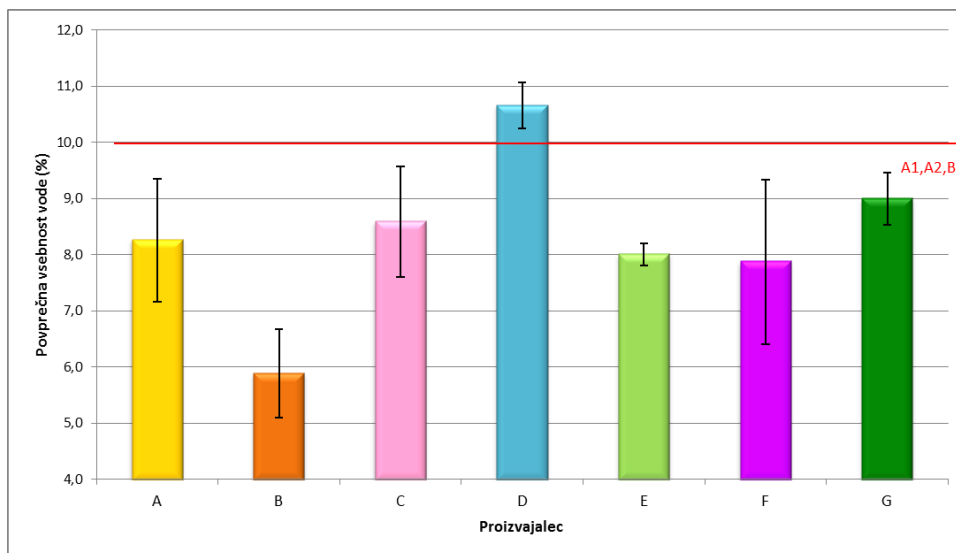
Pri proizvajalcu G smo zaradi oteženega dostopa do surovine uspeli pridobiti le en vzorec surovine za finim mletjem materiala. Pri prvem vzorčenju smo surovino sicer odvzeli, vendar še ni bila zmleta. Vzorec surovine Test 58 je imel v petih velikostnih razredih (2., 5., 6., 7. in 10. razred, ki si sledijo od največjega do najmanjšega) masni delež delcev med 12 % in 19 %, v preostalih petih razredih pa je bil masni delež delcev manjši od 8 %.

4.2 PREGLED POSAMEZNIH PROUČEVANIH PARAMETROV

4.2.1 Vsebnost vode v peletih izbranih proizvajalcev

Vzorci peletov izbranih proizvajalcev smo odvezemali od oktobra 2013 do maja 2015 in odvzeli 37 vzorcev peletov. Na sliki 86 so ponazorjene povprečne vsebnosti vode v vzorcih peletov pri posameznem proizvajalcu. Pri vsaki povprečni vrednosti je na grafu prikazan tudi standardni odklon, ki pokaže razpršenost vrednosti pri vsakem proizvajalcu. Standardni odklon pa je odvisen tudi od števila vzorcev peletov, ki je pri štirih dobaviteljih znašal le dva vzorca. Najvišjo povprečno vsebnost vode v peletih je dosegel proizvajalec D, ki tako tudi ni dosegel kriterija za razvrstitev v kakovostne

razrede A1, A2 oz. B. Najnižjo povprečno vsebnost vode v peletih smo določili pri proizvajalcu B. Povprečna vsebnost vode v vseh vzorcih peletov izbranih proizvajalcev je znašala 8,30 %. Relativna razlika med najvišjo in najnižjo vsebnostjo vode v vzorcih peletov izbranih proizvajalcev je bila 56 %.



Slika 86: Povprečna vsebnost vode v peletih pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

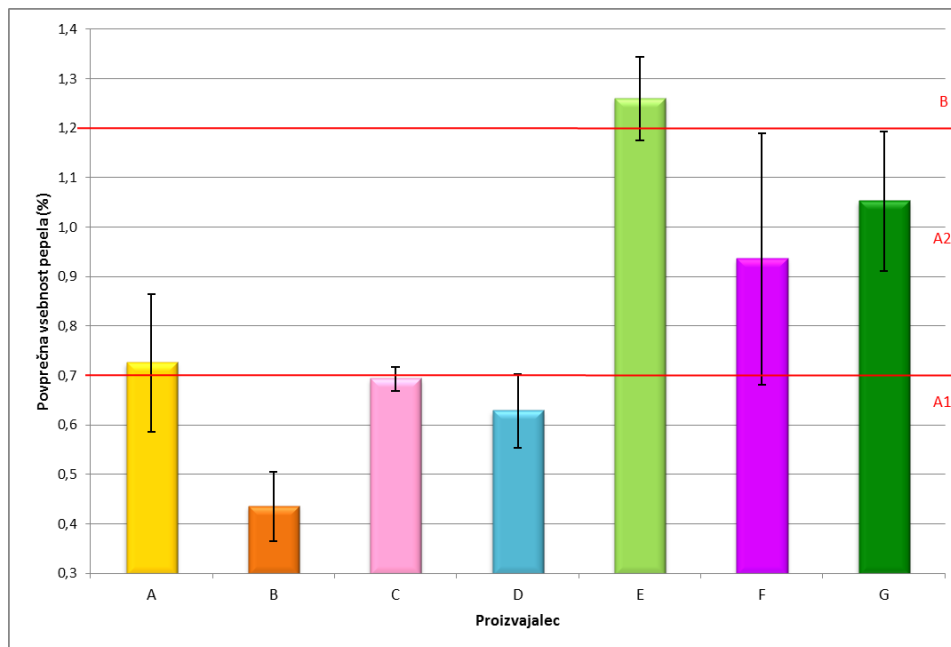
Figure 86: Average moisture content with standard deviation in samples of pellets at selected producer; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Najnižja vsebnost vode v posameznem vzorcu peletov je bila izmerjena pri proizvajalcu B in sicer 5,02 %, najvišja vsebnost pa pri proizvajalcu A in sicer 11,43 %. V treh primerih je bila vsebnost vode v vzorcu peletov prekoračena za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 in B - enkrat pri proizvajalcu A in dvakrat pri proizvajalcu D (priloga B, slika B1).

4.2.2 Vsebnost pepela v peletih izbranih proizvajalcev

Vsebnost pepela smo določili na 37 vzorcih peletov izbranih proizvajalcev. Na sliki 87 so prikazane povprečne vsebnosti pepela v vzorcih peletov skupaj s standardnim odklonom pri posameznem proizvajalcu. Peleti proizvajalcev B, C in D so glede na povprečno vsebnost pepela dosegli kriterij za uvrstitev v razred A1, peleti proizvajalcev A, F, G za razred A2, le pelete proizvajalca E smo uvrstili v kakovostni razred B. Največji standardni odklon pri povprečni vsebnosti pepela smo izmerili pri proizvajalcu F, ker smo imeli v tem primeru le dva vzorca peletov in ker je bila absolutna razlika med obema vrednostima vsebnosti pepela kar 0,36 %. Povprečna vsebnost pepela vseh vzorcev peletov izbranih proizvajalcev je bila 0,79 %, kar jih skupno uvršča v

kakovostni razred A2. Relativna razlika med najvišjo in najnižjo vsebnostjo pepela v vzorcih peletov je znašala 73 %.



Slika 87: Povprečna vsebnost pepela v peletih pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

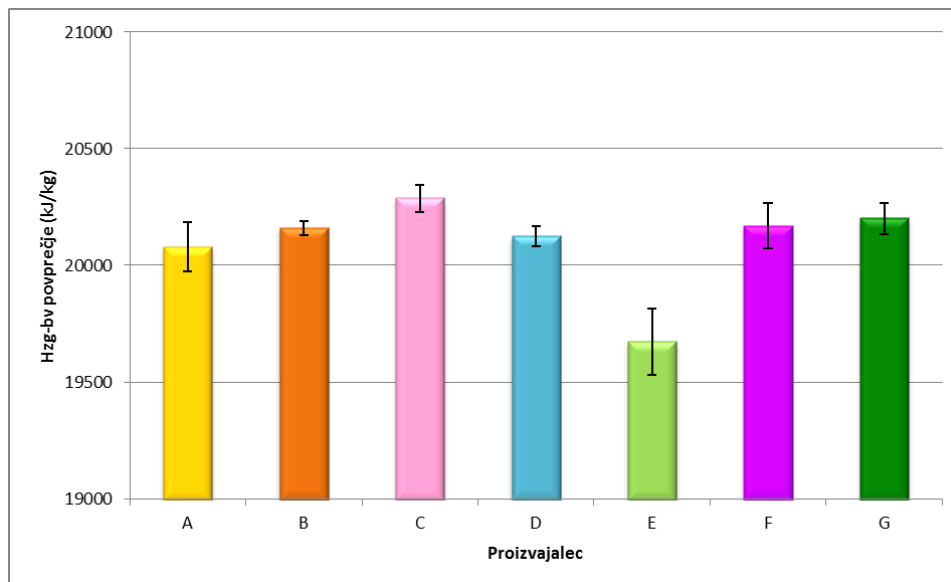
Figure 87: Average ash content with standard deviation in samples of pellets at selected producer; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A1 glede na vsebnost pepela v posameznih vzorcih peletov vseh proučevanih proizvajalcev je doseglo 16 vzorcev peletov. V kakovostni razred A2 smo lahko po vsebnosti pepela v peletih uvrstili 18 vzorcev peletov, v kakovostni razred B pa 3 vzorce peletov. Največjo vsebnost pepela v posameznem vzorcu peletov je imel proizvajalec E in sicer 1,32 %, najmanjšo pa proizvajalec B, ki je imel v vzorcu peletov vsebnost pepela 0,36 % (priloga B, slika B2).

4.2.3 Kurilnost peletov izbranih proizvajalcev

Zgornjo in spodnjo kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv, Hsp-bv) in spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) izbranih proizvajalcev smo določili na 37 vzorcih. Najvišjo povprečno zgornjo kurilnost peletov v suhem stanju smo določili pri proizvajalcu C in najnižjo pri proizvajalcu E, kot lahko razberemo iz slike 88. Proizvajalec C je za surovino uporabljal izključno smreko, proizvajalec E pa 70 % listavcev in 30 % smreke. V tem primeru lahko vidimo, koliko k zgornji kurilnosti peletov v suhem stanju prispeva vrsta surovine. Standardni odklon pri povprečnih vrednostih je bil pri vseh proizvajalcih dokaj majhen, ker je zgornja kurilnost pri enaki surovini v suhem stanju precej konstantna. Povprečna zgornja kurilnost vseh vzorcev

peletov v suhem stanju izbranih proizvajalcev je znašala 20102 kJ/kg. Relativna razlika med najnižjo in najvišjo zgornjo kurilnostjo je bila 4 %.



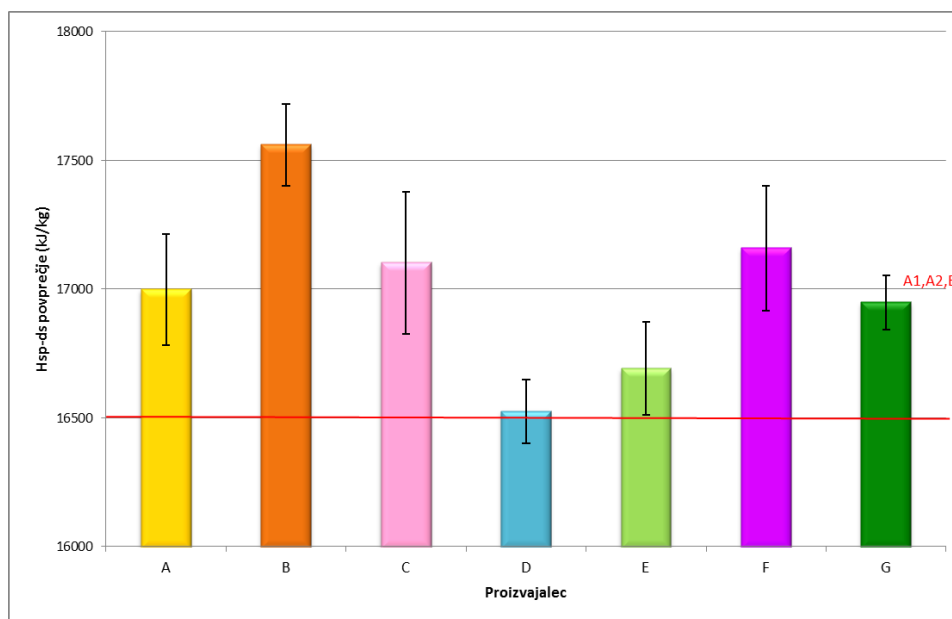
Slika 88: Povprečna zgornja kurilnost peletov v suhem stanju (Hzg-bv) pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom

Figure 88: Average gross calorific value with standard deviation for dry samples of pellets (Hzg-bv) at selected producer

Najvišjo zgornjo kurilnost peletov v suhem stanju (vzorec Test 53) je dosegel proizvajalec C z vrednostjo 20328 kJ/kg, najnižjo zgornjo kurilnost peletov v suhem stanju (vzorec Test 61) z vrednostjo 19570 kJ/kg pa proizvajalec E (priloga B, slika B3).

Zgornja kurilnost se določi pri konstantnem volumnu, spodnja kurilnost pa pri konstantnem tlaku. Razlika med zgornjo in spodnjo kurilnostjo peletov v suhem stanju je približno enaka, zato se povprečnim spodnjim kurilnostim peletov v suhem stanju nismo posebej posvetili.

Na sliki 89 so prikazane povprečne spodnje kurilnosti peletov v dostavljenem stanju pri posameznem dobavitelju. Najvišjo povprečno vrednost smo izmerili pri proizvajalcu B, najnižjo pa pri proizvajalcu D, kar je povezano z vsebnostjo vode v peletih. Povprečne vrednosti pri posameznem proizvajalcu povsod zadostijo kriteriju za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2, in B. Standardni odkloni pri povprečni vrednosti Hsp-ds so večji kot pri Hzg-bv, ker ima poleg surovine vpliv predvsem vsebnost vode, ki pa se je med vzorci peletov razlikovala. Relativna razlika med najvišjo in najnižjo spodnjo kurilnostjo peletov v dostavljenem stanju je bila 7 %. Povprečna spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju je bila 17008 kJ/kg.

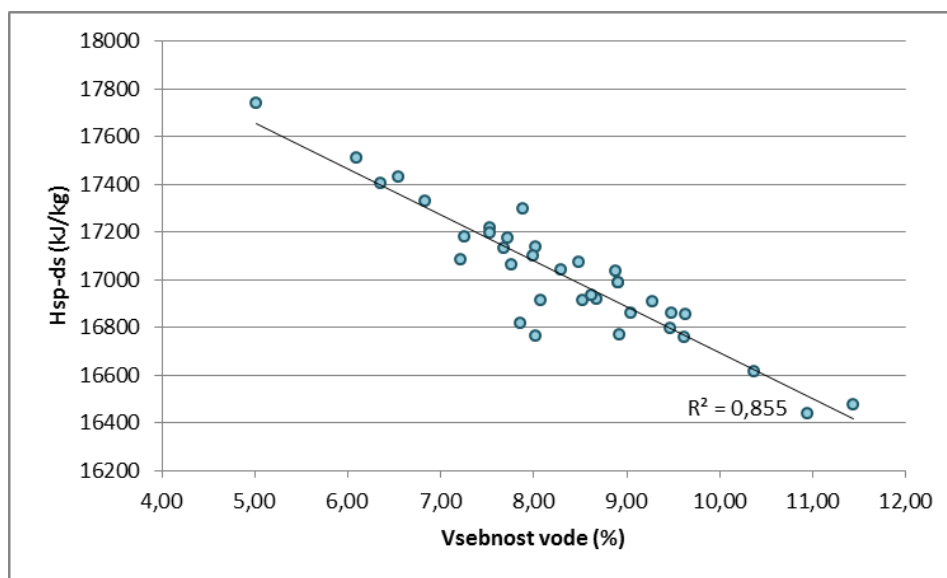


Slika 89: Povprečna spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarjata mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 89: Average net calorific value with standard deviation for samples of pellets as received (Hsp-ds) at selected producer; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Najnižjo spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju 16437 kJ/kg smo izmerili pri proizvajalcu D in sicer na vzorcu peletov Test 65. Ta vzorec je vseboval 10,95 % vode. Najvišjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju 17740 kJ/kg je dosegel vzorec peletov Test 31 proizvajalca B. Vzorec peletov Test 31 je vseboval 5,02 % vode. Za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2 in B je potrebna spodnja kurilnost peletov v dostavljenem stanju vsaj 16500 kJ/kg. Pri dveh vzorcih peletov ta kriterij ni bil dosežen in sicer enkrat pri proizvajalcu A in enkrat pri proizvajalcu D (priloga B, slika B3).

Graf na sliki 90 nam prikazuje, kako na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju vpliva vsebnost vode v peletih. Determinacijski koeficient (R^2) je pokazal 85,5 % odvisnost spodnje kurilnosti na dostavljeno stanje od vsebnosti vode v peletih. Nepojasnjen del variance pa smo si delno lahko razložili z vrsto in sestavo lesa.

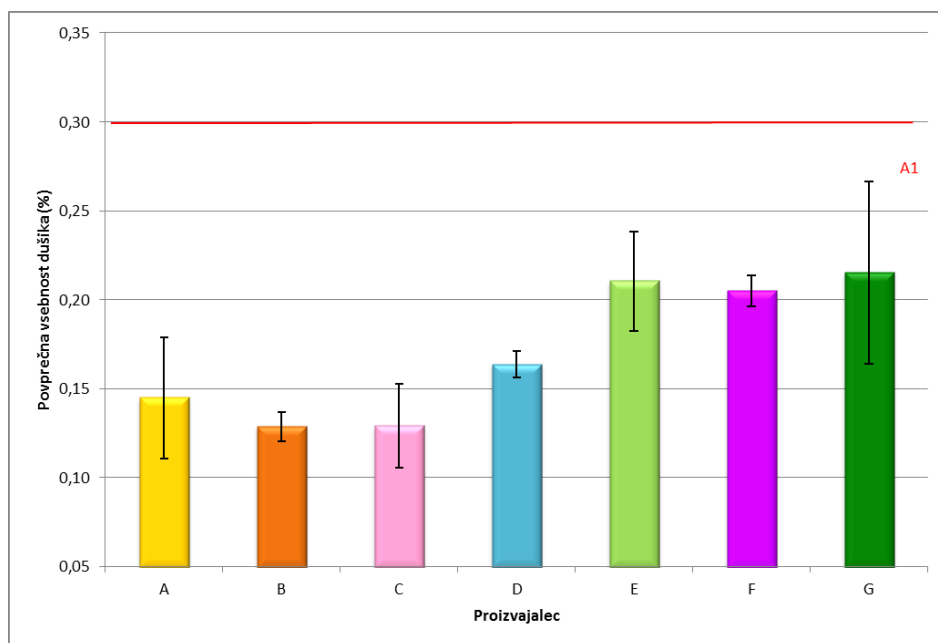


Slika 90: Vpliv vsebnosti vode v peletih na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju (Hsp-ds) pri izbranih proizvajalcih

Figure 90: The influence of moisture content in pellets on net calorific value for samples of pellets as received (Hsp-ds) at selected producers

4.2.4 Vsebnost dušika v peletih izbranih proizvajalcev

Pelete z vsebnostjo dušika 0,3 % in manj lahko uvrstimo v kakovostni razred A1. Glede na povprečno vsebnost dušika lahko vse proizvajalce uvrstimo v razred A1. Med vsemi proizvajalci je imel najvišje povprečje dušika proizvajalec G, kot lahko razberemo iz slike 91. Proizvajalec G je bil edini od izbranih proizvajalcev, ki je za surovino v peletih uporabljal les jelke. Najnižja povprečna vsebnost dušika pa je bila določena pri proizvajalcu B. Na grafu (slika 91) smo podali tudi standardne odklone povprečnih vsebnosti dušika pri vsakem proizvajalcu. Povprečna vsebnost dušika v vseh vzorcih peletov izbranih proizvajalcev je bila 0,16 %. Relativna razlika med najvišjo in najnižjo vsebnostjo dušika v vseh vzorcih peletov obravnavanih proizvajalcev je znašala 78 %.

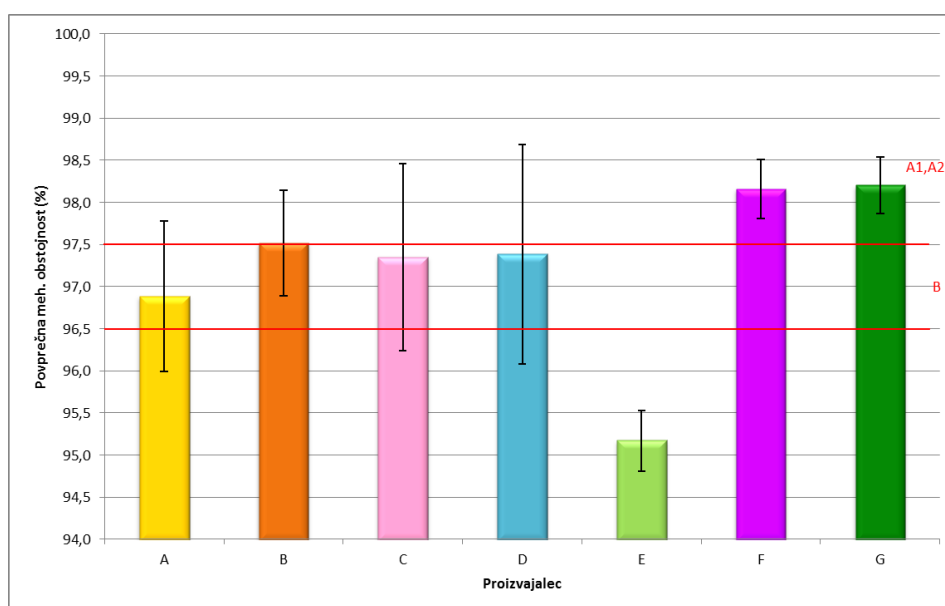


Slika 91: Povprečna vsebnost dušika v peletih pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure 91: Average nitrogen content with standard deviation in samples of pellets at selected producer; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

4.2.5 Mehanska obstojnost peletov izbranih proizvajalcev

Mehansko obstojnost peletov izbranih proizvajalcev smo določili na 37 vzorcih. V povprečju je imel najnižjo mehansko obstojnost peletov proizvajalec E, najvišjo pa proizvajalec G, kar je prikazano na sliki 92. Dejavniki, ki so vplivali na mehansko obstojnost pri proizvajalcu E, so opisani v poglavju 4.1.5.5, pri proizvajalcu G pa v poglavju 4.1.7.5. Povprečne mehanske obstojnosti so na grafu podane s standardnimi odkloni. Pri proizvajalcih A, C, D so standarni odkloni dokaj veliki, kar pomeni, da so se tudi vrednosti mehanske obstojnosti med vzorci peletov precej razlikovale. Povprečna mehanska obstojnost vseh vzorcev peletov izbranih proizvajalcev je znašala 97,2 %, kar jih skupno uvršča v kakovostni razred B. Relativna razlika med najvišjo in najnižjo mehansko obstojnostjo vzorcev peletov izbranih proizvajalcev je bila 4 %.



Slika 92: Povprečna mehanska obstojnost vzorcev peletov pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

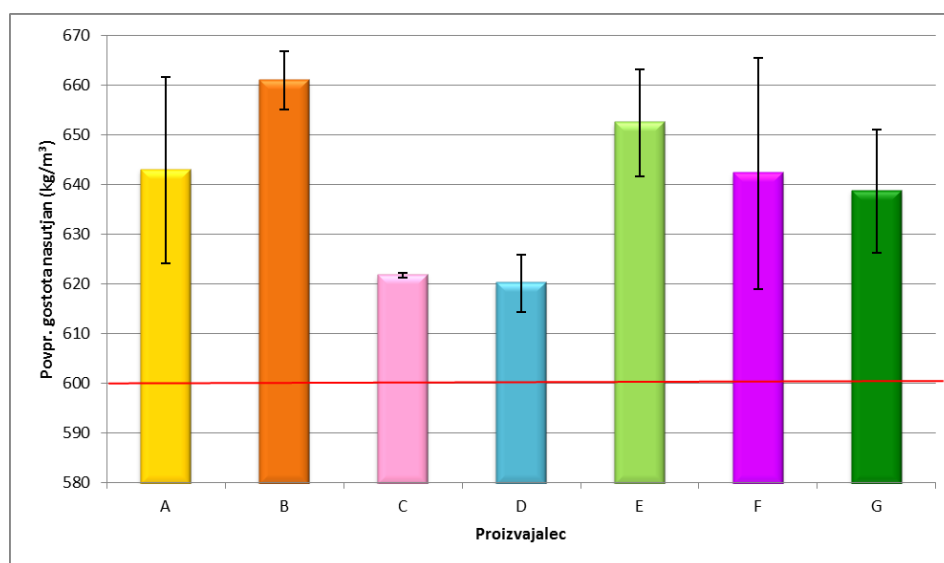
Figure 92: Average mechanical durability with standard deviation in samples of pellets at selected producer; red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B

Kriterij z vrednostjo mehanske obstojnosti najmanj 97,5 % za uvrstitev v kakovostni razred A1 oz. A2 je doseglo 16 vzorcev peletov vseh izbranih proizvajalcev. V razred B z mehansko obstojnostjo vsaj 96,5 % smo lahko uvrstili 12 vzorcev peletov, kriterija za uvrstitev v razrede pa ni doseglo 9 vzorcev peletov. Najnižjo vrednost 94,5 % smo izmerili pri proizvajalcu A, najvišjo vrednost 98,5 % pa pri proizvajalcu G (priloga B, slika B5).

Želeli smo ugotoviti tudi, kako negorljive mineralne substance, ki se odražajo v vsebnosti pepela in vsebnost vode v peletih vplivajo na mehansko obstojnost peletov. Determinacijski koeficient odvisnosti mehanske obstojnosti od vsebnosti vode je znašal 1,8 %, kar pomeni, da korelacije praktično ni bilo. Ravno tako je bil determinacijski koeficient odvisnosti mehanske obstojnosti od vsebnosti pepela, ki je znašal 0,8 %, prenizek, da bi lahko govorili o korelaciji med negorljivimi anorganskimi snovmi in mehansko obstojnostjo. Na mehansko obstojnost pri različnih proizvajalcih vpliva toliko različnih dejavnikov, da jih ne moremo postaviti na isti imenovalec. Delno lahko odvisnost mehanske obstojnosti peletov od vsebnosti negorljivih mineralnih substanc in vode razložimo le pri vsakem proizvajalcu posebej, kjer gre za bolj podobne pogoje (vrsta lesa, material, peletirna naprava,...), kar je opisano v poglavju 4.1.

4.2.6 Gostota nasutja peletov izbranih proizvajalcev

Vsi vzorci peletov izbranih proizvajalcev so imeli gostoto nasutja nad 600 kg/m^3 , ki je mejna vrednost za uvrstitev v kakovostne razrede A1, A2, in B. Analiza gostote nasutja je bila narejena na 35 vzorcih. Na sliki 93 so prikazane povprečne gostote nasutja skupaj s standardnimi odkloni pri posameznem proizvajalcu. Najvišjo povprečno gostoto nasutja je dosegel proizvajalec B, najnižjo pa proizvajalec D. Povprečna gostota nasutja vseh vzorcev peletov izbranih proizvajalcev je znašala $641,8 \text{ kg/m}^3$. Relativna razlika med najvišjo in najnižjo gostoto nasutja v vzorcih peletov izbranih proizvajalcev je bila 8 %.



Slika 93: Povprečna gostota nasutja vzorcev pri posameznem proizvajalcu podana s standardnim odklonom, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

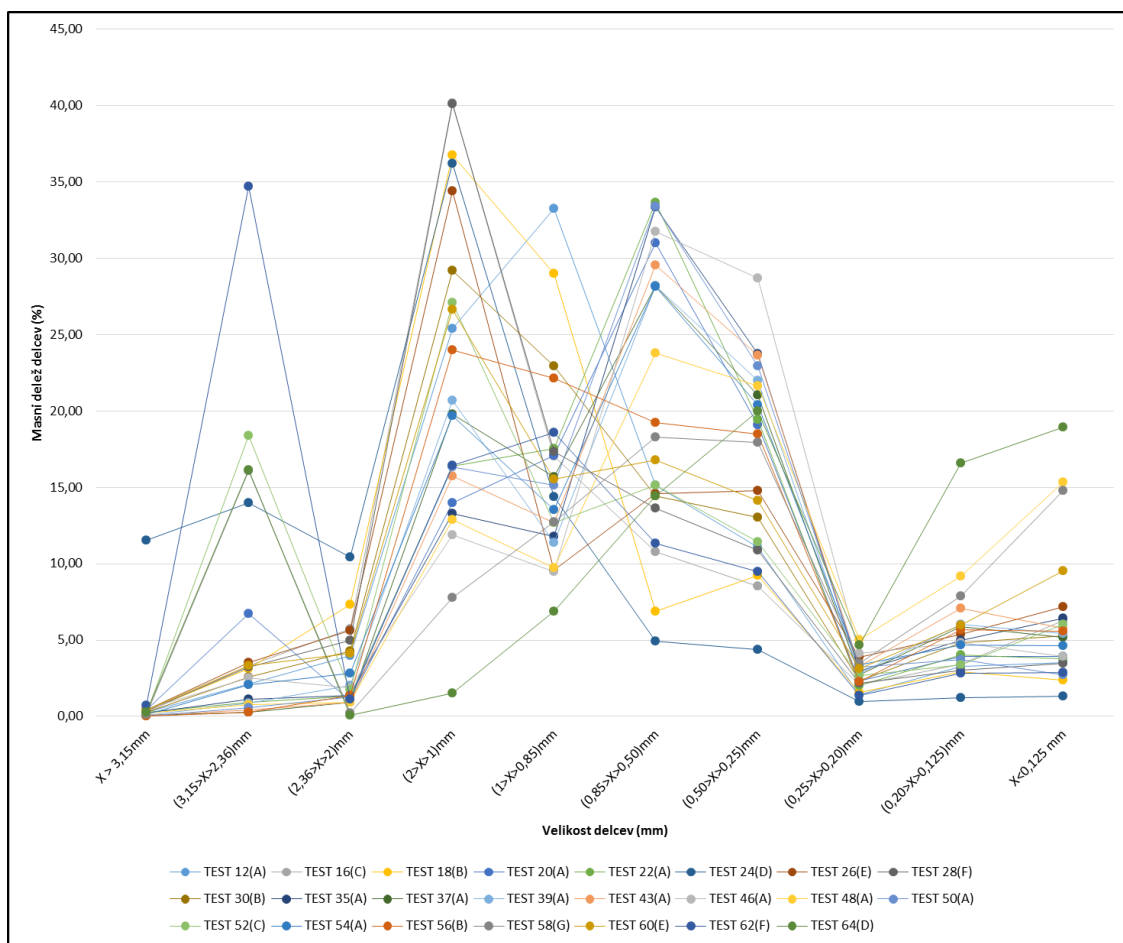
Figure 93: Average bulk density with standard deviation in samples of pellets at selected producer; red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

Najvišjo vrednost $665,6 \text{ kg/m}^3$ smo določili v vzorcu peletov Test 23 proizvajalca A, najnižjo vrednost pa v vzorcu peletov Test 21 ravno tako pri proizvajalcu A (priloga B, slika B6).

4.2.7 Porazdelitev velikosti delcev v surovini izbranih proizvajalcev

Želeli smo ugotoviti, kako je porazdelitev velikosti delcev vplivala na mehansko obstojnost. Na sliki 94 smo ponazorili porazdelitev velikosti delcev v surovini, iz katere so bili narejeni peleti pri izbranih proizvajalcih. Delce smo razporedili v 10 velikostnih razredov. Iz grafa lahko razberemo, da je bil pri vseh vzorcih, razen v vzorcu Test 24, najmanjši masni delež delcev v velikostnem razredu z delci večjimi od $3,15 \text{ mm}$. Peleti, narejeni iz surovine vzorca Test 24, so imeli mehansko obstojnost 96,5 %, kar je

relativno nizka vrednost. Največji masni delež delcev je bil pri večini vzorcev surovine v velikostnem razredu 1 mm do 2 mm. Ker na mehansko obstojnost peletov vpliva več dejavnikov, smo vpliv porazdelitve velikosti delcev v surovini na mehansko obstojnost peletov, ki so narejeni iz te surovine, naredili pri vsakem proizvajalcu posebej in so opisane v poglavju 4.1. Če smo obravnavali vsakega proizvajalca posebej, smo se do neke mere lahko izognili vplivu različnih vrst lesa, tipa materiala, vpliva peletirne naprave... Ti dejavniki se pri posameznih proizvajalcih večinoma ne spreminjajo.



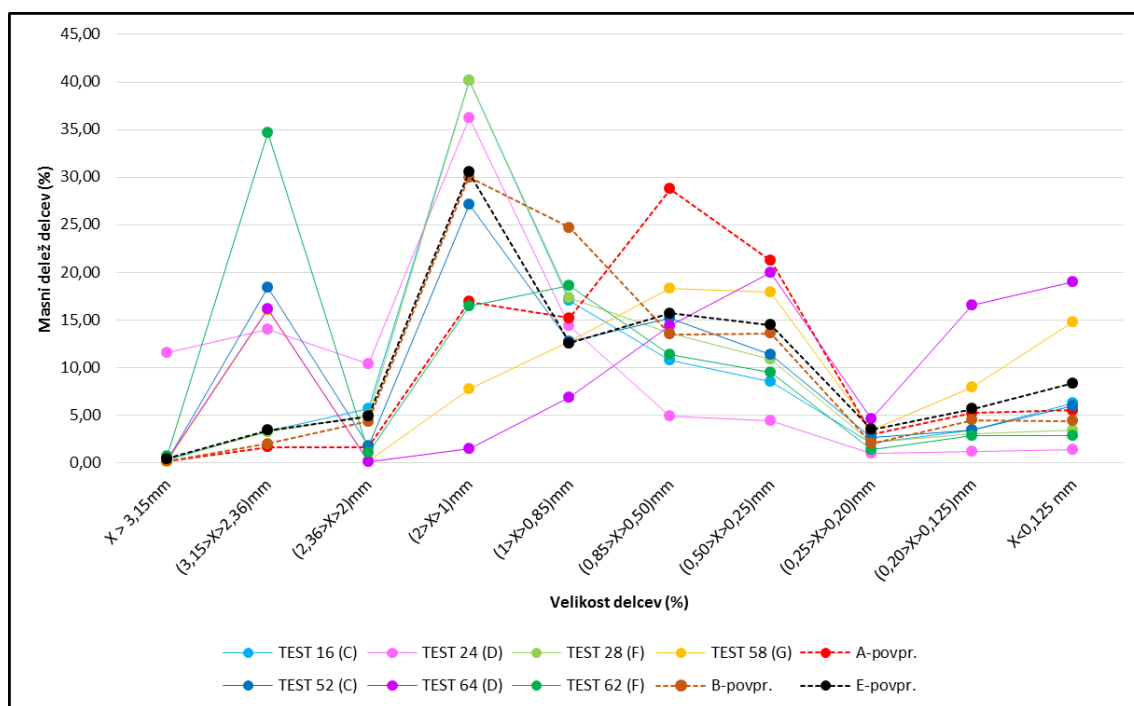
Slika 94: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri izbranih proizvajalcih

Figure 94: Particle size distribution of raw material at selected producers

Na sliki 95 smo pri proizvajalcih A, B in E prikazali povprečne vrednosti masnih deležev delcev v surovini, pri ostalih proizvajalcih pa so prikazane posamične vrednosti masnih deležev delcev vzorcev surovine. Pri teh treh proizvajalcih A, B in E je bila porazdelitev velikosti delcev pri posameznih vzorcih surovine podobna, zato smo v teh primerih vzeli povprečne vrednosti. S prikazom na tak način je graf bolj pregleden. Pri proizvajalcu A smo vzeli povprečne vrednosti masnih deležev delcev 11 vzorcev surovine, povprečna vrednost masnega deleža delcev proizvajalca B vključuje 3 vzorce surovine in proizvajalca E dva vzorca surovine.

Na sliki 95 lahko vidimo, da je bil v šestih primerih največji masni delež delcev v velikostnem razredu 1 mm - 2mm, v dveh primerih je bil največji masni delež v razredu 0,50 mm - 0,85 mm, vzorec surovine Test 64 proizvajalca D je imel največji masni delež delcev v velikostnem razredu 0,25 - 0,50 mm, izstopal pa je Test 62 proizvajalca F, ki je imel največji masni delež delcev surovine v velikostnem razredu od 2,36 - 3,15 mm. Vzorec iz te surovine je imel mehansko obstojnost kar 98,4 %, vendar nismo mogli pokazati, da sta parametra porazdelitev velikosti delcev in mehanska obstojnost v tem primeru povezana.

Glede na to, da je imel proizvajalec A dokaj enakomerno porazdelitev delcev pri vseh vzorcih surovine, pa je mehanska obstojnost peletov narejenih iz teh surovin kar precej nihala in sicer od 94,5 % do 98,5 %. Do neke mere smo lahko iz porazdelitve velikosti delcev pri tem proizvajalcu sklepali tudi na mehansko obstojnost, kar je opisano v poglavju 4.1.1.7.



Slika 95: Porazdelitev velikosti delcev surovine po velikostnih razredih pri izbranih proizvajalcih, pri proizvajalcih A, B in E je prikazana povprečna vrednost vzorcev surovine

Figure 95: Particle size distribution of raw material at selected producers; at producers A, B and E is showed average value of particle sizes in raw material

4.2.8 Pregled vseh parametrov pri posameznem proizvajalcu

Pelete skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2:2014 razvrščamo v kakovostne razrede A1, A2 in B. Preglednica 4 prikazuje uvrstitev proizvajalca glede na povprečno vrednost posameznega parametra v določen kakovostni razred.

Preglednica 4: Uvrstitev izbranih proizvajalcev peletov v kakovostne razrede skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2 glede na posamezen parameter

Table 4: Classification selected producers of pellets in quality classes in accordance with standard SIST EN ISO 17225-2 according to each parameter

Parameter	Proizvajalec A	Proizvajalec B	Proizvajalec C	Proizvajalec D	Proizvajalec E	Proizvajalec F	Proizvajalec G
Izvor in vir surovine	A2/B	A2/B	A2/B	A2/B	A2/B	A2/B	A2/B
Vsebnost vode	A1	A1	A1	/	A1	A1	A1
Pepel	A2	A1	A1	A1	B	A2	A2
Spodnja kurilnost	A1	A1	A1	A1/A2	A1	A1	A1
Dušik	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
Mehanska obstojnost	B	A1	B	B	/	A1	A1
Gostota nasutja	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1

Pri razvrščanju peletov v kakovostne razrede je iz preglednice 4 razvidno, da so rezultati precej slabi. Od sedmih proizvajalcev smo lahko namreč le pelete proizvajalca B pri vseh parametrih razen pri parametru izvor in vir surovine uvrstili v kakovostni razred A1. Najslabše rezultate pri razvrščanju peletov v kakovostne razrede je dosegel proizvajalec D, katerega peleti so le pri treh parametrih od šestih dosegli kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A1, pri parametru vsebnost vode celo niso dosegli kriterija za uvrstitev v razrede. Ravno tako peleti proizvajalca E pri parametru mehanska obstojnost niso dosegli kriterija za uvrstitev v kakovostne razrede.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

V raziskavi smo zbrali 69 vzorcev surovine in peletov, ki smo jih odvezemali pri izbranih proizvajalcih v Sloveniji. Zanimale so nas fizikalne lastnosti in kemična sestava surovine in peletov, ki so narejeni iz te surovine. Namen naloge je med drugim bil določiti kakovost peletov, ki so proizvedeni v Sloveniji in rezultate primerjati z mejnimi vrednostmi, ki jih podaja standard SIST EN ISO 17225-2:2014 za razvrščanje lesnih peletov. Največ vzorcev smo zbrali pri proizvajalcu A, vzorce smo zbirali eno leto. Pri tem proizvajalcu smo tako lahko spremljali, kako se vrednost parametrov in kakovost peletov spreminjajo skozi daljše časovno obdobje.

Surovino smo obravnavali predvsem z namenom določitve porazdelitve velikosti delcev, ker nas je zanimalo, kako velikost delcev v surovini vpliva na mehansko obstojnost peletov. V surovini smo določali tudi vsebnost vode, pepela in dušika ter kurilnost in te vrednosti potem primerjali z vrednostmi, ki smo jih izmerili v peletih. V večini primerov so se vrednosti za posamezen parameter v surovini ujemale z vrednostmi teh parametrov v peletih. To je predstavljalo neke vrste kontrolo, da smo res odvzeli surovino, iz katere so bili potem narejeni peleti.

Pri proizvajalcu A smo od oktobra 2013 do oktobra 2014 odvzeli 20 vzorcev peletov. Ker smo vzorce odvezemali tekom celega leta, nas je zanimalo, kako relativna zračna vlažnost vpliva na vsebnost vode v peletih. Le najvišje določena vsebnost vode v peletih je sovpadla z najvišjo relativno zračno vlažnostjo. Determinacijski koeficient, ki je znašal 22 %, je po naših pričakovanjih pokazal le šibko povezanost med vsebnostjo vode v peletih in relativno zračno vlažnostjo.

Domnevali smo (hipoteza 1), da drevesna vrsta in vrsta lesa vplivata na kakovost peletov. Ta hipoteza se je izkazala za pravilno. Drevesne vrste vplivajo na proces peletiranja, saj je pri povečani vsebnosti listavcev v surovini potreben višji tlak pri peletiranju, kot so v raziskavi ugotovili že Hansen in sodelavci (2007). Do podobnega zaključka sta prišla tudi Bradfield in Levi (1984), saj sta ugotovila, da iz čistega lesa listavcev proizvodnja peletov praktično ni možna. Iglavci imajo večjo vsebnost lignina kot listavci. Lignin prispeva k povezovanju delcev v peletu, deluje kot vezivo in to vpliva tudi na boljšo mehansko obstojnost. Tudi vsebnost lignina v skorji, grčah in kompresijskem lesu je večja kot v čistem lesu. Proizvajalec E je edini med proučevanimi proizvajalci uporabljal surovino, ki je imela večji delež listavcev kot iglavcev (v razmerju 7:3). Pri tem proizvajalcu smo izmerili najnižjo povprečno mehansko obstojnost peletov med vsemi izbranimi proizvajalci. Najvišjo povprečno mehansko obstojnost peletov smo določili pri proizvajalcu G, ki je za surovino uporabljal les jelke. Naše zaključke je potrdila tudi raziskava Filbakka in sodelavcev

(2002), v kateri so ugotovili, da se vsebnost lignina glede na vrsto lesa razlikuje in je pomemben dejavnik pri mehanizmi vezave v peletih.

Peleti, katerih surovina vsebuje tudi skorjo, imajo večjo vsebnost pepela kot peleti, ki so narejeni le iz čistega lesa. Proizvajalec G, ki skorje v surovini ni odstranjeval, je imel v primerjavi z drugimi proučevanimi proizvajalci večjo vsebnost pepela. Do takih izsledkov je v raziskavi prišel tudi Lehtikangas (2001), ki je najvišjo vsebnost pepela izmeril v peletih iz skorje in sečnih ostankov.

Znano je, da imajo iglavci v povprečju višjo kurilnost kot listavci, kar se je potrdilo tudi v naši raziskavi. Najvišjo kurilnost peletov v suhem stanju smo izmerili pri proizvajalcu C. Proizvajalec C je pri proizvodnji peletov uporabljal izključno smreko. Najnižjo kurilnost peletov v suhem stanju smo izmerili pri proizvajalcu E, ki je v surovino dodajal 70 % listavcev, kar je vplivalo na nižjo kurilnost. Kurilnost peletov narašča s povečevanjem deleža skorje v peletih, ker ima skorja višjo kurilnost kot les. Proizvajalec G, ki je imel največjo vsebnost skorje v peletih, je imel drugo najvišjo kurilnost peletov v suhem stanju. Do podobnih zaključkov so v svoji raziskavi prišli tudi Filbakk in sodelavci (2011).

Na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju najbolj vpliva vsebnost vode. Najnižjo povprečno spodnjo kurilnost smo izmerili v peletih proizvajalca D, ki so imeli največjo povprečno vsebnost vode. Determinacijski koeficient (R^2), ki smo ga izračunali za vse vzorce peletov, je pokazal 85,5 % odvisnost spodnje kurilnosti na dostavljeno stanje peletov od vsebnosti vode v peletih. Nepojasnen del variance pa smo si lahko razložili z vrsto in sestavo lesa.

Znano je tudi, da skorja vsebuje več dušika kot les (Oberberger in Thek, 2004). Največjo vsebnost dušika smo izmerili pri proizvajalcu G, ki je pelete proizvajal iz surovine, kjer skorja v pretežnem delu ni bila odstranjena. Povečana vsebnost dušika je lahko tako pomenila, da je proizvajalec uporabljal več skorje, v skrajnem primeru pa tudi, da proizvajalec ni uporabljal izključno čiste (neobdelane) lesne biomase.

Domnevali smo (hipoteza 2), da vsebnost vode v surovini po sušenju in vsebnost negorljivih anorganskih snovi, ki smo jih določili z vsebnostjo pepela v peletih, vplivata na mehansko obstojnost lesnih peletov. To domnevo smo lahko le deloma potrdili. Med procesom peletiranja mora biti vsebnost vode v surovini okoli 10 %, ker ima voda ključno vlogo pri nastanku vezi med delci. Surovine, ki ima vsebnost vode večjo od 15 %, se ne da peletirati, kar potrjujejo tudi raziskave Hansena in sodelavcev (2009). Voda namreč deluje kot eno od veziv. Vendar pa prevelika vsebnost vode povzroči polzenje surovine skozi luknjice v matrici in mehanska obstojnost je v tem primeru slaba. Pri proučevanju vsebnosti vode v surovini po sušenju nam je problem predstavljal

odvzem surovine. Surovina se je v peletirni napravi tekom proizvodnje peletov ves čas sušila in tako nismo mogli zagotoviti odvzema surovine s tako vsebnostjo vode, iz katere so bili potem narejeni peleti. Zato v tem primeru nismo mogli zaključiti, kako je vsebnost vode v surovini vplivala na mehansko obstojnost peletov.

Vsebnost pepela v peletih je odvisna od surovinske sestave peletov. Pepel sestavljajo negorljive mineralne substance surovine. Torej je bila vsebnost pepela preko vrste lesa oziroma surovine le posredni pokazatelj mehanske obstojnosti peletov. Količina pepela z večjim deležem skorje v peletih narašča. Večja vsebnost skorje pa prispeva k boljši mehanski obstojnosti. Proizvajalec G, ki je imel v peletih največji delež skorje v primerjavi z ostalimi proizvajalci, je imel zato tudi najboljšo mehansko obstojnost. To domnevo so potrdili tudi izsledki raziskave Filbakka in sodelavcev (2011), saj so ravno tako ugotovili, da imajo peleti iz skorje boljšo mehansko obstojnost kot peleti z nižjim deležem skorje.

Domnevo (hipoteza 3), da mehanska obstojnost lesnih peletov slovenskih proizvajalcev niha, kar je posledica soodvisnosti različnih dejavnikov, smo lahko do neke mere potrdili. Najnižja vrednost mehanske obstojnosti peletov izbranih proizvajalcev je bila 94,5 %, najvišja pa 98,5 %. Ugotovili smo, da je na mehansko obstojnost vplival delež skorje v surovini, vsebnost lignina in ekstraktivov (voski, smole,...), velikost delcev surovine... Tudi Hansen in sodelavci (2009) so v svoji raziskavi zaključili, da je mehanska obstojnost odvisna od več različnih dejavnikov. Da deluje lignin kot vezivo, se mora zmehčati. Vsebnost vode v surovini pa znižuje temperaturo mehčanja lignina. Temperatura mehčanja lignina z vsebnostjo vode surovine 8 % do 15 % je 110-135 °C. Vendar pa temperature surovine pri proizvodnji peletov nismo kontrolirali. Mehanska obstojnost peletov je odvisna tudi od tega, kako močno so bili peleti stisnjeni.

Rezultate bi lahko bolje ovrednotili, če bi bili vsi peleti iz enake surovine in narejeni na isti peletirni napravi in pod čim bolj podobnimi pogoji in bi potem spreminjali le enega od dejavnikov. Peleti, ki smo jih proučevali pri tej raziskavi, pa so bili pridobljeni od različnih proizvajalcev, narejeni na drugačnih peletirnih napravah, celo z drugačnimi tehnologijami za zgoščevanje. Prav tako je bila uporabljena drugačna surovina (drevesne vrste, žaganje, sekanci, skobljanci,...). Zato ne moremo pokazati nobene pomembnejše korelacije med mehansko obstojnostjo in drugimi parametri. Vidimo, da je mehanska obstojnost rezultat vpliva in delovanja različnih parametrov.

Hipotezo 4, da porazdelitev velikosti delcev surovine po mletju vpliva na mehansko obstojnost, smo lahko le delno potrdili. Na mehansko obstojnost peletov vpliva več različnih dejavnikov, zato je težko ločeno oceniti vpliv, ki ga ima porazdelitev velikosti delcev v surovini. Velika variabilnost v velikosti delcev naj bi bila najboljša za kakovost

peletov povezano z mehansko obstojnostjo. Za lažjo obravnavo smo se osredotočili na vzorce peletov, kjer je bila mehanska obstojnost večja od 97,5 %, kar je bilo dovolj za uvrstitev v kakovostni razred A1. Vzorca peletov Test 17 in 29 (z mehansko obstojnostjo nad 97,5 %) sta imela 40 % masni delež delcev surovine v velikostnem razredu 1-2 mm. Obe surovini sta imeli le neznameniten masni delež delcev večjih od 3,15 mm in okoli 5 % masnega deleža delcev manjšega od 0,125 mm. Vzorci peletov Test 33, 57 in 65 so imeli dokaj enakomerno porazdelitev velikosti delcev v surovini. Vzorca Test 33 in 65 sta imela v surovini večjo masno vsebnost delcev manjših od 0,125 mm (15 % in 19 %), medtem ko jih je bilo v surovini peletov Test 57 okoli 5%. Tudi Payne (2006) je v svoji raziskavi ugotovil, da je v surovini mešanica delcev z različnimi velikostmi najbolj optimalna za mehansko obstojne pelete. Pri vzorcih peletov Test 23, 51 in 63, ki so imeli ravno tako mehansko obstojnost višjo od 97,5 %, pa nismo mogli izpostaviti nobene posebne značilnosti pri porazdelitvi velikosti delcev surovine.

Po mnenju Stelte in sodelavcev (2012) naj masni delež finih delcev manjših od 0,5 mm v surovini ne bi presegel 10 % oziroma 20 %, kar naj bi vplivalo na slabšo mehansko obstojnost. Porazdelitev velikosti delcev smo naredili na 23 vzorcih surovine. Samo pri šestih vzorcih je bil masni delež finih delcev manjših od 0,5 mm manjši od 20 %. Mehanska obstojnost peletov, narejenih iz teh surovin, je dosegla vrednosti od 96,3 % do 98,5 %. Pri ostalih vzorcih z večjo količino finih delcev v surovini pa so bile vrednosti mehanske obstojnosti peletov od 94,5 % do 98,3 %. Iz teh podatkov nismo mogli sklepati, da je prevelika količina finih delcev slabše vplivala na kakovost peletov.

Manjši delci se bolje kondicionirajo kot veliki. Proizvajalec D, ki je imel v primerjavi z ostalimi proizvajalci v surovini povečano vsebnost delcev večjih od 3,15 mm, je imel mehansko obstojnost peletov narejenih iz te surovine le 96,5 %. Večji delci imajo mesta, kjer lahko hitreje pride do razpoka. Po ugotovitvah MacBaina (1966) naj bi bolje zmleti delci v surovini pomenili boljšo kakovost peletov.

Domnevali smo (hipoteza 5), da vsebnost skorje v peletih vpliva na vsebnost pepela, kurilnost in mehansko obstojnost. Pri proizvajalcu G se je pokazalo, da je povečana vsebnost skorje v surovini vplivala na povečano vsebnost pepela v peletih. Več kot je skorje v peletih, boljša je mehanska obstojnost, kar se je pokazalo tudi pri proizvajalcu G. Skorja ima v primerjavi z lesom namreč več ekstraktivov in lignina, ki pomagajo pri vezavi delcev in povečajo mehansko obstojnost peletov. Ker imajo ekstraktivi in lignin višjo kurilnost kot celuloza in ker jih je v skorji več, to vpliva tudi na kurilnost samih peletov, ki so narejeni iz skorje. Našo domnevo so potrdili tudi izsledki raziskave Filbakka in sodelavcev (2011). Proizvajalec G je glede na zgornjo kurilnost peletov v suhem stanju zaostal le za enim proizvajalcem.

Skorja je tudi manj hidrofilna kot les. To pomeni, da peleti, ki so bili narejeni iz skorje, adsorbirajo manj vode, to pa je vplivalo na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju.

Velika vsebnost pepela v peletih je lahko tudi pokazatelj, da je imel proizvajalec probleme s kontaminacijo lesa oziroma surovine z mineralnimi delci (zemlja, pesek).

V Sloveniji je tehnologija izdelave peletov v razvoju, zato se je pokazala potreba po uvedbi nadzora kakovosti sistema za trg lesnih peletov v Sloveniji. Na Gozdarskem inštitutu Slovenije so leta 2015 že vzpostavili sistem zagotavljanja in kontrolo kakovosti peletov ter tržno znamko S4Q. S to tržno znamko naj bi se proizvajalcem peletov v Sloveniji nudila podpora pri nadzorovanju in vzdrževanju opredeljenega nivoja kakovosti proizvedenih peletov.

Pri proučevanju kakovosti peletov nismo upoštevali tehničnih parametrov peletirne naprave (tlak, temperatura peletiranja, moč naprave,...) in periodike vzdrževanja (menjava ali obnova matrice,...) peletirne naprave, kar je tudi pomembno vplivalo na posamezne parametre. Pri nalogi smo večji poudarek namenili proučevanju same surovine in proizvoda. Verjetno pa bi bilo v prihodnosti smiselno pri slovenskih proizvajalcih proučiti tudi tehnične parametre peletirnih naprav in pogostost vzdrževanja, kar vpliva na kakovost peletov.

Zaključki naše študije so naslednji:

- Lastnosti peletov izbranih proizvajalcev v Sloveniji so bile tesno povezane z lastnostmi surovine, ki so jo uporabili v proizvodnji.
- Proizvajalci so za proizvodnjo peletov v največji meri uporabljali les iglavcev.
- Pokazalo se je, da je bila drevesna vrsta pomembna za kakovost peletov. Iglavci so se izkazali za bolj ustrezne pri proizvodnji kakovostnih lesnih peletov. Iglavci imajo v primerjavi z listavci večjo vsebnost lignina, kar pripomore k boljši mehanski obstojnosti. Tudi kurilnost je pri iglavcih višja kot pri listavcih.
- V različnih raziskavah je bilo ugotovljeno, da naj bi vsebnost vode v surovini pomembno vplivala na mehansko obstojnost peletov. Vendar pa pri vzorčenju surovine nismo mogli zagotoviti, da bi surovino odvzeli na zadnji stopnji sušenja pred peletiranjem. Tako tudi nismo mogli sklepati, kakšen vpliv je imela vsebnost vode v surovini na mehansko obstojnost peletov.

- Vsebnost skorje v peletih je vplivala na mehansko obstojnost, ker so imeli peleti z več skorje boljšo mehansko obstojnost. Ker ima skorja večjo vsebnost pepela v primerjavi z lesom, je bila vsebnost pepela v peletih posredni pokazatelj mehanske obstojnosti.
- V naši raziskavi smo pokazali, da so na mehansko obstojnost peletov vplivali vsebnost skorje in s tem delež pepela, porazdelitev velikosti delcev v surovini in drevesne vrste.
- Skorja v peletih je bila pomemben dejavnik, ki je vplivala na kakovost peletov. Prisotnost skorje pomeni večjo vsebnost pepela, kar zmanjšuje kakovost peletov, vendar pa skorja izboljšuje mehansko obstojnost. Skorja ima tudi višjo kurilnost v primerjavi z lesom. Ker ima skorja tudi večjo vsebnost lignina kot čisti les, še dodatno pripomore k boljši mehanski obstojnosti. Pomembno je, da v surovini določimo optimalno količino skorje, ki prispeva k boljši kakovosti peletov.
- V peletih, ki so bili narejeni izključno iz lesa iglavcev, smo izmerili višjo kurilnost kot v peletih, ki so bili narejeni iz mešanice iglavcev in listavcev. Višja kurilnost je bila povezana tudi v večjo vsebnostjo skorje v peletih. Na spodnjo kurilnost v dostavljenem stanju peletov pa je najbolj vplivala vsebnost vode.
- Preverili smo tudi relativno razliko med največjo in najmanjšo vrednostjo parametra za vsako proučevano lastnost, ki smo jo določili na vzorcih peletov. Največja relativna razlika 78 % med največjo in najmanjšo vrednostjo je bila določena pri dušiku. Razlog tako velike razlike je bila verjetno tudi nizka vsebnost dušika v lesu, ki je bila že na meji zaznave instrumenta. Relativna razlika med najnižjo in najvišjo določeno vsebnostjo pepela v peletih je bila 73 %, sledila je vsebnost vode v peletih z relativno razliko 56 %. Razlika med najvišjo in najnižjo določeno vrednostjo gostote nasutja in spodnje kurilnosti na dostavljeno stanje je bila le 7 % oziroma 8 %. Najmanjšo relativno razliko pa smo določili pri mehanski obstojnosti in sicer je bila le 4 %. Iz relativnih razlik med najvišjimi in najnižjimi vrednostmi posameznih parametrov smo lahko videli, v kakšnem obsegu so se vrednosti proučevanih parametrov spreminjale in v katerih primerih glede na posamezen parameter imamo še veliko možnosti za izboljšavo kakovosti peletov.
- Pelete izbranih proizvajalcev smo glede na povprečno vsebnost vode in pepela, spodnje kurilnosti, vsebnosti dušika, mehanske obstojnosti in gostote nasutja uvrstili v kakovostne razrede skladno s standardom SIST EN ISO 17225-2. Rezultati so bili razmeroma slabi, saj so le peleti proizvajalca B pri vseh parametrih dosegli kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A1. Sledili so peleti proizvajalca F in G, ki so bili pri parametru vsebnost pepela uvrščeni v razred A2, pri ostalih parametrih pa v razred A1. Peleti proizvajalca C so bili glede na mehansko obstojnost uvrščeni v razred B, pri

ostalnih parametroh pa v razred A1. Peleti proizvajalca A pri vsebnosti pepela in mehanski obstojnosti niso dosegli kriterija za uvrstitev v razred A1, pri mehanski obstojnosti so bili uvrščeni v razred B. Peleti proizvajalca E so bili glede na vsebnost pepela uvrščeni v razred B, pri mehanski obstojnosti pa niso dosegli kriterija za uvrstitev v razrede. Najslabše so se odrezali peleti proizvajalca D, ki pri vsebnosti vode niso dosegli kriterija za uvrstitev v razrede, pri spodnji kurilnosti so bili na meji med razredoma A1 in A2, pri mehanski obstojnosti peletov pa smo jih lahko uvrstili v razred B.

- Najmanj problemov za doseganje kriterijev za uvrstitev v kakovostne razrede sta proizvajalcem povzročala parametra gostota nasutja in vsebnost dušika v peletih, kjer so peleti vseh izbranih proizvajalcev dosegli kriterij za uvrstitev v kakovostni razred A1. Najslabše rezultate za uvrstitev v kakovostne razrede pa so peleti izbranih proizvajalcev dosegli pri vsebnosti pepela in mehanski obstojnosti, kjer so kriterij za uvrstitev v razred A1 dosegli le trije od sedmih proizvajalcev.

- Proučevali smo fizikalne lastnosti in kemično sestavo surovine in peletov z namenom določiti kakovost peletov in medsebojni vpliv proučevanih parametrov. Izkazalo se je, da je veliko vplivnih faktorjev na kakovost peletov mogoče pripisati tehnološkemu procesu. Predvsem pri mehanski obstojnosti je tehnologija proizvodnje peletov ključna. Znano je, da je za mehansko obstojnost peletov izredno pomembno ustrezno ohlajanje peletov takoj za matrico v peletirni napravi. V nasprotnem primeru lahko v peletu nastanejo napetosti med vročo sredico in ohlajenim zunanjim slojem, kar privede do razpok v peletu. Dejavnika ohlajanja v peletih nismo posebej proučevali. V nadaljnjih preiskavah bi bilo smiselno postopku ohlajanja posvetiti večjo pozornost. Na mehansko obstojnost peletov vplivata tudi tlak pri stiskanju peletov in temperatura surovine pred stiskanjem, čemur se v naši raziskavi tudi nismo posebej posvetili.

Proizvodnja peletov v Sloveniji je vsekakor lahko predmet še nadaljnjih raziskav, predvsem v smeri proučitve tehnoloških parametrov proizvodnje peletov. Zanimivo bi bilo tudi spremljati kakovost peletov skozi daljše časovno obdobje.

Za nadzor, vzdrževanje in izboljšanje kakovosti lesnih peletov v Sloveniji je smiselno vzpostaviti sistem zagotavljanja in kontrolo kakovosti peletov. S tržno znamko S4Q, ki so jo leta 2015 ustanovili na Gozdarskem inštitutu Slovenije, se slovenskim proizvajalcem peletov nudi ustrezna podpora. Za zagotavljanje kakovosti bi bilo dobro periodično spremljati ključne parametre peletov (vsebnost vode in pepela, kurilnost, vsebnost dušika, mehanska obstojnost, gostota nasutja, sestava surovine) in njihove proizvodnje (moč peletirne naprave, vzdrževanje naprave, tlak, temperatura peletiranja, postopek ohlajanja peletov...).

6 POVZETEK (SUMMARY)

6.1 POVZETEK

Danes se več kot polovica svetovne produkcije lesa porabi kot gorivo. Zaradi želje po zmanjšanju emisij ogljikovega dioksida v ozračje postaja izkoriščanje lesne biomase za proizvodnjo toplote in električne energije vse bolj pomembno. Les ima zaradi svoje porozne strukture majhno gostoto, kar predstavlja problem pri izkoriščanju lesa kot vira energije. Tudi visoka vsebnost vode, nepravilna oblika in različne velikosti povečujejo stroške proizvodnje toplote in elektrike. Gostoto biomase lahko povečamo s stiskanjem v pelete z mehanskim postopkom, pri katerem se uporablja pritisk na biomaso, da se poruši celična struktura in s tem poveča gostota materiala. Glavne prednosti lesnih peletov so večja gostota energije, nižji stroški prevoza in skladiščenja, enostavnejše rokovanje, manjše onesnaževanje, nižja vsebnost prahu in možnost avtomatizacije in optimizacije izgorevanja.

Povpraševanje po obnovljivih virih energije še naprej raste in v Sloveniji proizvodnja peletov v zadnjem času doživlja velik razcvet.

Namen naloge je bil pridobiti pregled fizikalnih lastnosti in kemične sestave lesnih peletov proizvedenih v Sloveniji pri sedmih izbranih proizvajalcih. Dobljene rezultate smo primerjali tudi z mejnimi vrednostmi opredeljenimi v mednarodnem standardu SIST EN ISO 17225-2. Parametri, ki smo jih določali na vzorcih peletov, so bili vsebnost vode, pepela dušika, kurilnost, mehanska obstojnost in gostota nasutja. V surovini smo določali porazdelitev velikosti delcev, vsebnost vode, pepela, dušika in kurilnost.

Cilji naše naloge so bili raziskati vplive drevesne vrste in vrste lesa (svež/star les, delež skorje...) na kakovost peletov. Zanimalo nas je, kakšna je vsebnost pepela in kurilnost v različnih vrstah peletov. Proučevali smo dejavnike, ki vplivajo na mehansko obstojnost. Na surovini smo določevali porazdelitev velikosti delcev in ugotavljali, kako vpliva na mehansko obstojnost. Raziskali smo tudi, kako prisotnost skorje v peletih vpliva na posamezne parametre.

Pokazalo se je, da drevesne vrste in vrsta lesa vplivajo na kakovost peletov. Iglavci imajo večjo vsebnost lignina kot listavci, ki deluje kot vezivo in zato vpliva tudi na boljšo mehansko obstojnost pri peletih narejenih iz lesa iglavcev. Proizvajalec E, ki je edini uporabljal surovino z večjim deležem listavcev kot iglavcev, je imel najnižjo povprečno mehansko obstojnost peletov med vsemi izbranimi proizvajalci.

Iglavci imajo v povprečju večjo kurilnost kot listavci. Najvišjo kurilnost peletov v suhem stanju smo izmerili pri proizvajalcu C, ki je pri proizvodnji peletov uporabljal le smrekovino. Najnižjo kurilnost peletov v suhem stanju smo izmerili pri proizvajalcu E, ki je v surovino dodajal 70 % listavcev. Kurilnost peletov narašča s povečevanjem deleža skorje v peletih, ker ima skorja več ekstraktivov in lignina, ki imajo višjo kurilnost kot celuloza. Proizvajalec G, ki je imel največjo vsebnost skorje v peletih, je imel drugo najvišjo kurilnost peletov v suhem stanju. Na spodnjo kurilnost peletov v dostavljenem stanju najbolj vpliva vsebnost vode. Tako smo najnižjo povprečno spodnjo kurilnost izmerili v peletih proizvajalca D, ki so imeli največjo povprečno vsebnost vode.

Največjo vsebnost dušika smo izmerili pri proizvajalcu G, ki je proizvajal pelete, ki so vsebovali skorjo. Skorja vsebuje več dušika kot čisti les.

Pri proučevanju vpliva vsebnosti vode v surovini po sušenju na mehansko obstojnost peletov nam je problem predstavljal odvzem surovine. Surovina se tekom proizvodnje peletov ves čas suši in tako nismo mogli zagotoviti odvzema surovine s tako vsebnostjo vode, iz katere so potem narejeni peleti. Tako tudi nismo mogli sklepati, kako vsebnost vode surovine vpliva na mehansko obstojnost peletov.

Pri proizvajalcu G se je pokazalo, da povečana vsebnost skorje v surovini vpliva na povečano vsebnost pepela v peletih. Večja vsebnost skorje pa prispeva k boljši mehanski obstojnosti, ki smo jo ravno tako izmerili pri proizvajalcu G.

Najnižja mehanska obstojnost peletov izbranih proizvajalcev je bila 94,5 %, najvišja pa 98,5 %. Na mehansko obstojnost vpliva delež skorje v surovini, vsebnost lignina in ekstraktivov, vsebnost vode, velikost delcev v surovini... Rezultate bi lahko bolje ovrednotili, če bi bili vsi peleti narejeni iz enake surovine in proizvedeni na isti peletirni napravi ter pod čim bolj podobnimi pogoji in bi nato spreminjali le enega od dejavnikov.

S pomočjo vrednosti masnih deležev velikosti delcev v surovini smo le delno lahko ocenili vpliv na mehansko obstojnost peletov. Ugotovili smo, da na boljšo mehansko obstojnost vpliva enakomerna porazdelitev delcev. Na mehansko obstojnost pa slabo vpliva povečan masni delež delcev večjih od 3,15 mm. Proizvajalec D, ki je imel v primerjavi z ostalimi proizvajalci v surovini povečano vsebnost delcev večjih od 3,15 mm, je imel mehansko obstojnost peletov le 96,5 %.

6.2 SUMMARY

Today more than half of the world production of wood is needed for combustion. The utilization of biomass for energy production is an attractive option for power producers to reduce their carbon dioxide emissions. Because of its porous structure, the wood has a low density, which indicates the problem for utilization wood as a source of energy. Because of high moisture content, uniform shape and sizes increased costs for heat and electricity production. One solution to these problems is the densification of biomass materials into pellets by mechanical process with high pressure to break up the cell structure and the bulk density increased. Densification of biomass materials increases the bulk density of biomass and could reduce the costs of transportation; storage, handling, and results in less pollution, lower amount of fine fraction and controlled combustion process.

Demand for renewable sources of energy production still continues to grow. Pellet production in Slovenia is recently growing in development.

The aim of the thesis was to obtain an overview of the physical properties and chemical compounds in wood pellets produced by seven selected producers in Slovenia. The results obtained were compared with the values specified in the European standard for wood pellet SIST EN ISO 17225-2. Parameters, which were determined on samples of the pellets, were moisture, ash and nitrogen content, heating value, mechanical durability and bulk density. On samples of raw materials particle size distribution were determined, moisture, ash and nitrogen content and heating value.

The objectives of our research were to investigate the effects of tree species and wood provenance to pellet quality. We investigated the ash content and calorific value of different types of pellets. We studied the factors which influence the mechanical durability. In the raw material the particle size distribution was analyzed and measured as to how it affects the mechanical durability. We also studied how the presence of bark in pellets affects the individual parameters.

Tree species and wood provenance has been found to influence the final pellet quality. Lignin is a natural binder between wood particles. Softwoods have a higher content of lignin than hardwoods and therefore pellets made from softwoods have a better mechanical durability than pellets made from hardwoods. Lignin enhances the binding characteristics of densified pellets. Producer E was the only one, which used raw material with a greater proportion of hardwoods than softwoods. This had the lowest mechanical durability of the pellets of all selected producers.

Softwoods have a high calorific value than hardwoods. The highest gross calorific value for a dry sample of pellets was measured at producer C. Producer C produces pellets from pine (*Picea abies*). The lowest gross calorific value for a dry sample of pellets was measured at the producer E. They used for pellet production 70 % of hardwoods. The higher calorific value of bark is due to its higher content of extractives and lignin, which have greater calorific values than cellulose. Producer G, which had the highest content of bark in pellets, had the second highest calorific value for dry samples of pellets. The net calorific value for a sample of pellets as received is most affected by moisture content. Therefore, the lowest average net calorific value for samples of pellets as received was measured in pellets from producer D, which had the highest average moisture content in pellets.

The highest nitrogen content was measured in pellets from manufacturer G, which produced pellets with bark. Bark has a higher content of nitrogen compared to wood.

We studied the effect of water content in the raw material after drying of the mechanical durability of the pellets. But we had problems with sampling the raw material. During the production of pellets, the raw material is continuously drying and we could not take the raw material with the final moisture content. So we could not conclude how the moisture content of raw materials affects the mechanical durability of the pellets.

In the case of producer G it has been shown that an increased content of bark in the raw materials influence of the increased ash content in the pellets. Pellets made from bark shows good mechanical durability at producer G.

Selected producers had the lowest value of mechanical durability 94.5 % and the highest value 98.5 %. Bark content, content of lignin and extractives, moisture and ash content, particle size distribution are an important influencer of pellet durability. The results could be better evaluated if all the pellets were made from the same raw materials and manufactured with the same pelleting equipment and under similar conditions as possible and then we should change only one factor.

With the particle size distribution in the raw material we could only partially evaluate the influence on mechanical durability of pellets. We have found that good mechanical durability is related with the uniform distribution of particle sizes. Particle sizes of greater than 3.15 mm have a negative effect on mechanical durability. Producer D had a mechanical durability of only 96.5 %, because they had in the raw material an increased amount of particles greater than 3.15 mm.

7 VIRI

- Adapa P. K., Tabil L. G., Schoenau G. J., Crerar, B., Sokhansanj, S. 2002. Compression characteristics of fractionated alfalfa grinds. *Powder Handling and Processing*, 14: 252-259
- Alakangas E. 2010. New European pellets standards. V: *Proceedings of the World Sustainable Energy Days, European Pellets Conference*, March 2010, Wels. Energiesparverband Oberösterreich, Linz
- Assarsson A. 1969. Some reactions during chip storage and how to control them. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 70, 18: 74-79
- Baerenthaler G., Zischka M., Haraldsson C., Obernberger I. 2006. Determination of major and minor ash-forming elements in solid biofuels. *Biomass and Bioenergy*, 30, 11: 983-997
- Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., Ball R., Bole T., Chudziak C., Faaij A., Mozaffarian H. 2009. *Bioenergy - A Sustainable and Reliable Energy source: A review of Status and Prospects*, International Energy Agency, Paris: 108 str.
- Bradfield J., Levi M. P. 1984. Effect of species and wood to bark ratio on pelting of southern woods. *Forest products journal*, 34: 61-63
- Butala V., Turk J. 1998. Lesna biomasa – neizkoriščeni domači vir energije. Ljubljana. FEMOPET Slovenija: 20 str.
- Carlile M. J., Watkinson S.C. 1995. *The fungi*. San Diego, Academic Press: 482 str.
- Chen P. Y. S. 1989. An evaluation of wood/coal pellets made in laboratory pelletizer. *Forest products journal*, 39: 53-58
- Chow S.Z., Pickles K. J. 1971. Thermal softening and degradation of wood and bark. *Wood and Fiber*, 3:166-178
- Demirbas A. 2006. Energy priorities and new energy strategies. *Energy education science and technology*, 16: 53-109
- Dunnett A. J., Shah N. 2007. Prospects for bioenergy. *Journal of biobased materials and bioenergy*, 1: 1-18

- European Biomass Association (AEBIOM). 2013. European bioenergy outlook 2013-statistical report 2013. Brusel
- European Biomass Association (AEBIOM). 2014. Bioenergy Outlook 2014-statistical report 2014. Brusel
- Fantozzi F., Barbanera M., Buratti C. 2005. Life cycle analysis of wood pellet from SRC through direct measuring of energy consumption. V: 4th European Biomass Conference and Exhibition. Biomass Energy, Ind. Clim. Prot., Vol. Paris: 5str.
- Filbakk T., Jirjis R., Nurmi J., Høibø O. 2011. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. Biomass and Bioenergy, 35: 3342-3349
- Flat die, 2015. General Dies S.r.l., Verona, Italy
<http://www.generaldies.com/index.php?lang=eng&blk=dies-and-roller-shells>
- Gil M. V., Oulego P., Casal M. D., Pevida C., Pis J. J., Rubiera F. 2010. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. Bioresource Technology, 101: 8859–8867
- Gorišek Ž. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Oddelek za lesarstvo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani: 178 str.
- Gref R. 2006. Grundläggande Pelleteringsstudier - Vedråvaran - Pellets, from Industriell production av bränspellets. Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap: 22-27
- Hakkila P. 1989. Utilization of residual forest biomass. Berlin: Springer, 568 str.
- Hansen M. T., Rosentoft Jein A., Hayes S., Bateman P. 2009. English Handbook for Wood Pellet Combustion. Pelletsatlas. National Energy Foundation, Davy Avenue: 86 str.
- Hartley I. D., Wood L. J. 2008. Hygroscopic properties of densified softwood pellets. Biomass and Bioenergy, 32: 90-93
- Hartley I. D., Avramidis S. 1994. Water clustering phenomenon in two softwoods during adsorption and desorption processes. Wood Science, 13, 4: 467-472
- Haykiri-Acma H., Yaman S. 2008. Effect of co-combustion on the burnout of lignite/biomasa blends: a Turkish case study. Waste Manage, 28: 2077-2084

- Heffner L. E., Pfost H.B. 1973. Gelatinization during pelleting. *Feedstuff*, 45: 33
- Hellrigl B. 2004. Report: il pellet - notizie ed informazioni sulla produzione e l'impiego, Compagnia delle Foreste – Arezzo, Padova: 81 str.
- Holley C. A. 1983. The densification of biomass by roll briquetting. *Proceedings of the institute for Briquetting and Agglomeration*, 18: 95-102
- Holm J., Henriksen U., Wand K. 2007. Experimental verification of novel pellet model using a single pelleter unit. *Energy Fuels*, 21: 2446-2449
- Igathinathane C., Womac A. R., Sokhansanj S., Pordesimo L. O. 2007. Moisture sorption thermodynamic properties of corn stover fractions. *Transactions of the ASABE*, 50: 2151-2160
- Iyer P. V. R., Rao T. R., Grover P. D. 2002. Biomass - thermochemical characterization, 3rd edition. IIT, Delhi: MNES, GARP: 42 str.
- Jirjis R., Öhman M., Vinterbäck J. 2006. Pellets quality- effect of raw material properties and manufacturing process parameters (In Swedish with English summary.) Report No. 14. Uppsala, Sweden: Department of Bioenergy, Swedish University of Agricultural Sciences: 106 str.
- Jirjis R., Theander O. 1990. The effect of seasonal storage on the chemical composition of forest residue chip. *Scandinavian Journal of forest research*, 5: 437-448
- Johansson L., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullina C., Potter A. 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment*, 38: 4183-4195
- Kåberger T. 2002. Opening address. Speech presented at the "Pellets 2002: The first world conference on pellets", Stockholm, Sweden
- Kaliyan N., Morey R. V. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33: 337-359
- Kaliyan N., Morey R. V. 2010. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101, 3: 1082-1090
- Katers J. F., Snippen A. J., Puettmann M. E. 2012. Life-cycle inventory of wood pellet manufacturing and utilization in wisconsin. *Forest products journal*, 62: 289-295

- Kofman P. 2007. Simple ways to check wood pellet quality. Coford Connect, 11: 7-8
- Krajnc N., Piškur M. 2011. Kakovost lesnih goriv. Drva in lesni sekanci. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, Silva slovenica: 23 str.
- Lam P. S., Sokhansanj S., Xiaotao T., Bi X .T., Lim C. J., Larsson S.H. 2012. Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). Bioresource Technology, 116: 396-402
- Lam P. S., Sokhansanj S., Bi X.T., Lim C .J. 2012. Colorimetry applied to steam-treated biomass and pellets made from western douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). Transactions of the ASABE, 55: 673-678
- Lam P. S., Sokhansanj S., Bi X., Lim C. J., Melin S. 2011. Energy input and quality of pellets made from steam-exploded Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*). Energy Fuels, 25: 1521–1528
- Larsson S. H., Rudolfsson M., Nordwaeger M., Olofsson I., Samuelsson R. 2013. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. Applied Energy, 102: 827-832
- Larsson S. H., Thyrel M., Geladi P., Lestander T. A. 2008 High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. Bioresource Technology, 99: 7176-7182
- Lee S., Ahn B. J., Choi D. H., Han G.-S., Jeong H.-S., Ahn S. H., Yang I. 2013. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. Biomass and Bioenergy, 48: 1-9
- Lehtihangas P. 1999. Quality properties of fuel pellets from forest biomass, Licentiate thesis, The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Management and Products
- Lehtikangas P. 2000. Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy, 19, 5: 287-293
- Lehtikangas P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy, 20, 5: 351-360

- Lestander T. A., Holmberg C., Stenberg L., Lehtonen R. 2012. Towards multivariate statistical process control in the wood pellet industry. *Biomass and Bioenergy*, 45: 152-158
- Li Y., Liu H. 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19: 177-186
- Lycksell S. 2003. Biobränsle-en introduction, Information blad, Skellefteå Kraft AB
- MacBain R. 1966. Pelleting animal feed. Chicago, IL: American Feed Manufacturing Association: 28 str.
- Maier D. E., Bakker-Arkema F. W. 1992. The counterow cooling of feed pellets. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 53: 305-319
- Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. 2004. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. *Can. Biosystems Engineering*, 46: 355-361
- Mani S., Tabil L.G., Sokhansanj S. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30: 648-654
- McGinn D., Green D., Hinrichs-Rahlwes R., Sawyer S., Sander M., Taylor R. s sod. 2013. Global status report. 2013. Paris: 181 str.
- Munir S., Daood S. S., Nimmo W., Cunliffe A. M., Gibbs B. M. 2009. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology*, 100: 1413-1418
- Nielsen N. P. K., Gardner D., Poulsen T., Felby C. 2009. Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 41: 414-425
- Nielsen N. P. K., Holm J. K., Felby C. 2009. Effect of fiber orientation on compression and frictional properties of sawdust particles in fuel pellet production. *Energy Fuels*, 23, 6: 3211-3216
- Nuopponen M., Vuorinen T., Jämsä S., Viitaniemi P. 2004 Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 24: 13-26
- Nurmi J. 1993. Heating values of the above ground biomass of small-sized trees. *Acta Forestalia Fennica* 256: 28

- N-midi, 2015. Nova Pellet, SCM Group. <http://d-nk.si/n-midi.html>
- Obernberger I., Biedermann F., Widmann W., Riedl R. 1997. Biomass and Bioenergy, 12: 211-224
- Obernberger I., Brunner T., Barnthaler G. 2006. Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. Biomass and Bioenergy, 30, 11: 973-982
- Obernberger I., Thek G. 2004. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. Biomass and Bioenergy, 27: 653-669
- Odogherty M. J. 1989. A review of the mechanical behaviour of straw when compressed to high densities. Agricultural Engineering Research, 44, 4: 241-265
- Öhman M., Nordin A. 1998. A new method for quantification of fluidized bed agglomeration tendencies: a sensitivity analysis. Energy and Fuels, 12: 90-94
- Örberg H. 2004. Bioenergi ur skogprodukter. Pelletering. Umeå, Sweden: Förbränning. Unit of Biomass Technology and Chemistry, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences: 33 str.
- OVE. Wikipedia. 2015.
https://sl.wikipedia.org/wiki/Obnovljivi_viri_energije#cite_note-1
- Payne J. D. 2006. Troubleshooting the pelleting process. V: Feedmtechnology technical report series. Singapore: American soybean association international marketing Southeast Asia: 17-23
- Peksa-Blanchard M., Dolzan P., Grassi A., Heinimö J., Junginger M., Ranta T., Walter A. 2007. IEA bioenergy task 40 - Global wood pellets markets and industry: Policy drivers, market status and raw material potential, International Energy Agency, Paris: 120 str.
- Pelletisation with ring die, 2015. Poulitec. Poultry & Agricultural Projects.
<http://www.poulitec.com/services1.php?id=9#prettyPhoto/1>
- Pelletisation with flat die, 2015. Gemco energy. A member of Agico Group.
<http://www.biofuelmachines.com/why-and-how-are-wood-pellets-made.html>
- Pietsch W. 2002. Agglomeration Processes - Phenomena, Technologies, Equipment. Wiley-VCH, Weinheim: 213 str.

- Piroliza, 2016. Eko grupa. [http://www.ekogrupa.si/8/piroliza-\(lesna-biomasa\)](http://www.ekogrupa.si/8/piroliza-(lesna-biomasa))
- Reimann C. in sod. 2008. Element levels in birch and spruce wood ashes - green energy? *Science of the total environment*, 393: 191-197
- Rentizelas A. A., Tolis A. J., Tatsiopoulou I. P. 2009. Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable Sustainable Energy*, 13, 4: 887-894
- Resch H. 1989 Fuel from wood residues: a "proBt center" for mills. *World Wood*, 9: 14-21
- Rhen C., Ohman M., Gref R., Wasterlund I. 2007. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 31: 66-72
- Ring die, 2015. KMEC engineering.
Biomasspelletplant <http://www.biomasspelletplant.com/faq>
- Robbins W. C. 1982. Density of wood chips. *Journal of Forestry*, 80: 567
- Rosillo-Calle F., Hemstock S., de Groot P., Woods J. 2007. *The Biomass Assessment Handbook*. London, Earthscan: 269 str.
- Rumpf H. 1962. The strength of granules and agglomeration. V: *Agglomeration*, John Wiley, New York: 379-418
- Samuelsson R., Thyrel M., Sjöström M., Lestander T. A. 2009. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 90: 1129-1134
- SalmYen L. 1991. Viscoelastic properties of wood polymers. V: SalmYen L, Htun M, editors. *Properties of ionic polymers, Natural and synthetic*. Stockholm, Sweden: 285-294
- Serrano C., Monedero E., Lapuerta M., Portero H. 2011. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92, 3: 699-706
- Sgarbossa A., Costa C., Menesatti P., Antonucci F., Pallottino F., Zanetti M., Grigolato S., Cavalli R. 2015. A multivariate SIMCA index as discriminant in wood pellet quality assessment. *Renewable Energy*, 76: 258-263

- Sgarbossa A., Costa C., Menesatti P., Antonucci F., Pallottino F., Zanetti M., Grigolato S., Cavalli R. 2014. Colorimetric patterns of wood pellets and their relations with quality and energy parameters. *Fuel*, 137: 70-76
- Selkimäki M., Mola-Yudego B., Råöser D., Prinz R., Sikanen L. 2010. Present and future trends in pellet markets, raw materials, and supply logistics in Sweden and Finland. *Renew Sustain Energy* 14: 3068-3075
- Senegačnik A., Oman J. 2004. Lastnosti zraka, goriv in dimnih plinov. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 135 str.
- Sikkema R., Steiner M., Junginger M., Hiegl W., Hansen M. T., Faaij A. 2011. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5: 250-278
- Simpson W., TenWolde A. 1999. Physical properties and moisture relations of wood. V: *Wood handbook - Wood as an engineering material*. Madison: United states department of agriculture - Forest Service - Forest products laboratory: 3.1-3.24
- SIST EN ISO/IEC 17025:2005 Splošne zahteve za usposobljenost preskuševalnih in kalibracijskih laboratorijev
- SIST EN ISO 16559:2014. Trdna biogoriva - Terminologija, definicije in opisi
- SIST EN ISO 16948:2015. Trdna biogoriva - Določevanje vsebnosti celotnega ogljika, vodika in dušika
- SIST EN ISO 16993:2015. Trdna biogoriva - Preračun analiznih rezultatov na različne osnove
- SIST EN ISO 17225-1:2014. Trdna biogoriva - Specifikacije goriv in razredi - 1. del: Splošne zahteve
- SIST EN ISO 17225-2:2014. Trdna biogoriva - Specifikacije goriv in razredi – 2. del: Razvrščeni lesni peleti
- SIST EN ISO 18134-1:2015 Trdna biogoriva - Določevanje vlage - Metoda sušenja v peči - 1. del: Celotna vlaga – Referenčna metoda
- SIST EN ISO 18134-3:2015 Trdna biogoriva - Določevanje vlage - Metoda sušenja v peči - 3. del: Vlaga v splošnem analiznem vzorcu

- SIST EN 14774-1:2010. Trdna biogoriva- Metode določevanja vlage- Metoda sušenja v peči- 1.del: Celotna vlaga- Referenčna metoda (razveljavljen marca 2016)
- SIST EN 14774-3:2010 Trdna biogoriva- Metode določevanja vlage- Metoda sušenja v peči- 3.del: Vlaga v osnovnem vzorcu (razveljavljen marca 2016)
- SIST EN 14775:2010. Trdna biogoriva - Metoda določevanja pepela
- SIST EN 14780:2011. Trdna biogoriva - Metoda za pripravo vzorca
- SIST EN 14918:2010. Trdna biogoriva- Metoda za ugotavljanje kalorične vrednosti
- SIST EN 15103:2010. Trdna biogoriva - Metode za določevanje prostorninske mase
- SIST EN 15104:2011. Trdna biogoriva - Določevanje celotnega ogljika, vodika in dušika-Instrumentalne metode
- SIST EN 15149-1:2011. Trdna biogoriva - Določevanje porazdelitve velikosti delcev– 1. del: Nihalna zaslonska metoda z uporabo sita z odprtini 1 mm in več
- SIST EN 15149-2:2011. Trdna biogoriva - Določevanje porazdelitve velikosti delcev– 2. del: Vibracijska zaslonska metoda z uporabo sita z odprtini 3,15 mm in manj
- SIST EN 15210-1:2010. Trdna biogoriva- Metode za določanje mehanske trdnosti pelet in briketov-1.del: Peleti
- SIST EN 15234-1:2011. Trdna biogoriva- Zagotavljanje kakovosti goriv- 1.del: Splošne zahteve
- SIST EN 15296:2011. Trdna biogoriva- Preračun analiz na različne osnove
- Sjöström E. 1993. Wood chemistry, fundamentals and applications. New York: Academic Press, 233 str.
- Skaar C. 1988. Wood Water Relations. New York, Springer: 283 str.
- Skøt T. 2011. Straw to energy - Status, Technologies and Innovation in Denmark 2011, Agro Business Park A/S, Tjele: 40 str.
- Smeets E. M. W., Faaij A. P. C., Lewandowski I. M., Turkenburg W. C. 2007. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. Progress in Energy and Combustion Science, 33: 56-106

- Sokhansanj S., Turhollow A. F. 2004. Biomass densification - Cubing operations and costs for corn stover. *Applied Engineering in Agriculture*, 20: 495-499
- Sriraam R., Chandrasekaran, Hopke P. K., Rector L., Allen G., Lin Lin. 2012. Chemical Composition of Wood Chips and Wood Pellets. *Energy Fuels*, 26: 4932-4937
- Ståhl M., Berghel J. 2011. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from raw material mix including sawdust and rapeseed cake. *Biomass and Bioenergy*, 35: 4849-4854
- Ståhl M., Wikström F. 2009. Swedish perspective on wood fuel pellets for household heating: A modified standard for pellets could reduce enduser problems. *Biomass and Bioenergy*, 33: 803-809
- Stamm A. J. 1964. *Wood and cellulose science*. New York, The Ronald Press Company: 549 str.
- Stelte W., Holm J. K., Sanadi A.R., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. 2011. Fuell pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its depenedency on the processing conditions. *Fuel*, 90, 11: 3285-3290
- Stelte W., Sanadi A. R., Shang L., Holm J. K., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. 2012. Recent developments in biomass pelletization - a review. *BioResources*, 7, 3: 4451-4490
- Stevens C. A. 1987. Starch gelatinization and the influence of particle size, steam pressure and die speed on the pelleting process. Ph. D. dissertation. Manhattan, KS: Kansas State University: 172 str.
- Steward A. 1950. Pelleting of granular materials. *Engineering*: 169, 203-204
- Sultana A., Kumar A., Harfield D. 2010. Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresource Technology*, 101: 5609-5621
- Sundberg A., Holmbom B. 2002. *Wood and Fibre Chemistry*, Faculty of Chemical Engineering, Laboratory of Forest Products Chemistry, Åbo Akademi: 18 str.
- Tabares J. L. M., Ortiz L., Granada E., Viar F. P. 2000. Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes). *Fuel*, 79: 1229-1237
- Telmo C. 2010. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource technology*, 101: 3808-3815

- Telmo C., Lousada J. 2011. Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and bioenergy*, 35: 2634-2639
- Thomas M., van der Poel A. F. B. 1996. Physical quality of pelleted animal feed. *Animal Feed Science and Technology* 61: 89-112
- Thomas M., van Zuilichem D. J., van der Poel A. F. B. 1997. Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of processes and its conditions. *Animal Feed Science Technology*, 64: 173-192
- Timell T.E. 1986. *Compression wood in gymnosperms*, Vol. 1. Berlin Heidelberg New York: Springer, 706 str.
- Tolon-Becerra A. in sod. 2011. Proposal for territorial distribution of the EU 2020 political renewable energy goal. *Renewable energy*, 36: 2067-2077
- Tsoumis G. T. 1991. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. New York: Chapman in Hall: 426-427
- Turner R. 1995. Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality. *Feed Management*, 46: 30-33
- Uasuf A., Becker G. 2011. Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass and Bioenergy*, 35: 1357-1366
- van Dam J. E. G., van den Oever M. J. A., Teunissen W., Keijzers E. R. P., Peralta A. G. 2004. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 1: lignin as an intrinsic thermosetting binder resin. *Industrial Crops and Products*, 19: 207-216
- Verma V. K., Bram S., Delattin F., Laha P., Vandendael O., Hubin A., De Ruyck J. 2011. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, 90: 17-23
- Wang C., Wang F., Yang Q., Liang R. 2009. Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion. *Biomass and Bioenergy*, 33: 50-56
- Werkelin J. 2010. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*, 89: 481-493

Winowski T. S. 1995. Factors that affect pellet quality and troubleshooting the pelleting process. Technical bulletin on feed technology, vol. FT23. Singapore, American Soybean Association

Wood J. F. 1987. The functional properties of feed raw materials and the effect on the production and quality of feed pellets. *Animal Feed Science and Technology*, 18: 1-17

ZAHVALA

Na prvem mestu se zahvaljujem mentorju prof. dr. Primožu Ovnu za posredovano znanje, pomoč, dragocena navodila, koristne pripombe in vodenje pri izdelavi magistrske naloge.

Za idejo in navdih, strokovno pomoč, usmerjanje in svetovanje pri nastajanju magistrske naloge se lepo zahvaljujem dr. Nike Krajnc.

Iskreno se zahvaljujem predsednici komisije doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za temeljit pregled naloge in koristne napotke, ki so pripomogli k izboljšanju naloge.

Zahvaljujem se Energetiki Ljubljana d.o.o., ki mi je omogočila podiplomski študij in me pri tem podprla. Posebno zahvalo namenjam celotnemu osebju Laboratorija za goriva in kemijsko kontrolo vod Energetike Ljubljana d.o.o za potrpežljivost, ideje in pomoč pri analizah. Še posebej se zahvaljujem Mateji Notar za nesebično pomoč, razumevanje, spodbudo in za vse komentarje in napotke, ki so pripomogli k izdelavi naloge.

Zahvaljujem se Gozdarskemu inštitutu Slovenije za sodelovanje, zlasti še dr. Petru Prislanu za praktične nasvete in pomoč pri izvedbi meritev.

Hvala otrokoma, ker me vedno znata spraviti v smeh in napolniti z optimizmom.

Pozitivna energija in razumevanje Tadeja so mi dali potrebno moč, da sem lahko dosegla uresničitev svojega cilja.

Iz vsega srca se zahvaljujem staršem za vso brezpogojno podporo, potrpežljivost, pomoč in zaupanje vame, ker sta vedno z mano, ko ju potrebujem in nikoli ne nehata verjeti vame.

Hvala sestri Zali za vsestransko spodbudo, zaupanje, nalezljivo navdušenje in ker mi vedno stoji ob strani in se skupaj z mano veseli mojih uspehov.

Hvala tudi vsej ostali družini in prijateljem, ki me razumete, vzpodbujate in verjamete vame.

PRILOGE

PRILOGA A

Prikaz rezultatov kemičnih in fizikalnih analiz surovine in peletov

Preglednica A1: Rezultati analiz vzorcev surovine in peletov narejenih v Laboratoriju za goriva Energetika Ljubljana d.o.o. in v Laboratoriju za lesno biomaso Oddelka za gozdno tehniko in ekonomiko na Gozdarskem inštitutu Slovenije

PARAMETER	Voda (%)	Pepel (%)	Zg.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	C (%)	H (%)	N (%)	Meh. obst. (%)	Gost. nasutja (kg/m ³)
PRESKUSNA METODA	EN 14774-1	EN 14775	EN 14918	EN 14918	EN 14918	EN 15104	EN 15104	EN 15104	EN 15210-1	EN 15103
STANJE PRERAČUNA	Dost. stanje	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Dost. st.
OZNAKA VZORCA (Proizvajalec)/OPIS VZORCA										
TEST 1/11.10.13 (A) peleti,80% iglavci,20% češnja,hrast,javor	9,62	0,51	20115	18802	16757	50,35	6,03	0,07	97,76	623,08
TEST 2/11.10.13 (A) peleti, 80% iglavci, 20% bukev	8,02	0,57	20157	18848	17138	50,67	6,02	0,09	96,38	627,06
TEST 3/11.10.13 (A) žaganje (javor, češnja, hrast)	23,78	0,66	19534	18250	13329	49,85	5,89	0,10	X	X
TEST 4/11.10.13 (A) žaganje: iglavci	52,36	0,38	20270	18953	7749	50,56	6,05	0,09	X	X
TEST 5/11.10.13 (A) žaganje: bukev	36,25	0,90	19609	18310	10787	49,52	5,96	0,14	X	X
TEST 6/20.11.13 (A) peleti: 80% smreka, 20% listavci (hrast:javor=60:40)	7,53	0,64	20164	18817	17217	50,40	6,19	0,12	97,01	650,9
TEST 7/20.11.13 (A) žaganje: smreka	47,3	0,58	20253	18901	8804	50,58	6,22	0,13	X	X
TEST 8/20.11.13 (A) žaganje: listavci (hrast:javor=60:40)	41,4	0,7	19739	18423	9784	49,82	6,05	0,13	X	X
TEST 9/27.11.13 (A) žaganje: 80% smreka, 20% listavci (bukov:hrast=1:1)	41,31	0,74	20207	18860	10060	50,23	6,19	0,10	X	X
TEST 10/27.11.13 (A) enako kot TEST 9, le da je vzorec sušen	13,50	0,72	20119	18774	18908	50,29	6,19	0,13	X	X
TEST 11/27.11.13 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 9	7,99	0,73	20116	18796	17099	50,61	6,06	0,14	96,16	637,75

PARAMETER	Voda (%)	Pepel (%)	Zg.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	C (%)	H (%)	N (%)	Meh. obst. (%)	Gost. nasutja (kg/m³)
PRESKUSNA METODA	EN 14774-1	EN 14775	EN 14918	EN 14918	EN 14918	EN 15104	EN 15104	EN 15104	EN 15210-1	EN 15103
STANJE PRERAČUNA	Dost. stanje	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Dost. st.
OZNAKA VZORCA (Proizvajalec)/OPIS VZORCA										
TEST 12/2.12.13 (A) žaganje: 80% smreka,20% listavci (večina hrast, < javor)	10,37	0,68	19966	18648	16459	50,57	6,06	0,15	X	X
TEST 13/2.12.13 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 12	8,93	0,68	19973	18654	16769	50,36	6,06	0,13	96,32	616,68
TEST 14/29.1.14 (A) žaganje, za mlinom: 80%smreka,20 %bukev; staro 3 tedne	13,24	0,69	20300	18945	16112	50,23	6,23	0,14	X	X
TEST 15/29.1.14 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 14	8,02	0,81	19789	18441	16766	49,66	6,19	0,15	97,04	661,39
TEST 16/11.2.14 (C) žaganje, za mlinom: 100% smreka	20,64	0,89	20275	18917	14509	50,04	6,24	0,15	X	X
TEST 17/11.2.14 (C) peleti kot je TEST 16: 100% smreka	9,28	0,68	20246	18888	16908	50,26	6,24	0,15	98,13	621,41
TEST 18/11.2.14 (B) žaganje, za mlinom: 99% smreka, 1% koruzni škrob	8,55	0,37	19978	18612	16811	50,14	6,28	0,13	X	X
TEST 19/11.2.14 (B) peleti kot TEST 18	6,54	0,36	20192	18823	17432	50,26	6,29	0,12	97,02	654,24
TEST 20/11.2.14 (A) žaganje, za mlinom: 20% hrast, 80 % smreka	12,94	0,76	20024	18698	15962	50,75	6,09	0,16	X	X
TEST 21/11.2.14 (A) peleti kot TEST 20: 20% hrast, 80% smreka	11,43	0,71	20246	18914	16473	50,74	6,12	0,16	96,92	609,72
TEST 22/12.2.14 (A) žaganje, za mlinom: 20% bukev, 80 % smreka	10,45	0,72	20010	18684	16476	50,31	6,09	0,15	X	X
TEST 23/12.2.14 (A) peleti kot TEST 22	8,07	0,70	19942	18612	16913	50,44	6,11	0,15	98,49	665,63
TEST 24/24.2.14 (D) žaganje, za mlinom: 95 % smreka, 5 % bukev+hrast +bor	15,94	0,71	20069	18740	15362	50,57	6,11	0,15	X	X
TEST 25/12.2.14 (D) peleti kot TEST 24	10,37	0,58	20154	18819	16613	50,93	6,14	0,16	96,46	616,16
TEST 26/24.2.14 (E) žaganje,za mlin.: 70%list.(50%buk.,20%jesen+hr.),30%smr.	21,90	1,37	19684	18380	13820	49,68	5,99	0,21	X	X
TEST 27/24.2.14 (E) peleti kot TEST 26	7,86	1,20	19771	18463	16819	49,79	6,01	0,19	94,92	660,07
TEST 28/24.2.14 (F) žaganje, za mlin.: 70% mr., 30%list.(buk.,1% hr., 1%akacija)	11,06	0,86	20305	18969	16601	50,91	6,14	0,19	X	X

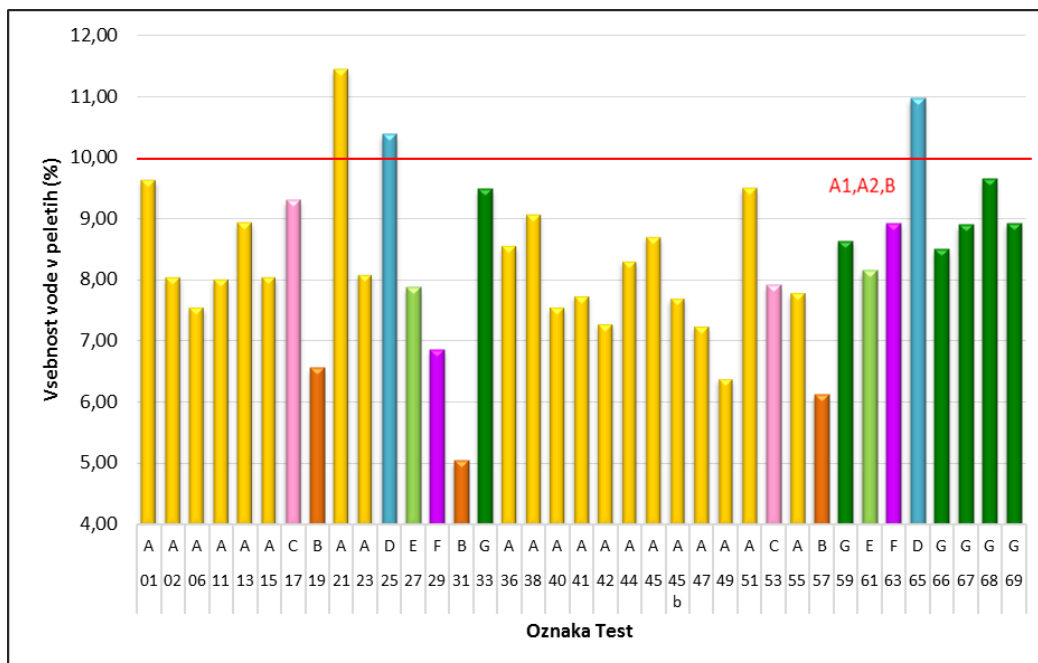
PARAMETER	Voda (%)	Pepel (%)	Zg.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	C (%)	H (%)	N (%)	Meh. obst. (%)	Gost. nasutja (kg/m³)
PRESKUSNA METODA	EN 14774-1	EN 14775	EN 14918	EN 14918	EN 14918	EN 15104	EN 15104	EN 15104	EN 15210-1	EN 15103
STANJE PRERAČUNA	Dost. stanje	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Dost. st.
OZNAKA VZORCA (Proizvajalec)/OPIS VZORCA										
TEST 29/24.2.14 (F) peleti kot TEST 28	6,84	1,12	20102	18782	17331	50,56	6,06	0,20	97,91	625,90
TEST 30/24.2.14 (B) žaganje, za mlinom: 99 % smreka, 1 % koruzni škrob	13,33	0,56	20070	18732	15908	50,23	6,15	0,17	X	X
TEST 31/24.2.14 (B) peleti kot TEST 30	5,02	0,45	20141	18807	17740	50,36	6,13	0,13	97,31	663,51
TEST 32/28.2.14 (G) žaganje, pred mlinom: jelka + smreka	10,86	1,38	20109	18774	16470	51,02	6,14	0,23	X	X
TEST 33/28.2.14 (G) peleti kot TEST 32	9,47	1,30	20141	18812	16798	50,32	6,11	0,31	97,85	620,67
TEST 35/4.3.14 (A) žaganje, za mlinom: 20% bukev, 80 % smreka	9,30	0,95	19864	18531	16579	50,19	6,13	0,15	X	X
TEST 36/4.3.14 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 35	8,53	0,70	20063	18718	16911	50,75	6,19	0,14	96,62	660,4
TEST 37/10.3.14 (A) žaganje, za mlinom: 20% bukev, 80 % smreka	9,55	0,90	20022	18676	16659	50,77	6,19	0,16	X	X
TEST 38/10.3.14 (A) peleti kot TEST 37	9,05	0,76	20112	18780	16859	50,36	6,12	0,24	95,40	637,15
TEST 39/17.3.14 (A) žaganje, za mlinom: 15% bukev, 5% hrast, 80 % smreka	10,39	0,81	20179	18842	16631	50,13	6,14	0,15	X	X
TEST 40/17.3.14 (A) peleti iz materiala kot TEST 39	7,53	0,95	20123	18797	17196	50,18	6,10	0,16	97,17	653,5
TEST 41/17.3.14 (A) peleti: 15%bukev,5%hrast, 80% smreka;	7,72	0,94	20157	18820	17177	50,31	6,15	0,16	97,02	653,6
TEST 42/17.3.14 (A) peleti: 15%bukev,5%hrast, 80% smreka;	7,26	1,04	20047	18715	17179	50,30	6,12	0,15	97,01	663,9
TEST 43/19.3.14 (A) žaganje, za mlinom: 10% bukev, 90 % smreka	9,43	0,89	20093	18764	16762	50,08	6,11	0,13	X	X
TEST 44/19.3.14 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 43	8,29	0,78	20131	18803	17042	50,30	6,10	0,14	97,13	610,5
TEST 45/25.3.14 (A) peleti: 20% bukev, 80% smreka, 2% koruznega škroba	8,68	0,62	20089	18761	16920	50,25	6,10	0,15	97,55	X
TEST 45 B/25.3.14 (A) peleti: 20% bukev, 80% smreka, brez koruznega škroba	7,68	0,63	20086	18760	17131	50,29	6,09	0,13	96,47	X

PARAMETER	Voda (%)	Pepel (%)	Zg.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	C (%)	H (%)	N (%)	Meh. obst. (%)	Gost. nasutja (kg/m³)
PRESKUSNA METODA	EN 14774-1	EN 14775	EN 14918	EN 14918	EN 14918	EN 15104	EN 15104	EN 15104	EN 15210-1	EN 15103
STANJE PRERAČUNA	Dost. stanje	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Dost. st.
OZNAKA VZORCA (Proizvajalec)/OPIS VZORCA										
TEST 46/1.4.14 (A) žaganje, za mlinom: 20% bukev, 80 % smreka	8,61	0,61	19935	18604	16793	49,88	6,11	0,14	X	X
TEST 47/1.4.14 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 46	7,22	0,58	19940	18606	17085	49,95	6,13	0,13	94,52	643,6
TEST 48/2.4.14 (A) žaganje, za mlinom: 20% bukev, 80 % smreka	8,35	0,93	20051	18725	16958	50,11	6,09	0,16	X	X
TEST 49/2.4.14 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 48	6,36	0,87	20083	18752	17403	50,35	6,12	0,14	96,96	659,4
TEST 50/5.9.14 (A) žaganje, za mlinom: 100% smreka	11,53	0,55	20222	18876	16416	50,51	6,19	0,21	X	X
TEST 51/5.9.14 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 50	9,49	0,60	20224	18884	16860	50,63	6,16	0,19	98,00	639,7
TEST 52/24.10.14 (C) žaganje, za mlinom: 100% smreka	19,55	1,15	20305	18973	14787	50,45	6,12	0,14	X	X
TEST 53/24.10.14 (C) peleti kot TEST 52	7,89	0,71	20328	18989	17298	50,43	6,15	0,11	96,56	622,1
TEST 54/27.10.14 (A) žaganje, za mlinom: 80% smreka, 20% bukev	12,56	0,74	19843	18510	15878	50,07	6,12	0,15	X	X
TEST 55/27.10.14 (A) peleti iz materiala, kot je TEST 54	7,76	0,74	20034	18706	17064	50,03	6,10	0,15	97,75	659,1
TEST 56/29.10.14 (B) žaganje, za mlinom: 97% smreka, 3% koruzni škrob	7,73	0,62	19957	18619	16991	50,24	6,15	0,13	X	X
TEST 57/29.10.14 (B) peleti kot TEST 56	6,10	0,50	20145	18807	17510	50,09	6,15	0,14	98,22	665,3
TEST 58/3.11.14 (G) žaganje, za mlinom: v glavnem jelka, nekaj smr., malo buk.	11,98	1,02	20152	18812	16265	50,68	6,16	0,37	X	X
TEST 59/3.11.14 (G) peleti kot TEST 58	8,62	1,14	20102	18767	18287	50,68	6,14	0,24	97,72	651,6
TEST 60/5.11.14 (E) žaganje, za mlinom: 50% buk., 20% gaber+hrast, 30% smr.	11,31	1,17	19546	18226	15887	49,71	6,07	0,23	X	X
TEST 61/5.11.14 (E) peleti kot TEST 60	8,14	1,32	19570	18248	16564	49,77	6,07	0,23	95,42	644,9
TEST 62/5.11.14 (F) žaganje, za mlinom: 90% smreka, 10 % bukev	10,56	0,67	20209	18866	16616	50,61	6,17	0,21	X	X

PARAMETER	Voda (%)	Pepel (%)	Zg.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	Sp.kuril. (kJ/kg)	C (%)	H (%)	N (%)	Meh. obst. (%)	Gost. nasutja (kg/m³)
PRESKUSNA METODA	EN 14774-1	EN 14775	EN 14918	EN 14918	EN 14918	EN 15104	EN 15104	EN 15104	EN 15210-1	EN 15103
STANJE PRERAČUNA	Dost. stanje	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Suho st.	Suho st.	Suho st.	Dost.st.	Dost. st.
OZNAKA VZORCA (Proizvajalec)/OPIS VZORCA										
TEST 63/5.11.14 (F) peleti kot TEST 62	8,91	0,76	20238	18890	16988	50,78	6,20	0,21	98,40	658,7
TEST 64/21.11.14 (D) žaganje, za mlinom: 90% smreka, 10 % bukev	11,39	1,18	20095	18767	16350	50,30	6,11	0,25	X	X
TEST 65/21.11.14 (D) peleti kot TEST 64	10,95	0,68	20093	18760	16437	50,41	6,13	0,17	98,31	624,3
TEST 66/11.5.15 (G) peleti narejeni konec apr.15: 80% jelka, 20% smr.,2-3% buk.	8,48	0,99	20217	18885	17075	50,59	6,13	0,17	98,46	644,3
TEST 67/11.5.15 (G) peleti narejeni začetek maja 15: sestava enako kot TEST 66	8,88	0,94	20267	18934	17035	50,52	6,13	0,18	98,29	644,8
TEST 68/11.5.15 (G) peleti narejeni 9.-10.5.15: sestava enako kot TEST 66	9,63	0,99	20252	18913	16856	50,64	6,16	0,20	98,51	625,8
TEST 69/11.5.15 (G) peleti: 80%jel., 20%smr.,2-3% buk.(brez skoblj.-> več lubja)	8,91	0,96	20223	18888	16986	50,56	6,14	0,20	98,39	645,4

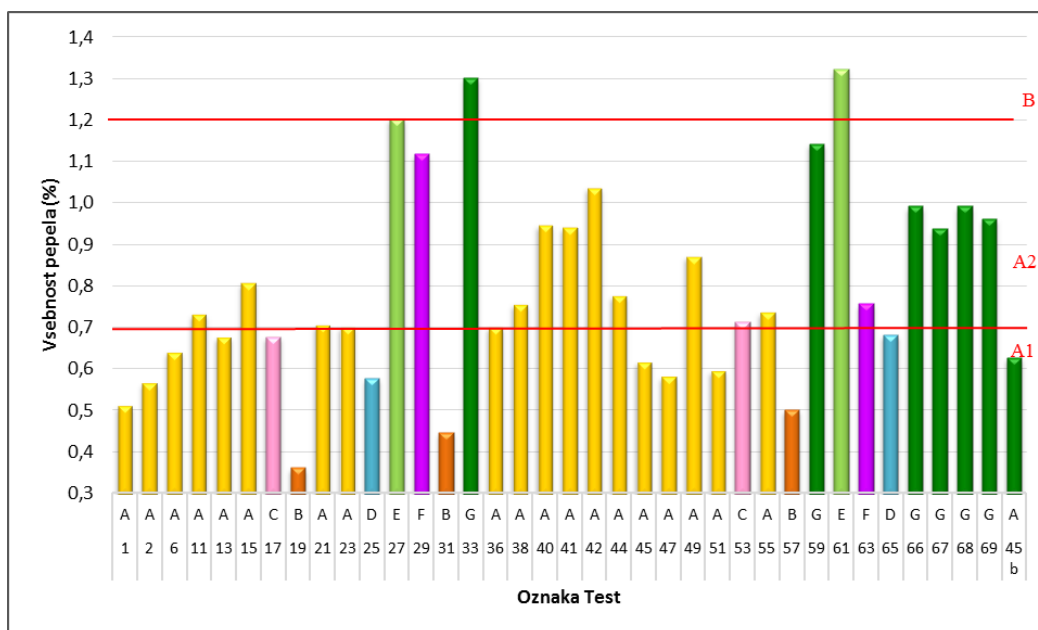
PRILOGA B

Grafični prikaz posameznih proučevanih parametrov v vseh vzorcih peletov



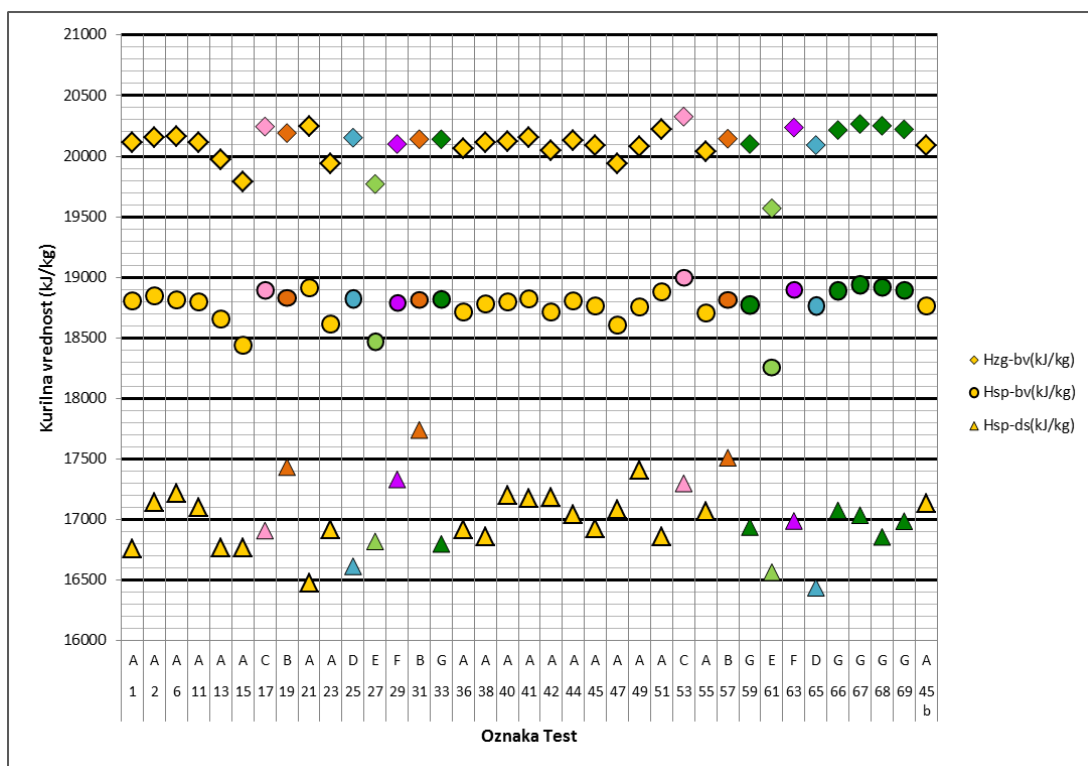
Slika B1: Vsebnost vode v vzorcih peletov izbranih proizvajalcev, proizvajalci so označeni s črkami od A do G, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure B1: Moisture content in samples of pellets at selected producers (A-G); red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B



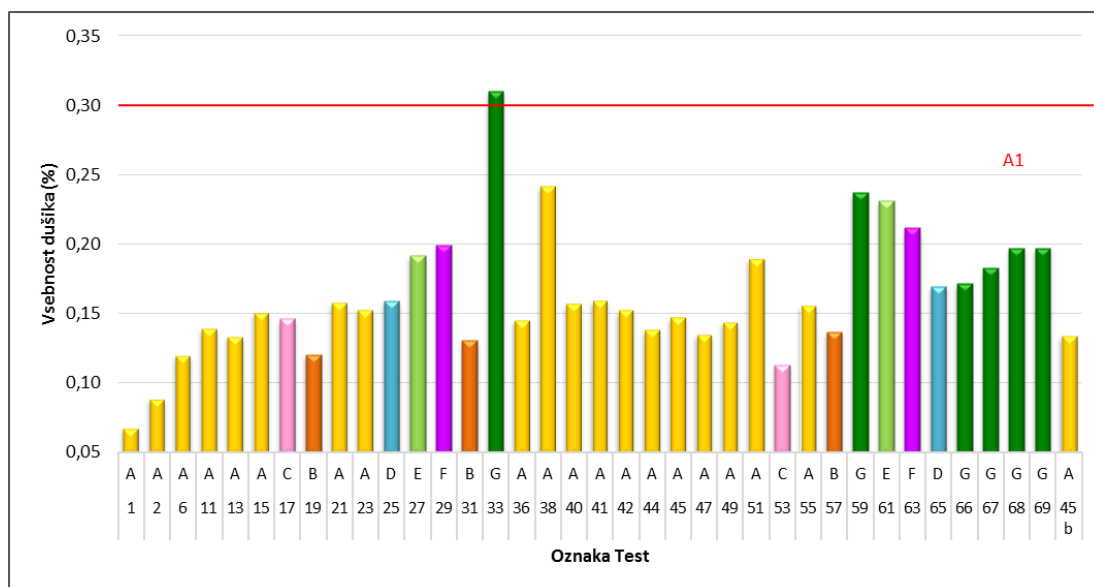
Slika B2: Vsebnost pepela v vzorcih peletov izbranih proizvajalcev, proizvajalci so označeni s črkami od A do G, rdeči črte na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure B2: Ash content in samples of pellets at selected producers (A-G); red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B



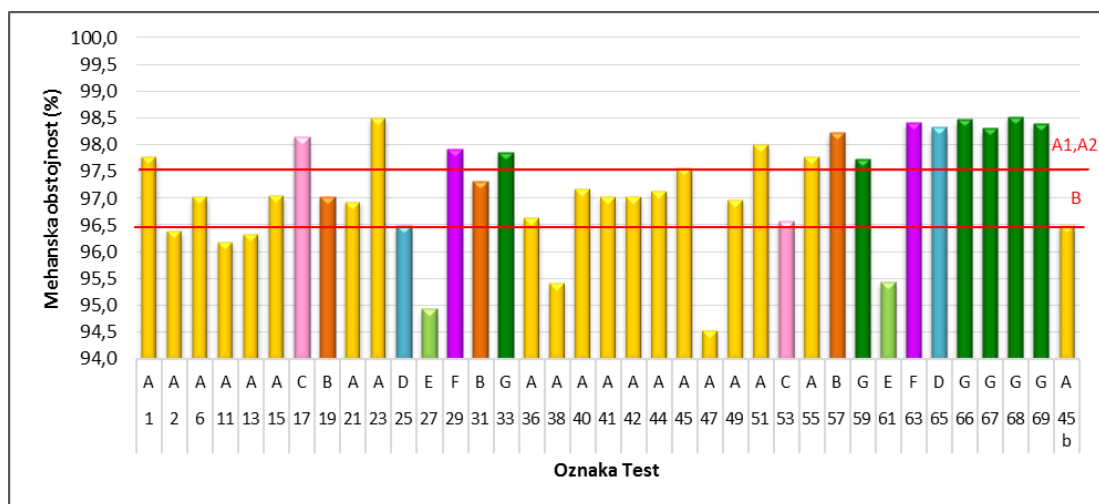
Slika B3: Zgornja in spodnja kurilnost peletov v suhem stanju in spodnja kurilost peletov v dostavljenem stanju izbranih proizvajalcev, proizvajalci so označeni s črkami od A do G

Figure B3: Gross and net calorific value for dry samples of pellets and net calorific value for samples of pellets as received at selected producers (A-G)



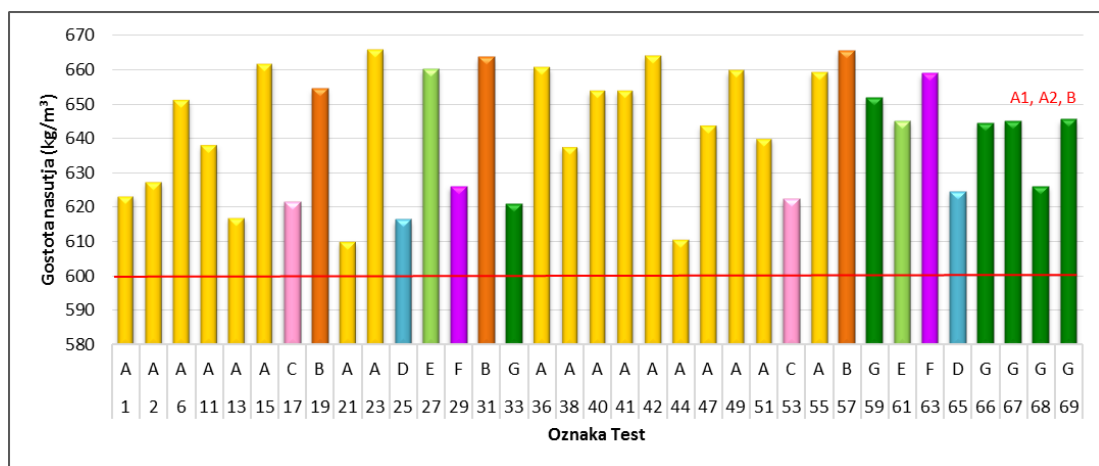
Slika B4: Vsebnost dušika v vzorcih peletov izbranih proizvajalcev, proizvajalci so označeni s črkami od A do G, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure B4: Nitrogen content in samples of pellets at selected producers (A-G); red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B



Slika B5: Mehanska obstojnost vzorcev peletov izbranih proizvajalcev, proizvajalci so označeni s črkami od A do G, rdeči črti na grafu ponazarjata meji za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure B5: Mechanical durability of pellets at selected producers (A-G); red lines indicate the limits for quality grading A1, A2, B



Slika B6: Gostota nasutja vzorcev peletov izbranih proizvajalcev, proizvajalci so označeni s črkami od A do G, rdeča črta na grafu ponazarja mejo za razvrščanje v kakovostne razrede A1, A2, B

Figure B6: Bulk density in samples of pellets at selected producers (A-G); red line indicates the limit for quality grading A1, A2, B

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA

Živa KRELJ

**LASTNOSTI LESNIH PELETOV IZBRANIH
PROIZVAJALCEV V SLOVENIJI**

MAGISTRSKO DELO

Ljubljana, 2016

