

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Borut LAPAJNE

**ZASNOVA, IZDELAVA IN ANALIZA DELOVANJA
ENOSTAVNE EKSTRUZIJSKE HIDRAVLICNE
STISKALNICE ZA IZDELAVO PELETOV**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Borut LAPAJNE

**ZASNOVA, IZDELAVA IN ANALIZA DELOVANJA ENOSTAVNE
EKSTRUZIJSKE HIDRAVLICNE STISKALNICE ZA IZDELAVO
PELETOV**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**DESIGN, CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF A SIMPLE
EXTRUSION HYDRAULIC PELLET PRESS**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2010

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za mehanske in obdelovalne tehnologije lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Bojana Bučarja in za recenzentko doc.dr. Dominiko Gornik Bučar.

Mentor: prof. dr. Bojan Bučar

Recenzentka: doc. dr. Dominika Gornik Bučar

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Borut Lapajne

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 674.8:662.71
KG	peleti/izdelava/lastnosti/stiskalnica
AV	LAPAJNE, Borut
SA	BUČAR, Bojan (mentor)/GORNIK BUČAR, Dominika (recenzentka)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2010
IN	ZASNOVA, IZDELAVA IN ANALIZA DELOVANJA ENOSTAVNE EKSTRUZIJSKE HIDRAVLICNE STISKALNICE ZA IZDELAVO PELETOV
TD	Diplomsko delo (Univerzitetni študij)
OP	VIII, 37 str., 10 pregl., 23 sl., 20 vir.
IJ	sl
Jl	sl/en
AI	Izdelali smo poceni in enostavno stiskalnico manjše kapacitete za stiskanje peletov. Bila je poenostavljena, brez sistema za polnjenje, brez zalogovnika in noža za lomljenje peletov na standardno dolžino. Peleti so bili izdelani iz žagovine in skoblancev smrekovine. Izdelanim peletom smo izmerili prostorninsko maso, nasipno prostorninsko maso, obstojnost in vlažnost. Prostorninska masa je bila nad 1000 kg/m ³ , nasipna prostorninska masa pa 630 kg/m ³ . Obstojnost izdelanih peletov je bila slabša kot pri komercialnih. Izdelani peleti so imeli nižjo vlažnost kot surovina, iz katere smo jih izdelali.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 674.8:662.71
CX pellets/forming/properties/press
AU LAPAJNE, Borut
AA BUČAR, Bojan (supervisor)/GORNIK BUČAR, Dominika (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2010
TI DESIGN, CONSTRUCTION AND ANALYSIS
OF A SIMPLE EXTRUSION HYDRAULIC PELLET PRESS
DT Graduation Thesis (University studies)
NO VIII, 37 p., 10 tab., 23 fig., 20 ref.
LA sl
AL sl/en
AB We constructed a cheap and simple, experimental pellet press of small capacity. It was simplyfield, made without a filling system, silo for raw material and cutting device for cutting the length of pellets. Pellets were made from spruce sawdust and planer shavings. Water and oil were added to the raw material. Density, bulk density, durability and mousture content of the manufactured pellets were measured. Density was above 1000 kg/m^3 , and bulk density 630 kg/m^3 . Durability of the manufactured pallets was lower than that of the tested commercial ones. The manufactured pellets had lower moisture content than the raw material used.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key words documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 BIOMASA	2
2.2 DEFINICIJA PELETOV	2
2.3 OSNOVNE SUROVINE ZA IZDELAVO PELETOV ZA KURJAVO	2
2.4 IZDELAVA PELETOV	2
2.4.1 Mletje surovine	2
2.4.2 Sušenje surovine	3
2.4.3 Priprava surovine pred stiskanjem	3
2.4.4 Stiskanje peletov	4
2.4.4.1 Stiskalnica z matrico v obliki prstana »ring dye«	6
2.4.4.2 Stiskalnica z matrico v obliki koluta »flat dye«	7
2.4.5 Hlajenje in sejanje peletov	8
2.5 PRODUKTIVNOST IN ENERGIJSKE ZAHTEVE	9
2.5.1 Produktivnost	9
2.5.2 Energijske zahteve	9
2.6 PROIZVODNI STROŠKI	11
2.7 LASTNOSTI PELETOV	12
2.7.1 Vlažnost	12
2.7.2 Dimenzije peletov	12
2.7.3 Obstočnost in prostorninska masa	12
2.7.4 Nasipna prostorninska masa	13
2.7.5 Vsebnost pepela	13
2.8 GLAVNE TEHNOLOGIJE SEŽIGA	14
2.8.1 Kamini	14
2.8.2 Majhne peči	15
2.8.3 Gorilniki	16
2.8.3.1 Gorilniki z doziranjem peletov od zgoraj	16
2.8.3.2 Gorilniki z doziranjem peletov od spodaj	17
2.9 ZALOGOVNIKI	17
3 MATERIALI IN METODE	18

3.1	MATERIALI	18
3.1.1	Zgradba eksperimentalne stiskalnice	18
3.1.1.1	Matrica	20
3.1.2	Potek stiskanja	21
3.1.2.1	Polnitev	21
3.1.2.2	Gretje matrice	21
3.1.3	Surovina	22
3.1.3.1	Velikost iveri	22
3.1.3.2	Dodajanje vode	22
3.1.3.3	Dodajanje olja	22
3.2	METODE	23
3.2.1	Prostorninska masa	23
3.2.2	Nasipna prostorninska masa	23
3.2.3	Obstojnost (ASAE S 269.4)	24
3.2.4	Vlažnost	25
4	REZULTATI	26
4.1	VLAŽNOST	26
4.2	PROSTORNINSKA MASA	27
4.3	NASIPNA PROSTORNINSKA MASA	29
4.4	OBSTOJNOST	30
5	RAZPRAVA	32
6	SKLEPI	35
7	POVZETEK	36
8	VIRI	37
8.1	CITIRANI VIRI	37
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Pregl. 1: Primerjava porabe energije pri izdelavi peletov iz slame in lesne surovine	9
Pregl. 2: Tipična poraba energije kWh/t za mletje, sušenje in stiskanje lesnih ostankov v primerjavi z energijsko vrednostjo peletov	10
Pregl. 3: Proizvodni stroški	11
Pregl. 4: Stroški peletiziranja lesa v Avstriji in na Švedskem v evrih leta 2002	11
Pregl. 5: Vlažnost izdelanih peletov in surovine	26
Pregl. 6: Žagovina presejana skozi sito 1 mm, dodano 7,5% vode, 1% motornega olja, T=150°C	27
Pregl. 7: Žagovina presejana skozi sito 1 mm, dodano 7,5% vode, 2% motornega olja, T=150°C	27
Pregl. 8: Žagovina presejana skozi sito 3 mm, dodano 7,5% vode, 2% motornega olja, T=150°C	28
Pregl. 9: Žagovina presejana skozi sito 3 mm, dodano 7,5% vode, 1% motornega olja, T=150°C	28
Pregl. 10: Test obstojnosti po ASAE S269.4, primerjava s komercialnimi peleti	30

KAZALO SLIK

	str.
Sl. 1: Tlak porušitve α [°] kot funkcija orientacije vlaken	4
Sl. 2: Tipičen diagram napetosti in deformacije pri tlačni obremenitvi vzporedno z vlakni ($\alpha=0^\circ$)	5
Sl. 3: Tipičen diagram napetosti in deformacije pri tlačni obremenitvi prečno na vlakna ($\alpha=90^\circ$)	5
Sl. 4: Matrica »ring dye«	6
Sl. 5: Stiskalnica »ring dye«	6
Sl. 6: Matrica »flat dye«	7
Sl. 7: Stiskalnica »flat dye«	7
Sl. 8: Prerez modernega kamina na pelete	14
Sl. 9: Prerez peči na pelete	15
Sl. 10: Prerez gorilca na pelete (levo) in zamenjava oljnega gorilca v peči na olje (desno)	16
Sl. 11: Eksperimentalna stiskalnica	18
Sl. 12: Eksperimentalna stiskalnica brez hidravličnega agregata	19
Sl. 13: Prerez eksperimentalne stiskalnice brez hidravličnega agregata	19
Sl. 14: Matrica (levo) in matrica v prerezu (desno)	20
Sl. 15: Naprava za merjenje obstojnosti peletov	24
Sl. 16: Poenostavljena naprava za merjenje obstojnosti peletov	25
Sl. 17: Vlažnost izdelanih peletov in surovine	26
Sl. 18: Prostorninska masa izdelanih peletov	29
Sl. 19: Test obstojnosti po ASAE S269.4	31
Sl. 20: Cvetenje peletov	32
Sl. 21: Eksplozija peletov	33
Sl. 22: Zamašitev matrice	33
Sl. 23: Uspešno stiskanje	34

1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA

Pri predelavi lesa nastanejo velike količine kosovnih lesnih ostankov, žaganja in skoblancev. Volumen skoblancev in žagovine je velik. Veliko mizarskih delavnic danes uporablja stroje za stiskanje briketov. Stroji za stiskanje peletov so dražji, manjša kapaciteta pa je med ponudniki strojev redkost.

Za razliko od lesnih briketov se peleti izdelujejo večinoma v velikih tovarnah s pomočjo dragih stiskalnic z veliko kapaciteto. Poraba peletov je v zadnjih nekaj letih močno narasla, kar je na trgu povzročilo večje povpraševanje kot ponudbo. Velike tovarne potrebujejo velike količine surovin in pokrivanje velikega števila strank. Surovino za izdelavo peletov lahko transportirajo več sto, proizvedene pelete pa tudi več tisoč kilometrov daleč.

Večina peletov iz lesa se v Evropi proizvede iz žagovine in ostalih ostankov, ki nastanejo v lesni industriji. V Sloveniji je lastništvo gozdov zelo razdrobljeno in s tem je dobava surovin velikim proizvajalcem otežena. Prevladujejo žagarski obrati z majhnimi kapacitetami, velik del lesa se razžaga v »vaških« žagarskih obratih. Pri tako majhnih kapacitetah nastanejo majhne količine ostankov na razpršenem območju, zato je za obratovanje velike proizvodne linije peletov potrebno dovažati surovino iz večjega območja. Veliki proizvajalci morajo imeti za prodajo svojih produktov veliko tržišče, transportni stroški dostave na dom tako lahko predstavljajo velik delež končne cene produkta.

Na trgu je več proizvajalcev strojev z majhno kapaciteto za lesne briquete. Uporabni so že za malo večje mizarske delavnice, ki lahko svoje lesne ostanke predelajo in prodajo na trgu ali uporabijo za lastne potrebe. Ponudba strojev za izdelavo peletov majhnih kapacitet je zelo omejena, cene strojev pa kljub manjši kapaciteti niso sorazmerno nižje, kar smiselnost takšne investicije postavi pod vprašaj.

Namen te diplomske naloge je zasnova in izdelava enostavne stiskalnice manjše kapacitete za stiskanje peletov, ki bi bila tudi cenovno ugodna. Pogoji delovanja so izdelava peletov zadovoljive kakovosti.

2 PREGLED OBJAV

2.1 BIOMASA

Biogoriva so goriva biološkega izvora, med katere sodi tudi lesna biomasa. Pravilno gospodarjena rastišča biomase ne povzročajo klimatskih sprememb z oddajanjem CO₂ v atmosfero, ker pri rasti absorbirajo toliko ogljika, kot se ga sprosti pri uporabi kot gorivo (Wahlund, 2004).

2.2 DEFINICIJA PELETOV

Pelete dobimo s stiskanjem zmlete surovine skozi rešetko podobno matrico z okroglimi luknjicami določenega premera glede na končno uporabo. Za stiskanje se uporabita visok tlak in visoka temperatura, surovini pa se večinoma ne dodaja dodatkov za sprijemanje.

2.3 OSNOVNE SUROVINE ZA IZDELAVO PELETOV ZA KURJAVO

Največ peletov se proizvede iz ostankov v lesni industriji – iz žagovine, skoblancev in sekancev. Pelete za ogrevanje se izdeluje tudi iz skorje, trave, slame in ostalih agrarnih ostankov.

2.4 IZDELAVA PELETOV

Razvoj proizvodnje peletov je sprva temeljil na proizvodnji krmil za živino. Proces proizvodnje peletov sestavljajo osnovni procesi: mletje, sušenje, stiskanje in hlajenje surovine.

2.4.1 Mletje surovine

Na kakovost peletiranja vplivajo:

- vlažnost surovine,
- prostorninska masa materiala,
- velikost delcev,
- trdnost vlaken,
- mazilne lastnosti materiala,
- naravna veziva.

Glavni pogoj za doseganje visoke kakovosti peletov je homogena in dobro pripravljena surovina. Sprva se surovini odstrani težke nečistoče, kot so kamenje, kovine in drugi tujki. Za mletje surovine se običajno uporablja drobilnik. Debelina lesne surovine pri žagovini običajno znaša 3 mm in pri sekancih do 15 mm (Jannasch in sod., 2001). Velikost delcev se z mletjem zmanjša na 85% ali manj debeline peleta.

Sito se pri zelo homogeni surovini lahko uporabi namesto drobilnika. Drobni delci se lahko stisnejo neposredno, grobi delci pa se meljejo v manjšem drobilniku ali pa se uporabijo kot gorivo, če je na voljo peč za biomaso. Veliko proizvajalcev peletov za homogenizacijo surovine uporablja drobilnik, tudi če uporabljajo za surovino le žagovino (Thek in Ingwald, 2004).

Pred stiskanjem se lahko doda dodatke za lažje stiskanje in boljše sprijemanje.

Glavni problemi med procesom peletiranja so (O'Connror, 2001):

- zamašitev matrice,
- lom matrice,
- pokanje valjev,
- pregrevanje,
- visoki stroški energije,
- slaba kvaliteta končnega produkta,
- visoke zahteve vzdrževanja.

Za preprečitev zamašitve matrice in preobremenitve glavnega pogona se uporablja obvodni cevni sistem, ki je opremljen z ročnim ali električno krmiljenim zračnim cilindrom.

Moč stiskalnic za pelete običajno znaša med 200 in 500 kW. Pri majhnih eksperimentalnih napravah znaša moč stiskalnice od 3 kW naprej, največje stiskalnice pa imajo moč nad 550 kW. Kapaciteta stiskalnic variira od nekaj 100 kg/h do 10 t/h. Običajno znaša kapaciteta stiskalnice od 4 do 6 t/h.

Pri stiskalnici kapacitete 4 t/h znaša tlak 200 barov. Pri zmanjšanem izkoristku se sile trenja povečajo in nastane večje tveganje za okvaro stiskalnice. Iz tega razloga je potrebno pri dimenzioniranju stiskalnic paziti, da kapaciteta stiskalnice pri moči 500 kW ni nižja od 3 t/h (O'Connror, 2001).

2.4.2 Sušenje surovine

Surovina ima običajno visoko vlažnost, zato je potrebno sušenje. Zmleta surovina se transportira v sušilni stroj (običajno rotacijski), kjer se surovino posuši na približno 10% vlažnost.

Raziskave so pokazale, da pri sušenju vlažnih lesnih materialov prihaja do emisij hlapnih organskih spojin, s tem pa se zmanjšuje energijska vrednost surovine. Hlapne organske spojine ob prisotnosti dušikovih oksidov in sončne svetlobe privedejo do nastanka škodljivih foto oksidantov. Foto oksidanti onesnažujejo okolje, poslabšajo delovne pogoje v okolici sušilnih strojev ter povzročajo draženje dihal. Pri povišanih koncentracijah predstavljajo pomemben faktor pri poškodbah gozdov in pridelkov v Evropi (Stáhl in sod., 2002).

2.4.3 Priprava surovine pred stiskanjem

Lignin v lesu deluje kot vezivo, ki pelete veže skupaj. Za doseganje boljših rezultatov surovino pred stiskanjem pripravimo z dodajanjem pare ali vode.

Surovini dodamo paro ali vodo želene temperature, da:

- zmehčamo lignin,
- povišamo produktivnost stiskalnice ali
- zmanjšamo delež finih delcev v končnem produktu.

Običajen proces priprave surovine je dodajanje pare v mešalco s temperaturo 90 – 100°C v razmerju 5% teže surovine. V določenih primerih se lahko paro in vodo dodaja pred in po mletju ali pa se jo vbrizga direktno v drobilnik. Dodajanje vode povzroči povišanje vlažnosti peletov na izhodu iz stiskalnice. Med procesom ohlajanja vlaga izpari in vlažnost peletov po ohlajanju zaradi dodatka vode pred stiskanjem ni večja.

Dodajanje veziv so proučevali z namenom povišanja obstojnosti peletov in s tem zmanjšanje prahu ter finih delcev, ki nastanejo med transportom in rokovanjem. Možni dodatki za les so škrob, melasa, naravni parafin, rastlinsko olje, lignino sulfat ali sintetični dodatki. Po nemških normativih so dovoljeni melasa, kot ostanek pri proizvodnji sladkorja, naravni parafin in škrob (Viak, 2000).

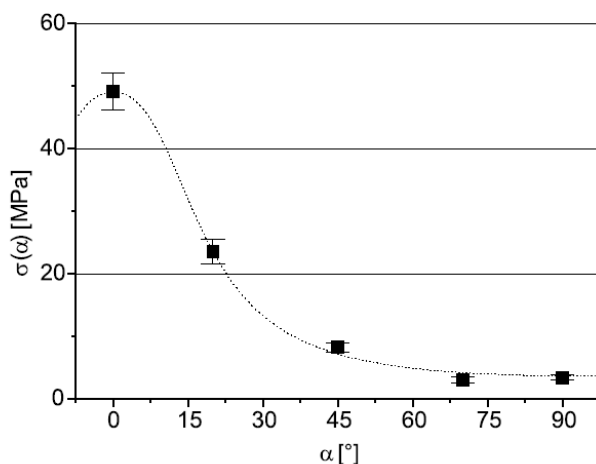
Poleg povečane obstojnosti peletov so ti dodatki uporabni tudi za izboljšanje nekaterih kemičnih karakteristik npr. nastajanje žlindre (med zgorevanjem) lahko zmanjšamo z uporabo kaolina, kalcijevega ali magnezijevega oksida. Veziva, kot so koruza ali riž, se uporabljajo za zmanjšanje abrazije pri stiskanju. Dodatki te vrste se pogosto uporabljajo v Avstriji (Viak, 2000).

Na Švedskem zelo veliko razpravljajo o vezivih. Testirali so več dodatkov in pri tem ugotovili, da je najboljši lignin. Ligninu, ki je naravni del lesa so dodajali lignin sulfat, ki je stranski produkt papirne industrije. Vezivne sposobnosti lignin sulfata so dobre, vendar povišajo vsebnost žvepla in pepela. To lahko privede do povišanih emisij žvepla, ki povzročijo težave pri pečeh in gorilnikih. Na koncu lahko ugotovimo, da z modifikacijo procesa stiskanja - spremembo debeline matrice (dolžina luknjic), časa stiskanja, temperature stiskanja in tlaka stiskanja - izboljšamo kvaliteto peleta brez dodajanja veziv (Viak, 2000).

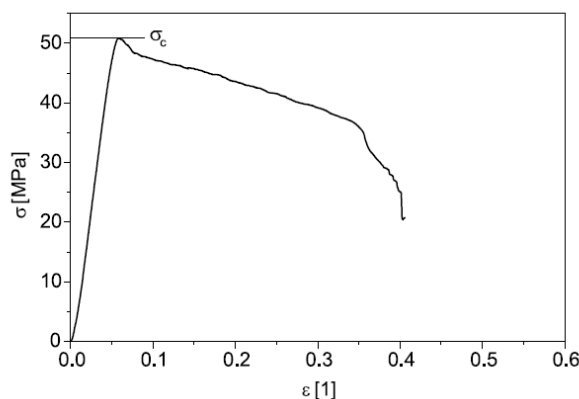
2.4.4 Stiskanje peletov

Stiskanje surovine v pelete je neobhodni del proizvodnega procesa. S stiskanjem surovino preoblikujemo v produkt, ki ima približno 10-krat manjši volumen.

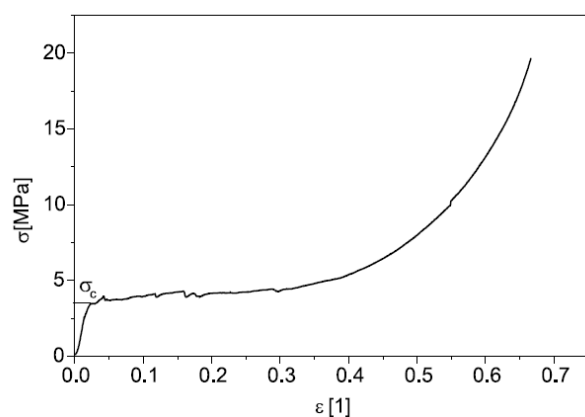
Po stiskanju morajo imeti peleti prostorninsko maso od 1000 do 1300 kg/m³ in nasipno prostorninsko maso od 600 do 650 kg/m³. Prostorninska masa smreke je od 400 do 500 kg/m³, kar pomeni da moramo volumen same lesne mase zmanjšati na manj kot polovico. Tlak, ki je potreben za stiskanje lesa iglavcev, je zelo odvisen od orientacije vlaken glede na smer stiskanja (Reiterer in Stanzl-Tschegg, 2001).



Slika 1: Tlak porušitve α [°] kot funkcija orientacije vlaken. (Reiterer in Stanzl-Tschegg, 2001, str. 709)



Slika 2: Tipičen diagram napetosti in deformacije pri tlačni obremenitvi vzporedno z vlakni ($\alpha=0^\circ$). (Reiterer in Stanzl-Tschegg, 2001, str. 710)



Slika 3: Tipičen diagram napetosti in deformacije pri tlačni obremenitvi prečno na vlakna ($\alpha=90^\circ$). (Reiterer in Stanzl-Tschegg, 2001, str. 714)

Pri stiskanju se vitke iveri v večini orientirajo prečno na smer stiskanja tako, da je diagram stiskanja bližje primeru stiskanja na sliki 3. Pričakovan tlak stiskanja je nad 10 MPa.

Pri raziskavah stiskanja v matrici s tlaki od 46 do 116 MPa so ugotovili, da poviševanje tlaka nad 50 MPa ni imelo bistvenih vplivov (Rhen in sod., 2005).

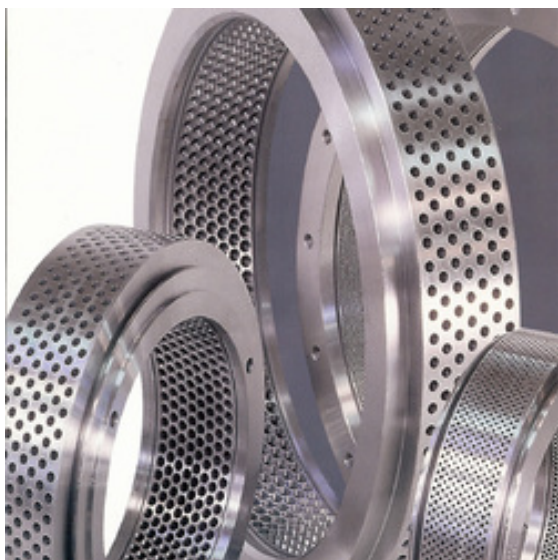
Za uspešno peletiranje moramo pri stiskanju uskladiti več parametrov:

- temperaturo matrice,
- vlažnost surovine,
- tlak stiskanja,
- trenje in
- čas stiskanja.

Po pripravi se surovino s transporterjem transportira v stiskalnico, kjer se pelete stisne skozi matrico z valji. Na drugi strani matrice nož odreže pelete na želeno dolžino. Stiskanje običajno poteka z rotacijskimi stiskalnicami; poznamo dva tipa rotacijskih stiskalnic.

2.4.4.1 Stiskalnica z matrico v obliki prstana »ring dye«

Matrica ima obliko prstana, v katerem so luknjice v radialni smeri. V notranjosti prstana so vpeti dva ali trije valji, ki se kotalijo po notranjosti prstana. Iveri se dozira s polžem, ki jih valji pod seboj stisnejo skozi luknjice.



Slika 4: Matrica »ring dye«. (Matrica »ring dye«, 2009)

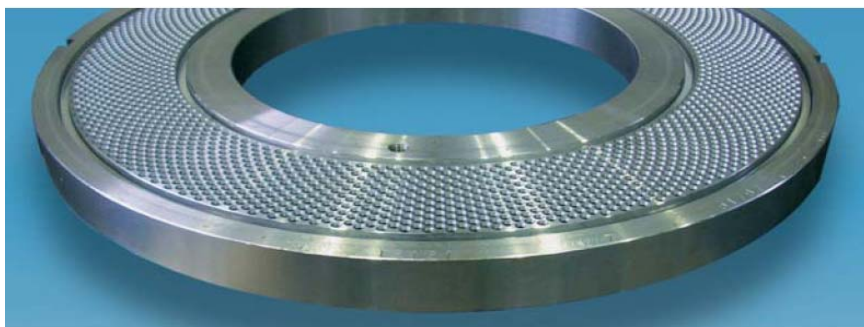


Slika 5: Stiskalnica »ring dye«. (Stiskalnica »ring dye«, 2009)

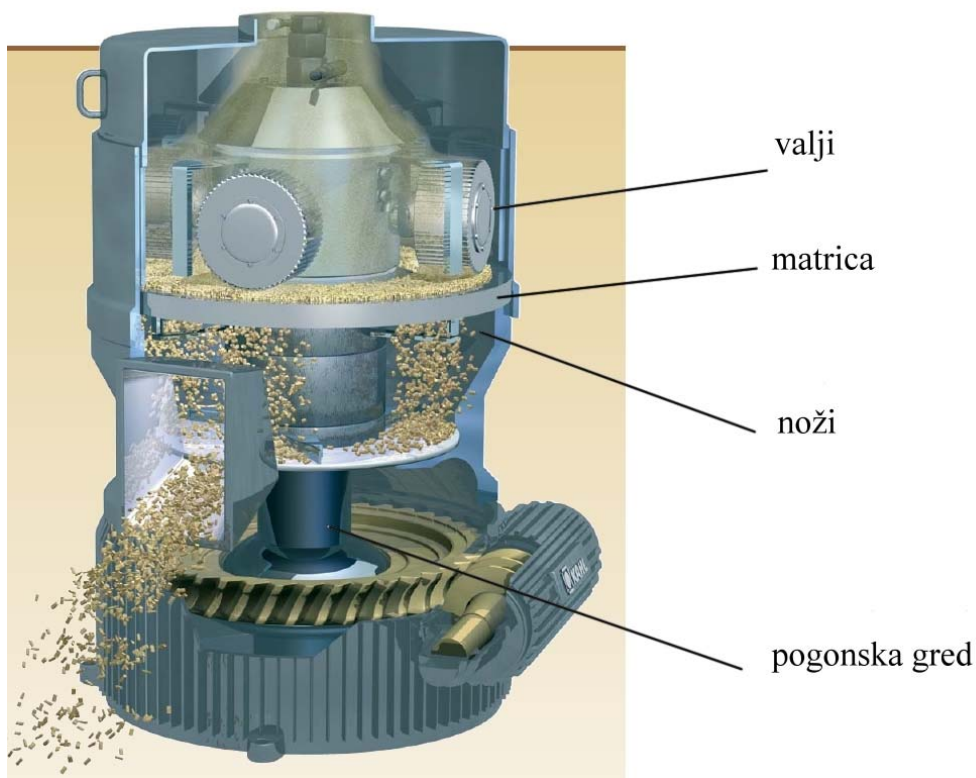
2.4.4.2 Stiskalnica z matrico v obliki koluta »flat dye«

Matrica je prav tako okrogla, le da so luknjice prečno na površino ravne ploskve koluta. Valji se kotalijo po zgornji površini koluta in pod seboj stiskajo iveri skozi luknjice.

Rotacijska stiskalnica ima lahko zelo veliko kapaciteto, vendar je zelo kompleksna, njena cena pa je visoka.



Slika 6: Matrica »flat dye«. (Matrica »flat dye«, 2009)



Slika 7: Stiskalnica »flat dye«. (Stiskalnica »flat dye«, 2009)

2.4.5 Hlajenje in sejanje peletov

Vlaga v surovini se med stiskanjem upari, kar pomaga pri iztiskanju skozi luknjice. Po stiskanju so peleti zelo vroči (90 - 100°C), zato jih je potrebno ohladiti na 25°C. To povzroči, da se lignin strdi in s tem utrdi narejene pelete. Pelete se nato presejeje, da se odstrani majhne delce; po ugotovitvah drobni delci na izhodu peletne stiskalnice predstavljajo 3% - 4% mase peletov. Drobne delce se uporabi kot gorivo pri sušenju ali ponovno kot surovina za izdelavo peletov. Po sejanju se pelete shrani v silos, zapakira v 25 kg vreče ali velike vreče (1 – 1,5 m³) (Pastre, 2002).

2.5 PRODUKTIVNOST IN ENERGIJSKE ZAHTEVE

2.5.1 Produktivnost

Produktivnost peletiranja se meri v obliki proizvedene količine na enoto porabljene energije v kg/kWh. V primeru proizvodnje peletov iz žagovine znaša produktivnost od 20 do 60 kg/kWh. Produktivnost je odvisna od surovine, ki jo uporabimo; pri uporabi listavcev je v spodnjem območju, pri uporabi iglavcev pa je v zgornjem območju (Samson R. in sod. 2000). Drugi viri navajajo še večjo variabilnost produktivnosti od 10 do 100 kg/kWh. Druga faktorja, ki vplivata na produktivnost, sta dodajanje pare in čas kondicioniranja surovine v želji, da vlakna postanejo bolj gibka. V teoriji velja, da bolj kot so vlakna gibka, lažje jih je stisniti skozi matrico (Pastre, 2002).

2.5.2 Energijske zahteve

Energijske zahteve za celotno proizvodno linijo peletov iz slame s kapaciteto 5 t/h znašajo od 600 do 800 kW; od tega 250 kW za stiskalnico. Glede na predelavo različnih vrst biomase, ki je v veliki meri odvisna od vsebnosti veziv, prihaja do velikih odstopanj. Žagovina listavcev (kot sta npr. bukev in hrast) zahteva višje tlake stiskanja kot žagovina mehkih lesov in iglavcev. Za lesno surovino je glede na tlak stiskanja specifična poraba energije med 30 in 50 kWh/t (Fenyvesi in Pecznik, 2002).

Največji delež energijskih potreb za predelavo surove surovine odpade na sušenje (približno 950 kWh je potrebnih za uparitev 1 tone vode) (Pastre, 2002).

Preglednica 1: Primerjava porabe energije pri izdelavi peletov iz slame in lesne surovine. (Pastre, 2002, str. 64)

Poraba energije (kWh/t)	žagovina	lesni sekanci	slama
mletje in sejanje	10-20	10-40	10-30
sušenje	0-400	0-400	0
kondicioniranje	0-10	0-10	0-10
stiskanje	30-60	30-60	30-60
hlajenje	5	5	5
dodatna oprema	10-20	10-20	10-20
skupaj	55-515	55-535	55-125

Pri upoštevanju, da je potrebno 950 kWh za uparitev 1 tone vode, potrebujemo za sušenje lesne surovine s 50% vlažnostjo na 10% vlažnost $(0,5 - 0,1) \times 950 = 380$ kWh. Vlažnost lesne surovine zelo variira in s tem tudi energijske potrebe pri sušenju.

Energijska poraba pri proizvodnji iz lesne surovine (ki vsebuje vse delovne procese od mletja do hlajenja) variira od 80 do 130 kWh/t. Bolj natančna vrednost energijske porabe je odvisna od različnih produkcijskih faktorjev (maziva, presejanja, mletja, izkoristka stiskalnice...) (Viak, 2000).

Za proces peletizacije (brez procesa sušenja surovine) je potrebnih 1,5% - 2% energijske vrednosti peletov. Pri vključitvi procesa sušenja vlažne surovine (npr. vlažna žagovina) je za proizvodnjo peletov potrebnih 7% - 10% energijske vrednosti peletov. Pri uporabi vlažnih sekancev je za proizvodnjo peletov (vključuje sušenje in mletje) potrebnih okoli 20% energijske vrednosti peletov. Ti podatki se nanašajo na raziskave, ki sta jih opravila Raggam in Berhmair leta 1996; navajata, da je energijska vrednost lesa 5200 kWh/tono (Viak, 2000). Problem pri tej analizi je, da so kWh-elektrike (za strojno opremo za peletizacijo) pomešani s kWh-toplotne energije (energijska vrednost lesa), kar ni realistično. Bolj realno gledano je v 1 toni suhega lesa 5300 kWh energijske vrednosti, kar je ekvivalentno 1600 kWh električne energije ali 4750 kWh toplotne energije; na podlagi tega bi bile zgoraj našteje energijske zahteve za peletizacijo sledeče (Pastre, 2002):

- 5% do 6% energijske vrednosti je potrebnih za peletizacijo suhe surovine,
- 12% do 15% energijske vrednosti peletov je potrebnih za sušenje in peletizacijo vlažne surovine (žagovine),
- 48% energijske vrednosti je potrebno za proizvodni proces peletov iz sekancev (vključuje sušenje in mletje).

Pri upoštevanju še bolj tipičnih vrednosti porabe energije za mletje, sušenje in stiskanje dobimo sledeče vrednosti:

Preglednica 2: Tipična poraba energije kWh/t za mletje, sušenje in stiskanje lesnih ostankov v primerjavi z energijsko vrednostjo peletov. (Pastre, 2002, str. 65)

vrsta energije		suha žagovina		vlažna žagovina		vlažni lesni sekanci		slama	
		en. poraba	% en. porabe	en. poraba	% en. porabe	en. poraba	% en. porabe	en. poraba	% en. porabe
mletje	elektrika	10	1%	10	1%	20	1%	10	1%
sušenje	elektrika (10%), toplota(90%)	-	-	400	9%	400	9%	-	-
stiskanje	elektrika	40	3%	40	3%	40	3%	40	3%
ostalo	elektrika	30	2%	30	2%	30	2%	30	2%
skupaj		80	6%	480	15%	490	15%	80	6%

Energijske predpostavke: 1 tona lesnih peletov: 4750 kWh toplotne energije ali 1600 kWh električne energije; 1 tona peletov iz slame: 4250 kWh toplotne energije ali 1400 kWh električne energije.

V tovarni Køge navajajo, da pri proizvodnji peletov iz slame porabijo 4% energijske vrednosti peletov in samo 2% pri proizvodnji lesnih peletov. Te vrednosti so nizke predvsem zato, ker 85% pare, ki jo uporabijo v sušilcu, ponovno uporabijo kot energijski vir. Brez recikliranja energije bi bila pričakovana poraba energije višja pri lesni surovini kot pri slami (Pastre, 2002).

2.6 PROIZVODNI STROŠKI

V preglednici 3 in 4 so podatki, ki prikazujejo okvirne stroške proizvodnje peletov. Iz teh podatkov in tudi iz osebne komunikacije se zdi, da so proizvodni stroški peletov iz slame precej podobni ali rahlo višji od lesnih peletov. Razlike nastanejo pri ceni surovine in pri ponovni uporabi energije. Cena slame variira in to lahko pripelje k večjim variabilnostim cene peletov iz slame in peletov iz lesa. Na Danskem je cena slame, v primerjavi s ceno lesnih sekancev, zelo visoka. Cena peletiziranja lesa v Avstriji znaša od 52 do 81 evrov/tono in od 73 do 94 evrov/tono s sušenjem surovine. Lahko pa doseže tudi do 100 evrov/tono (Pastre, 2002).

Thek in Obernberger sta analizirala proizvodne stroške peletov v Avstriji in na Švedskem v letu 2002. Analizirala sta devet tovarn, kjer proizvodnja znaša od 430 do 79.000 ton/leto, variacija letnega obratovanja pa od 615 do 8.000 ur/leto. Rezultati so pokazali, da so proizvodni stroški v največji meri odvisni od cene surovine in stroškov sušenja vlažne surovine. Glede na operativne pogoje lahko ta dva parametra predstavljata 1/3 vseh stroškov pri proizvodnji peletov. Glede na vlažnost tako proizvodni stroški variirajo od 79 do 101 evro/tono pri vlažni surovini in od 52 do 81 evrov/tono pri suhi surovini (Pastre, 2002).

Preglednica 3: Proizvodni stroški. (Pastre, 2002, str. 66)

Podatki za evro/tono	Lesni peleti	Lesni peleti z sušenjem	Lesni peleti brez sušenja
Surovina	31.3	34	53
Sušenje	13.0	30	2
Mletje	2.1	4	2
Peletizacija	3.6	9	14
Hlajenje	0.5	0	1
Skladiščenje	3.0	3	4
Ostalo	0.9	4	4
Stroški dela	5.5	13	20
Stroški investicije	1.4	3	0
SKUPAJ	61.0	100	100

Preglednica 4: Stroški peletiziranja lesa v Avstriji in na Švedskem v evrih leta 2002. (Pastre, 2002, str. 66)

	Povprečje	Delež %	Minimum	Delež %	Maksimum	Delež %
Surovina	33.5	36%	14	26%	51.4	38%
Sušenje	26.6	28%	25.1	47%	29.5	22%
Mletje	2.9	3%	0.3	1%	6	4%
Peletizacija	9.9	11%	7.1	13%	14.8	11%
Hlajenje	0.3	0%	0.1	0%	0.5	0%
Skladiščenje	2.9	3%	1.4	3%	4.9	4%
Dodatna oprema	3.4	4%	0.5	1%	5.2	4%
Stroški dela	11.7	13%	4.7	9%	17.4	13%
Stroški investicije	2.4	3%	0.6	1%	4.1	3%
SKUPAJ	93.6	100%	53.8	100%	133.8	100%

2.7 LASTNOSTI PELETOV

Skupnega evropskega standarda za pelete še nimamo, obstaja pa več nacionalnih standardov, ki predpisujejo različne lastnosti, ki jih morajo imeti peleti glede na njihovo uporabo. Na našem tržišču se največkrat uporablja avstrijski standard Ö-norm 7135.

Kvaliteto peletov določajo uporabnikove potrebe (Lehtikangas, 2001):

- sistem ogrevanja,
- skladiščenje peletov,
- manipulacijski pogoji.

2.7.1 Vlažnost

Vlažnost je ključnega pomena za dobro izgorevanje in avtomatski vžig. Nizka vlažnost pripomore tudi k višji kurilni vrednosti. Dovolj nizka vlažnost zagotavlja neproblematično skladiščenje, saj ni nevarnosti okužbe z glivami. Proizvajalci običajno proizvajajo pelete na zgornji meji dopustne vlažnosti, da ne prihaja do dodatnih stroškov zaradi sušenja. Peleti običajno vsebujejo 8% - 15% vlage.

2.7.2 Dimenzije peletov

Premjer in dolžina peletov sta pomembna faktorja pri zgorevanju. Izkušnje so pokazale, da tanjši peleti gorijo bolj homogeno kot debeli, še posebej v manjših pečeh (Lehtikangas, 2001). Peleti za domačo uporabo so običajno premera 6 - 8 mm. Peleti za industrijsko uporabo pa so lahko večji. Pomembno je, da uporabljamo pelete, ki ustrezajo gorilniku in transportnemu sistemu, drugače lahko prihaja do zastojev pri doziranju in do nepopolnega zgorevanja.

Dolžina peletov vpliva na dozirni sistem. Krajši kot so peleti, lažje je doseči konstanten tok (Lehtikangas, 2001). Predolgi peleti lahko povzročajo zastoje v transportnih sistemih, še posebej pri pnevmatskem transportu. Prekratki peleti pa povečujejo nastanek drobnih delcev (več odprtih površin na kilogram peletov), ki so glavni vzrok za zastoj transportnih in dozirnih polžev.

2.7.3 Obstočnost in prostorninska masa

Obstočnost in prostorninska masa sta glavna parametra fizikalnih lastnosti zgoščenih biogoriv, kot so peleti in briki. Obe vrsti biogoriv sta izpostavljeni mehanski obrabi, kar povzroči nastanek finih delcev in prahu med transportom, pretovarjanjem ter skladiščenjem. Prašni delci niso samo nevšečnost za potrošnika, temveč so predvsem škodljivi zdravju. Fini delci in prah poleg tega predstavljajo oviro dozirnemu sistemu gorilnih naprav, kar lahko privede do nehomogenega izgorevanja. Pri transportu, pretovarjanju in skladiščenju pa prah predstavlja predvsem nevarnost za požar in eksplozije (Temmerman, 2006).

Mehanska obstočnost je dejavnik, ki je definiran kot zmožnost zgoščenega biogoriva, da med rokovanjem ostane intakten. Obstočnost se meri kot odpor zgoščenega goriva proti udarcem ali trenju ter je pomemben kvalitativni parameter pri transportu in rokovanju s peleti in briki (Temmerman, 2006).

Tako prostorninska masa peleta, kot tudi vsebnost lignina sta parametra, ki imata lahko vpliv na obstojnost. Največ drobnih delcev nastane na čelih peletov, zato lahko iz tega izhaja, da je obstojnost povezana s številom peletov na kilogram. Več študij je pokazalo, da bolj, kot je surovina zmleta, boljša je kvaliteta peletov. Visoko razmerje površine na volumen v vsakem delcu omogoča boljšo penetracijo vlage in toplote in s tem se posledično izboljšajo mehanske lastnosti. Lignin v veliki meri vpliva na viskoelastične lastnosti lesa in posredno tudi na obstojnost peletov (Lehtikangas, 2001).

Na obstojnost peletov vplivajo naslednji proizvodni parametri:

- tlak stiskanja,
- temperatura stiskanja,
- vlažnost surovine.

Prenizek tlak pri stiskanju pomeni, da so peleti premalo stisnjeni. Prenizka temperatura pri peletiranju pomeni, da se lesna masa ni dovolj plastificirala. Previsoka vlažnost med skladiščenjem povzroči, da peleti nabreknejo in razpadejo v drobne delce.

Previsok delež drobnih delcev povzroča zastoje polžev in več prahu med transportom in manipulacijo s peleti. Količino drobnih delcev lahko zmanjšamo z dodatkom veziv. Največja dovoljena količina dodatkov je predpisana v standardih, uporaba sintetičnih veziv je večinoma prepovedana.

Visoka prostorninska masa se običajno povezuje z večjo obstojnostjo, vendar sta Obenberger in Thek dokazala, da temu ni vedno tako (Temmerman, 2006).

Prostorninska masa peletov je od $1.000 - 1.200 \text{ kg/m}^3$, kar dosežemo z visokim tlakom in temperaturo pri stiskanju. Visoka prostorninska masa pomeni tudi visoko nasipno prostorninsko maso.

2.7.4 Nasipna prostorninska masa

Nasipna prostorninska masa vpliva na transportno učinkovitost (Lehtikangas, 2001).

Nasipna prostorninska masa peletov je od $600 - 650 \text{ kg/m}^3$, kar omogoča enostaven in ekonomičen transport ter skladiščenje. V primerjavi s sekanci, drvami ali žagovino je potrebno veliko manj prostora za skladiščenje in transport. Za postavitev zalogovnika za celotno ogrevalno sezono enodružinske hiše tako na primer potrebujemo le okoli 5 m^2 tlorisne površine.

2.7.5 Vsebnost pepela

Vsebnost pepela je odvisna od surovine in nezaželenih primesi (zemlja, pesek), ki negativno vplivajo na mletje in peletiranje. Povečan odstotek pepela zmanjša kurilno vrednost in poveča nevarnost za zamašitev gorilca (Lehtikangas, 2001).

Zaželeno je, da je vsebnost pepela čim nižja. Pepela v lesnih peletih je manj kot 1%, v peletih narejenih iz agronomskih ostankov pa ga je lahko tudi 10%. Nizka vsebnost pepela pomeni enostavnejše in manj pogosto čiščenje. Običajno je, da se pri peči na pelete (pri uporabi kvalitetnih peletov) pepel odstranjuje enkrat tedensko ali enkrat na dva tedna. Peči z avtomatskim odstranjevanjem pepela in stiskanjem pa potrebujejo čiščenje le enkrat letno.

2.8 GLAVNE TEHNOLOGIJE SEŽIGA

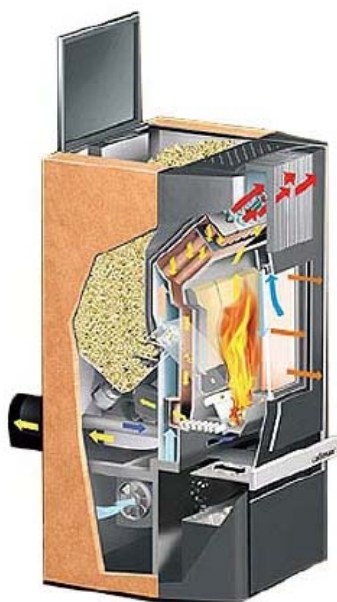
Naprave za direktno zgorevanje trdih goriv iz biomase, so od majhnih domačih kaminov (1 - 10 kW) pa do največjih peči v elektrarnah in kombiniranih toplarnah - toplota in elektrika (nad 5 MW). Vmesne naprave so majhne peči (10 - 50 kW) za uporabo v enodružinskih hišah, srednje velike peči (50 - 150 kW) za večdružinske hiše ali večje stavbe in velike peči (150 kW - 1 MW) za daljinsko ogrevanje. Velike elektrarne nad 100 MWe uporabljajo biomaso zaradi omejene količine biomase v lokalnem okolju v kombinaciji s fosilnimi gorivi (Pastre, 2002).

2.8.1 Kamini

Moderni kamini na pelete so danes učinkovite naprave za ogrevanje domov. Klasičen kamin ima manj kot 10% izkoristek pri oddajanju toplote, medtem ko ima moderen kamin na pelete izkoristek med 80% in 90%. Običajno imajo manjše naprave (kamini in majhne peči) višje emisije nezgorelih delov kot velike naprave, pri katerih je več možnosti za nadzor gorenja. Pri majhnih napravah je možno povečati izkoristek zgorevanja in zmanjšati emisije nezgorelih delov z uporabo novih tehnologij, kot so katalizatorski gorilniki in večstopenjsko zgorevanje. Izkoristek pa se prav tako poveča z boljšo izolacijo zgorevalne komore in predogrevanjem vstopnega zraka (Pastre, 2002).

Pri primernem dovodu vstopnega zraka peleti s svojimi majhnimi dimenzijami in nizko vlažnostjo prispevajo k manjšim emisijam (Nordin in Kjellström, 1996).

V procesu zgorevanja imajo peleti pri napravah za domače ogrevanje temperaturo plamena med gorenjem do 800°C in pod 400°C na površini žarečih peletov (Olsson in Kjällstrand, 2002).



Slika 8: Prerez modernega kamina na pelete. (Pastre, 2002, str 68)

2.8.2 Majhne peči

Peči namenjene izključno za uporabo peletov, so lahko popolnoma avtomatizirane, z integrirano regulacijo in sistemom za avtomatsko čiščenje pepela. Lahko je integriran tedenski zalogovnik ali pa dozirni sistem iz sezonskega zalogovnika.



Slika 9: Prerez peči na pelete. (Pastre, 2002, str 69)

2.8.3 Gorilniki

V manjših hišah predstavlja zamenjava oljnega gorilnika z novim gorilnikom na pelete razmeroma majhen investicijski strošek. Na tržišču je na voljo več takšnih uporabnih gorilnikov za nadomestilo oljnega gorilnika. To so relativno enostavne, vendar funkcionalne naprave, ki imajo v povprečju nižje emisije, kot pa najboljše peči na drva (Nordin in Kjellström, 1996).

Peči na kurilno olje niso bile namenjene za gorilnike, pri katerih ostaja nekaj pepela - kot pri lesnih peletih. Zato je potrebno redno odstranjevanje pepela, da se prepreči znižanje izkoristka ali celo zamašitev zgorevalne komore s pepelom. To se lahko opravi z enostavno opremo ter z rednimi intervali čiščenja, seveda glede na sezono in kvaliteto peletov, ki jih uporabljamo (Pastre, 2002).



Slika 10: Prerez gorilnika na pelete (levo) in zamenjava oljnega gorilnika v peči na olje (desno). (Pastre, 2002, str. 69)

2.8.3.1 Gorilniki z doziranjem peletov od zgoraj

Gorilniki, ki dozirajo pelete od zgoraj, so enostavne konstrukcije in razmeroma poceni. Polž intervalno dozira pelete z obračanjem za določen kot na določen časovni interval. Vžig poteka z vročim zrakom, ki pelete segreva toliko časa, dokler ne pride do spontanega vžiga. Regulacija zraka poteka preko vgrajenega ventilatorja in se običajno nastavlja ob letnem pregledu ali ob menjavi dobavitelja peletov. Sprotne regulacije na podlagi merjenja dimnih plinov ni. Emisije prahu so visoke, izkoristek peči je 80% - 90%. Prednost gorilnikov pa je v enostavni zasnovi in dimenzijah, saj se na zunaj bistveno ne razlikujejo od gorilnikov na kurilno olje. Vgradnja je možna v primerno peč - če je gorilnik vgrajen v kombinirano peč, je možno kurjenje tudi na drva (odstranitev gorilnika in običajno nalaganje drv).

2.8.3.2 Gorilniki z doziranjem peletov od spodaj

Pri pečeh dražje izvedbe se uporabljajo gorilniki z doziranjem peletov v kurišče od spodaj. Takšni gorilniki so običajno integrirani v samo peč, možna je uporaba zgolj samih peletov. Vžig peletov poteka z vžigalno svečko ali vročim zrakom. Regulacija vstopnega zraka je običajno izvedena preko lambda sonde, ki meri dimne pline. Emisije so nižje, izkoristek peči je od 90% - 95%.

2.9 ZALOGOVNIKI

Zaradi majhnih in precej homogenih dimenzij peletov je omogočen enostaven transport in s tem natančno avtomatsko doziranje. Pelete lahko kupimo v majhnih vrečah (15 kg), ki so primerne za uporabo v kaminih in manjših etažnih pečeh z dnevnim zalogovnikom. Za peči na centralno ogrevanje so bolj primerni sezonski zalogovniki, ki se polnijo z rifuzo. Tovornjak, podoben cisterni za prevoz krmil, v zatesnjen zalogovnik vpiha pelete za celotno sezono.

Zalogovnik je lahko pozicioniran:

- v neposredni bližini peči,
- več metrov stran, v drugem prostoru kot je pozicionirana peč,
- izven objekta ali pa je
- vkopan v zemljo (podobno kot cisterne za kurilno olje).

Transport do peči je izveden pnevmatsko do manjšega zalogovnika ob peči. V primerjavi z drvmi, peleti omogočajo enostavnejšo uporabo (avtomatski vžig), manj dela (avtomatsko doziranje), manj čiščenja (avtomatsko odpepeljevanje, avtomatsko čiščenje saj), manjši prostor za hrambo kurjave (visoka natresna prostorninska masa), izkoristek je višji, emisije so nižje, moč gorilnika pa je prilagodljiva.

3 MATERIALI IN METODE

3.1 MATERIALI

Stiskalnica, ki jo predlagamo, je zelo enostavna, stroški njene izdelave pa so majhni. Kapaciteta je majhna, vendar je možna razširitev proizvodnje z dodajanjem novih stiskalnic. S predvideno kapaciteto okoli 50 kg/h in nizko ceno je možna postavitev v mizarско delavnico. Postavitev več cenejših obratov pomeni tudi krajše poti za dobavo surovine (v primeru lastne surovine le-ta odpade) in krajše poti za izdajo izdelanih peletov končnim kupcem.

3.1.1 Zgradba eksperimentalne stiskalnice



Slika 11: Eksperimentalna stiskalnica.

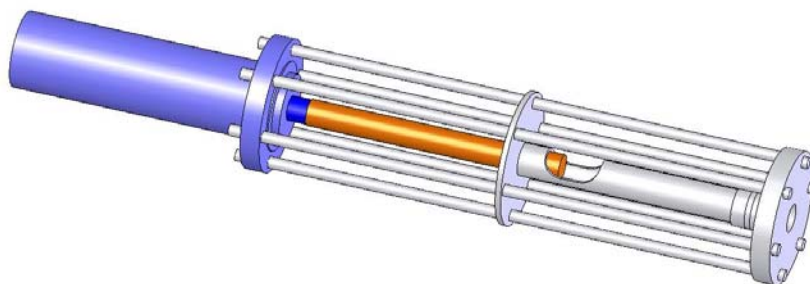
Stiskalnico sestavljajo:

- cev z odprtino za polnjenje, ki je na koncu zaprta z matrico,
- grelec za ogrevanje matrice,
- bat za stiskanje,
- hidravlični cilindar za stiskanje,
- hidravlični agregat z rezervoarjem za olje,
- regulacijski ventili za hidravliko,
- nosilno ogrodje.

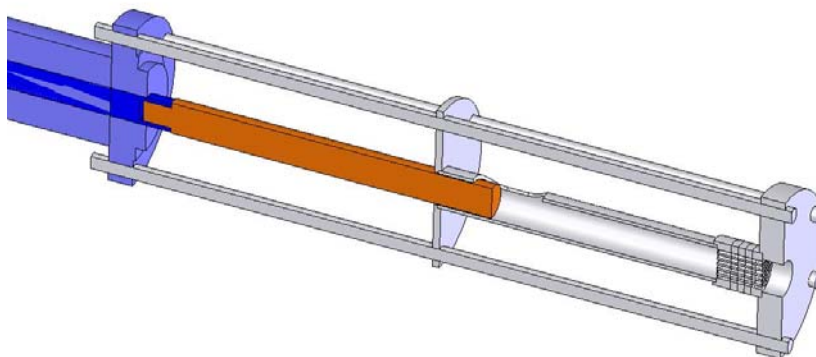
Eksperimentalna stiskalnica je zaradi poenostavitve in nižjih stroškov narejena brez sistema za polnjenje, zalogovnika za surovino ter noža za lomljenje peletov na standardno dolžino. Stiskalnico smo priključili na hidravlični agregat z maksimalnim tlakom 250 bar.

Tehnični podatki stiskalnice:

- premer hidravličnega cilindra – 125 mm,
- hod hidravličnega cilindra – 300 mm,
- premer cevi za stiskanje – 50 mm,
- teoretičen maksimalen tlak stiskanja – 1.500 bar,



Slika 12: Eksperimentalna stiskalnica brez hidravličnega agregata.



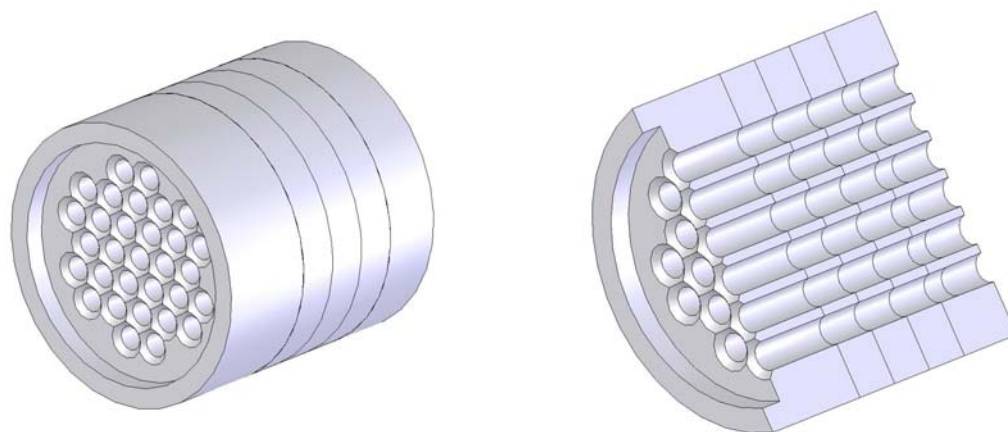
Slika 13: Prerez eksperimentalne stiskalnice brez hidravličnega agregata.

3.1.1.1 Matrica

Tehnični podatki matrice:

- notranji premer 50 mm,
- zunanji premer 70 mm,
- dolžina 65 mm,
- premer luknjic 6 mm,
- število luknjic 31.

Od debeline matrice je odvisno, koliko trenja nastane med stenami luknjic in surovino. Debelejša kot je matrica, daljše so luknjice in s tem večja površina, po kateri drsi surovina, zaradi česar nastane več trenja. Za stiskanje so potrebni višji tlaki, temperatura surovine zaradi povišanega trenja naraste. Surovina mora ostati v luknjicah vsaj en cikel, da se napetosti sprostijo, odvečna para pa izpari skozi čela.



Slika 14: Matrica (levo) in matrica v prerezu (desno).

3.1.2 Potek stiskanja

Bat za stiskanje smo postavili v skrajno odprto lego. Skozi odprtino za polnjenje smo napolnili cev s surovino in aktivirali stiskalnico. Stiskali smo do skrajne zaprte lege.

3.1.2.1 Polnitev

Polnitev na cikel je bila tolikšna, da je stisnjena surovina ostala v matrici do naslednjega cikla. Med ponovno polnitvijo se je stisnjena surovina v luknjicah matrice relaksirala pod visokim tlakom in temperaturo, odvečna para je izhajala skozi čela. Tako formirane pelete smo iztiskali iz matrice s surovino nove polnitve.

3.1.2.2 Gretje matrice

Peleti nastanejo pod visokim tlakom in visoko temperaturo. V kolikor pri procesu stiskanja ne dosežemo dovolj visokih temperatur, ne pride do plastifikacije lesa in peleti razpadejo. Lesna masa se pri stiskanju in zaradi trenja pri ekstrudiranju segreje. V kolikor to ni dovolj, je potrebno gretje. V eksperimentalni stiskalnici gretje poteka neposredno z ogrevanjem matrice s plaščnim električnim grelcem. Stiskalnica deluje taktno, tako da s prvim napolnimo luknjice, ki jih nato iztisnemo s surovino naslednjega. V času med taktoma je surovina stisnjena v luknjicah pod visokim tlakom in visoko temperaturo. Pri iztiskanju peletov iz matrice peleti obdržijo želeno obliko, v kolikor so napetosti v notranjosti peleta dovolj popustile. Prenizka temperatura matrice pomeni premalo plastifikacije in s tem krhke pelete. Previsoka temperatura (nad 180°C) povzroči prekomerno dimljenje. Poleg tega visoka temperatura povzroči večji tlak pare, ki lahko povzroči, da izvrže pelete na strani stiskanja v cev. Za sprejemljive rezultate je bila dovolj temperatura matrice 150°C - 160°C. Hladno stiskanje je bilo neuspešno.

3.1.3 Surovina

Za eksperimentalni del naloge smo uporabili žagovino in skoblance smrekovine, ki običajno nastanejo pri mizarski dejavnosti. Žagovino in skoblance smo presejal skozi sito. Sito za bolj fino surovino je imelo luknjice kvadratne oblike 1 x 2 mm, sito za bolj grobo surovino pa 3 x 4 mm. Na ta način smo dobil dva tipa surovine, bolj fino in bolj grobo. Surovini smo pred stiskanjem, med mešanjem v mešalcu za beton, dodali vodo (s pomočjo pršilke) in motorno olje.

3.1.3.1 Velikost iveri

Prevelike iveri povzročijo mašenje luknjic in s tem neuspešno peletiranje. Uporaba skoblancev je možna (skoblanci so tanki in fleksibilni kljub njihovi velikosti), vendar pa se zaradi oblike kmalu začno nalagati prečno na luknjice matrice in ustvarijo nekakšen lijak na obodu cevi. Ta lijak se s časom povečuje in zmanjšuje odprtino, skozi katero iztisnemo pelete, kar na koncu povzroči zastoj.

Za najboljšo se je izkazala fina surovina, presejana skozi sito z luknjicami v velikosti 1 x 2 mm. Za uporabo običajnih skoblancev bi bilo potrebno uporabiti dodaten mlin, ki bi njihovo velikost ustrezno zmanjšal.

3.1.3.2 Dodajanje vode

Žagovina mizarsko suhega lesa se je izkazala za presuho, zato smo dodali 5% - 15% vode. Premalo vlage je pomenilo premalo pare in s tem premajhno plastifikacijo lesa. Kljub visokemu tlaku stiskanja so bili peleti krhki in grobega videza. Prevelika količina vlage je pomenila previsok delež pare in s tem (notranji) tlak ob izstopu iz luknjic, kar se je končalo z eksplozijo peleta.

3.1.3.3 Dodajanje olja

Iztiskanje peletov iz surovine brez dodatka olja poteka pri višjem tlaku, vendar prihaja do pojava "slip stop". To povzroči, da se v določenem trenutku peleti iztisnejo z veliko hitrostjo, kar v končni fazi pomeni, da se razletijo. Z dodatkom olja (okoli 1% utežno), smo dosegli bolj enakomerno iztiskanje in s tem manj možnosti za nenadno relaksacijo, ki bi povzročila razpad peleta. Višje koncentracije olja namreč povzročijo padec tlaka stiskanja. Za potrebe eksperimenta smo uporabili običajno motorno olje. Možno bi bilo uporabiti tudi izrabljeno motorno olje ali olje rastlinskega izvora. Uporaba jedilnega olja je bila uspešna, vendar tako peleti po daljšem skladiščenju postanejo žarki.

3.2 METODE

3.2.1 Prostorninska masa

Stereometrične metode bazirajo na merjenju dimenzij (premer, dolžina, debelina, višina) in mase vzorca z uporabo merilnih instrumentov, npr. kljunasto merilo in tehtnico. Volumen vzorca se izračuna kot volumen najbližje pravilne geometrične oblike (valj, kocka...) (Rabier, 2006).

Iz posamezne serije izdelanih peletov smo odvzeli 10 peletov in jih stehtali na 0,001 g natančno. Vse velikostne meritve smo izmerili z natančnostjo 0,1 mm. Pri kalkulaciji smo predvidevali, da ima pelet obliko cilindra. Konveksna in konkavna čela vsakega peleta smo odstranili pravokotno na os peleta. Odvečne dele smo odbrusili s tračno brusilko. S stehtano maso smo izračunali prostorninsko maso.

Izračun volumna peleta:

$$V = l \times \frac{\pi \times d^2}{4} \quad \dots 1$$

V - volumen peleta [mm³]

l - dolžina peleta [mm]

d - premer peleta [mm]

Izračun prostorninske mase:

$$\text{prostorninska masa} = \frac{m}{V} = \frac{m}{l \times \frac{\pi \times d^2}{4}} \quad \dots 2$$

m - masa peleta [g]

V - volumen peleta [mm³]

l - dolžina peleta [mm]

d - premer peleta [mm]

3.2.2 Nasipna prostorninska masa

Nasipno prostorninsko maso smo izmerili s tehtanjem peletov v posodi volumna 1 l.

Izračun nasipne prostorninske mase:

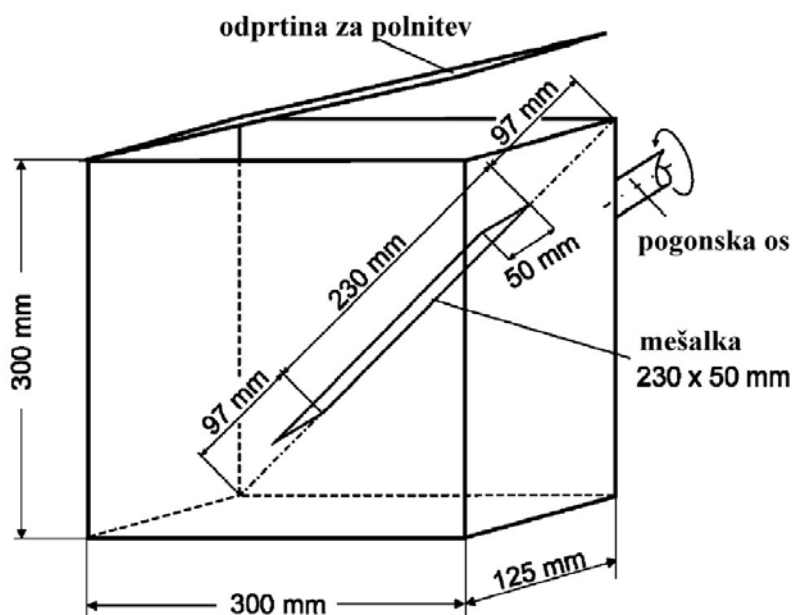
$$\text{nasipna prost. masa} = \frac{m \text{ [g]}}{V \text{ [dm}^3\text{]}} = \frac{[\text{kg}]}{[\text{m}^3]} \quad \dots 3$$

m - masa peletov [g]

V - volumen posode [dm³]

3.2.3 Obstočnost (ASAE S 269.4)

Standard opisuje vrtilno napravo, narejeno iz aluminija ali nerjavečega jekla, kvadraste oblike z notranjimi merami 300 x 300 x 125 mm. Za dodaten efekt vrtenja ima kvader v notranjosti 230 mm dolgo in 50 mm široko mešalno ploščo. Mešalna plošča je nameščena diagonalno na stranico 300 x 300 mm. Zakovice in vijaki so minimizirani ter čim bolj zaobljeni. Kvader rotira na osi, ki je orientirana pravokotno na stranice.



Slika 15: Naprava za merjenje obstojnosti peletov. (Temmerman, 2006, str. 966)

Zaradi poenostavitve eksperimenta smo kvader naredili iz ivernih plošč ter za sito uporabili žičnato mrežo s kvadratnimi luknjicami.

Kvader smo napolnili z vzorcem 500 g in vrteli 10 minut s hitrostjo 50 obr./min., torej skupaj 500 obratov. Po končanem vrtenju smo vzorec presejali na situ z luknjicami dimenzij 3 x 4 mm. Obstočnost je izražena kot odstotek preostale mase peletov. Upoštevali smo povprečje petih merenj.

Rezultat nad 97,5% pomeni prvovrstne pelete. Za primerjavo dobljenih rezultatov smo po istem postopku izmerili vzorce industrijskih peletov večjega (1) in manjšega (2) slovenskega proizvajalca.



Slika 16: Poenostavljena naprava za merjenje obstojnosti peletov.

3.2.4 Vlažnost

Vzorci surovine in vzorci peletov smo stekali in jih nato 24 ur sušili pri temperaturi $103 \pm 3^\circ\text{C}$. Po sušenju smo vzorce ponovno stekali in izračunali njihovo vlažnost.

Izračun vlažnosti:

$$\text{vlažnost [\%]} = \frac{m_{\text{vlažen}} - m_{\text{suh}}}{m_{\text{suh}}} \times 100$$

$m_{\text{vlažen}}$ - masa vlažnega peleta [g]

m_{suh} - masa suhega peleta [g]

...4

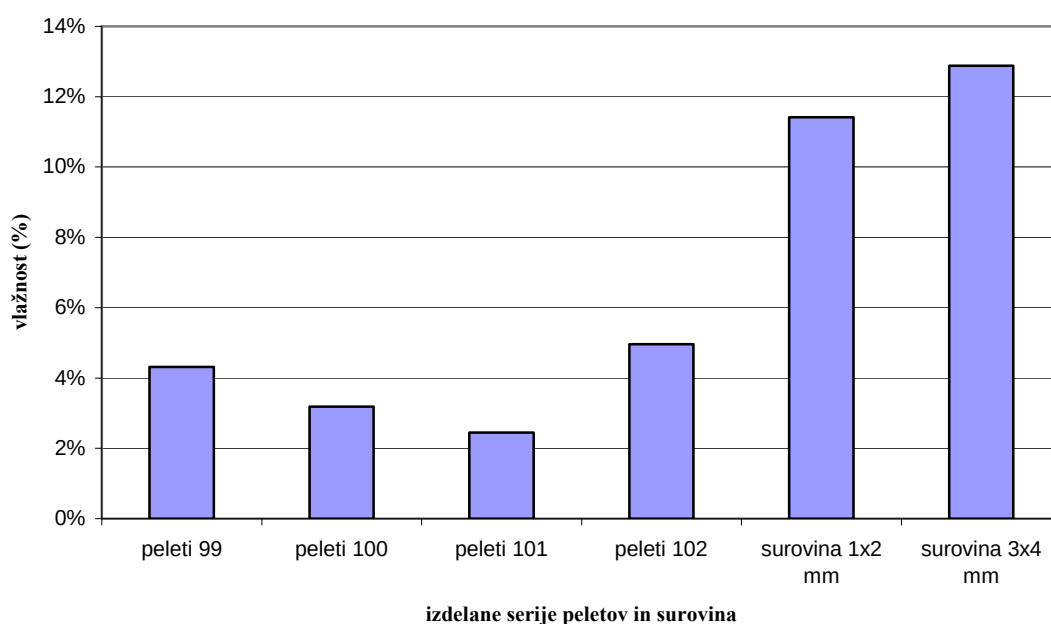
4 REZULTATI

4.1 VLAŽNOST

Iz preglednice 5 in slike 17 je razvidno, da imajo peleti nižjo vlažnost kot surovina, iz katere smo jih izdelali.

Preglednica 5: Vlažnost izdelanih peletov in surovine.

Serijska	Petrijevka (g)	Petrijevka + vlažen vzorec (g)	Petrijevka + suh vzorec (g)	Vlažnost (%)
Peleti 99	216,178	329,621	324,930	4,3
Peleti 100	212,294	325,204	321,720	3,2
Peleti 101	207,190	314,205	311,650	2,4
Peleti 102	212,354	336,700	330,820	5,0
Surovina 1 mm	216,128	278,888	272,460	11,4
Surovina 3 mm	223,252	270,750	265,330	12,9



Slika 17: Vlažnost izdelanih peletov in surovine.

4.2 PROSTORNINSKA MASA

Iz preglednic 6, 7, 8 in 9 ter slike 18 je razvidno, da imajo vsi izmerjeni vzorci prostorninsko maso nad 1.000 kg/m^3 .

Preglednica 6: Žagovina presejana skozi sito 1mm, dodano 7,5% vode, 1% motornega olja, $T=150^\circ\text{C}$.

Serijska	Dolžina (mm)	Masa (g)	Prostorninska masa (kg/m^3)	Povprečje (kg/m^3)
Peleti 99	42,7	1,423	1179	1080
	39,0	1,280	1161	
	31,1	0,958	1090	
	29,3	0,872	1053	
	38,3	1,171	1082	
	35,9	1,059	1044	
	37,2	1,083	1030	
	37,5	1,126	1063	
	34,0	0,992	1032	
	27,6	0,833	1068	

Preglednica 7: Žagovina presejana skozi sito 1 mm, dodano 7,5% vode, 2% motornega olja, $T=150^\circ\text{C}$.

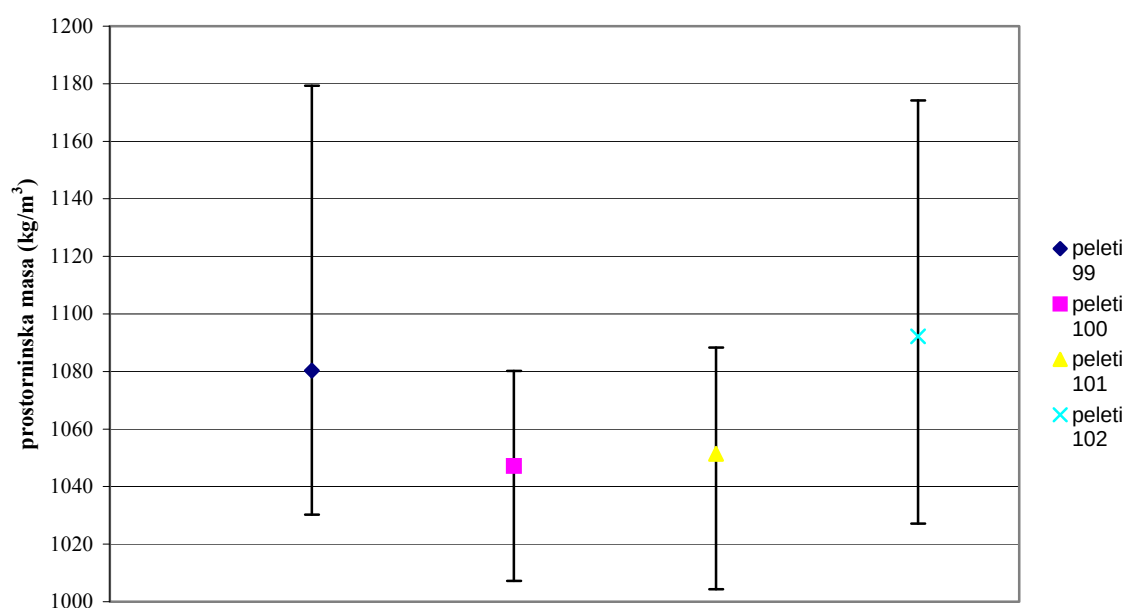
Serijska	Dolžina (mm)	Masa (g)	Prostorninska masa (kg/m^3)	Povprečje (kg/m^3)
Peleti 100	34,4	1,035	1065	1074
	34,9	1,020	1034	
	32,6	1,006	1092	
	28,0	0,876	1107	
	29,5	0,873	1047	
	29,8	0,894	1062	
	25,6	0,774	1070	
	24,4	0,747	1083	
	29,5	0,908	1089	
	26,3	0,817	1099	

Preglednica 8: Žagovina presejana skozi sito 3 mm, dodano 7,5% vode, 2% motornega olja, T=150°C.

Serijska	Dolžina (mm)	Masa (g)	Prostorninska masa (kg/m ³)	Povprečje (kg/m ³)
Peleti 101	32,9	0,996	1071	1051
	37,6	1,122	1056	
	39,6	1,177	1052	
	29,0	0,892	1088	
	34,2	1,008	1043	
	29,1	0,826	1004	
	31,8	0,951	1058	
	28,9	0,870	1065	
	32,1	0,926	1021	
	35,3	1,052	1055	

Preglednica 9: Žagovina presejana skozi sito 3 mm, dodano 7,5% vode, 1% motornega olja, T=150°C.

Serijska	Dolžina (mm)	Masa (g)	Prostorninska masa (kg/m ³)	Povprečje (kg/m ³)
Peleti 102	35,0	1,054	1066	1092
	40,2	1,233	1085	
	41,4	1,328	1135	
	38,9	1,163	1058	
	43,5	1,262	1027	
	38,0	1,130	1052	
	36,7	1,118	1078	
	34,0	1,128	1174	
	33,0	1,056	1132	
	36,1	1,137	1115	



Slika 18: Prostorninska masa izdelanih peletov.

4.3 NASIPNA PROSTORNINSKA MASA

Nasipno prostorninsko maso smo izmerili z združevanjem večjega števila vzorcev - tako smo dobili večji volumen peletov ter skupno povprečno vrednost za vse izdelane pelete, ki je znašala 630 kg/m^3 .

4.4 OBSTOJNOST

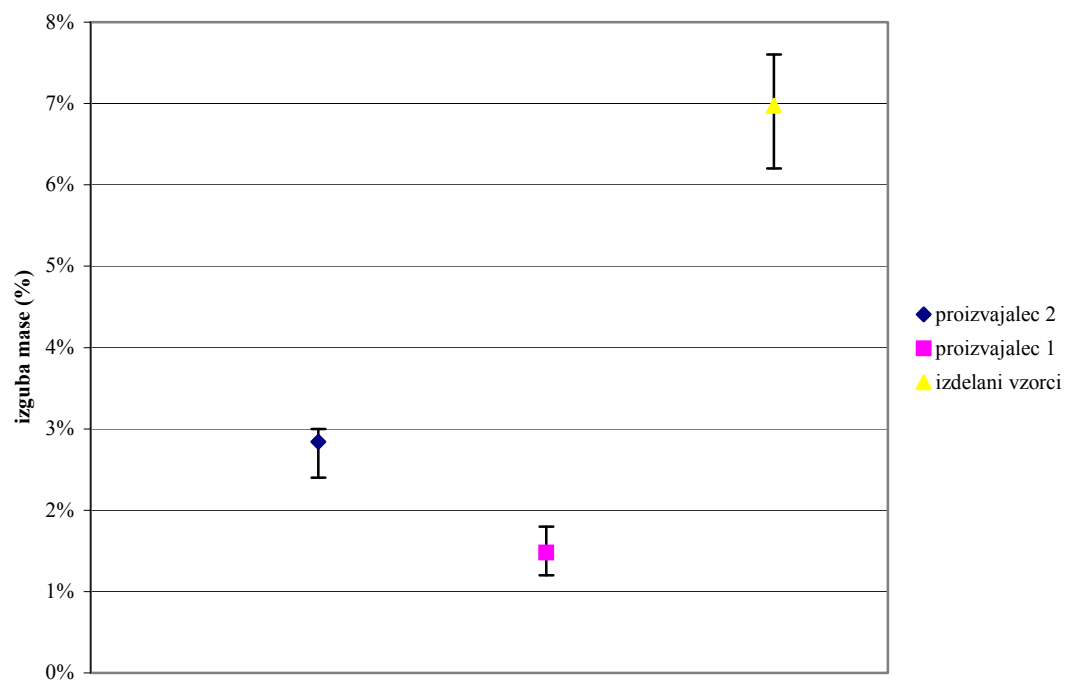
Iz preglednice 10 in slike 19 je razvidno, da je kljub visoki prostorninski masi obstojnost eksperimentalnih peletov slabša kot pri komercialnih peletih, kar potrjuje ugotovitve (Temmerman, 2006), da obstojnost ni neposredno povezana z visoko prostorninsko maso peleta.

Preglednica 10: Test obstojnosti po ASAE S269.4, primerjava s komercialnimi peleti.

Vzorci peletov	Vzorec (g)	Ostanek mase po rotiranju (g)	Izguba mase (%)	Povprečje izgube mase (%)
Proizvajalec 2	500	488	2,4	2,84
	500	486	2,8	
	500	485	3,0	
	500	485	3,0	
	500	485	3,0	

Proizvajalec 1	500	491	1,8	1,48
	500	492	1,6	
	500	494	1,2	
	500	492	1,6	
	500	494	1,2	

Izdelani vzorci serija				
Peleti 99	500	469	6,2	6,97
Peleti 100	500	462	7,6	
Peleti 101	500	467	6,6	
Peleti 1021	488	453	7,2	
Peleti 1022	398	369	7,3	

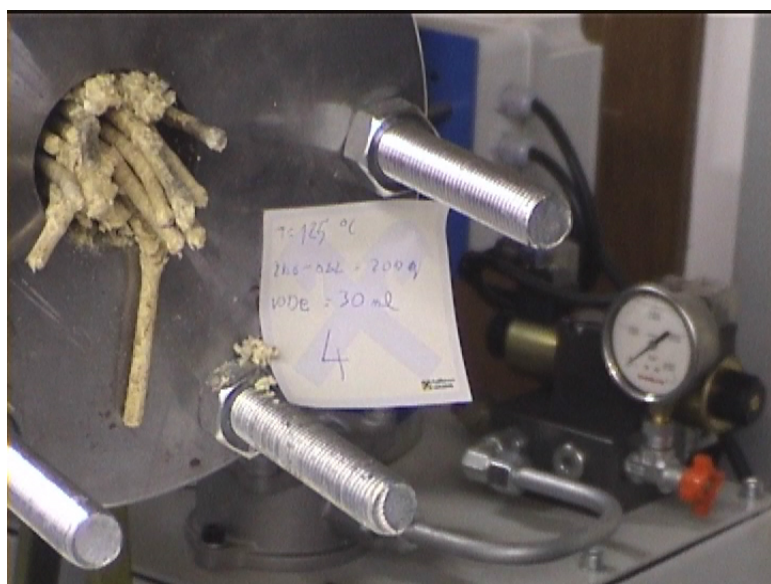


Slika 19: Test obstojnosti po ASAE S269.4.

5 RAZPRAVA

Med preizkusom stiskalnice smo uporabili različne parametre stiskanja in priprave surovine. Uskladiti je bilo potrebno vlažnost surovine, temperaturo matrice in dodatek olja. Matrico je bilo potrebno ogrevati. Hladno stiskanje je bilo neuspešno, gretje matrice zaradi trenja surovine je bilo nezadostno, samo stiskanje je bilo endotermno - temperatura je med stiskanjem padla, kar je posledica uparjanja vlage iz surovine. Kot nepremostljiv problem se je izkazalo mašenje luknjic, kar je bilo posledica nalaganja surovine. Najprej se je začelo na obodu matrice, nadaljevalo proti notranjosti, končalo pa s popolno zamašitvijo. Vzrok za to je najverjetneje v linearnem načinu stiskanja za razliko od stiskalnic z valji, kjer valji stiskajo surovino pod seboj in kjer prihaja tudi do gibanja surovine prečno na čelo matrice in s tem sprotnega čiščenja površine matrice.

Pri procesu se je, kot posledica različnih parametrov stiskanja, pojavilo nekaj težav. Navedenih je nekaj tipičnih primerov.



Slika 20: Cvetenje peletov.

Pogoji stiskanja: T matrice = 125°C , dodane vode 15% in tlak stiskanja 1.250 bar.

Če smo dodali preveč vode, je bila pogosta posledica cvetenje peletov na izhodu matrice.



Slika 21: Eksplozija peletov.

Pogoji stiskanja: $T_{\text{matrice}} = 125^{\circ}\text{C}$, dodane vode 7,5%, dodanega olja 1,5% in tlak stiskanja 1.200 bar. Ob delni zamašitvi je pelete ob izhodu izstrelilo iz matrice.



Slika 22: Zamašitev matrice.

Pogoji stiskanja: $T_{\text{matrice}} = 98^{\circ}\text{C}$, dodane vode 6,6%, dodanega olja 1,5% in tlak stiskanja 1.500 bar.

Temperatura je prenizka, surovina se ni dovolj zmehčala, posledica je zamašitev, še preden prvi peleti zapustijo matrico. Surovina se ustavi pred matrico, kjer nastane briket, ki ga je potrebno mehansko odstraniti.



Slika 23: Uspešno stiskanje.

Pogoji stiskanja: $T_{\text{matrice}} = 170^{\circ}\text{C}$, dodane vode 3,3%, dodanega olja 1% in tlak stiskanja 1.000 bar.

Temperatura je visoka, peleti se iztiskajo enakomerno iz celotne matrice, stiskanje je uspešno.

6 SKLEPI

Izdelali smo enostavno eksperimentalno stiskalnico z namenom izdelave peletov. Vzorce smo stisnili iz surovine pripravljene iz žagovine smrekovine in analizirali nekatere njihove lastnosti.

Peletiranje s pomočjo stiskalnice se je pod določenimi pogoji izkazalo za uspešno.

Surovina je morala imeti pravilno vlažnost, presuha je povzročala zastoje in krhke pelete kljub visokim tlakom stiskanja. Previsoka vlažnost pa je povzročila padec tlaka stiskanja, povišan pritisk pare na izhodu iz matrice in s tem cvetenje ali eksplozijo peletov.

Surovini je bilo potrebno dodati majhen delež olja. Stiskanje brez dodatka olja je povzročilo hitro zamašitev luknjic. Matrico je bilo potrebno ogrevati, hladno stiskanje je bilo neuspešno.

Lastnosti izdelanih peletov, ki smo jih izmerili so pokazale, visoko prostorninsko in nasipno maso, nizko vlažnost in nekoliko slabšo obstojnost.

Za izdelavo tako majhne in stroškovno ugodne stiskalnice bi bila bolj primerna stiskalnica za brikete. Nenazadnje so pri neuspešnem stiskanju peletov nastali uporabni briketi.

7 POVZETEK

V želji po cenovno čim ugodnejši stiskalnici za pelete smo izdelali stiskalnico manjše kapacitete za stiskanje peletov. Takšna stiskalnica bi bila uporabna tako za manjše kot večje mizarske delavnice. Na tržišču je veliko proizvajalcev strojev manjših kapacitet za izdelavo lesnih briketov, medtem ko je ponudba takšnih strojev za izdelavo lesnih peletov majhna. Dražja investicija zaradi bolj kompleksne konstrukcije ekonomsko ne bi bila smiselna.

Eksperimentalna stiskalnica, ki smo jo izdelali, je bila poenostavljena predvsem zaradi nižjih stroškov. Narejena je bila brez sistema za polnjenje, zalogovnika in noža za lomljenje peletov na standardno dolžino. Matrico je bilo potrebno ogrevati, saj se je hladno stiskanje izkazalo za neuspešno.

Za potrebe diplomske naloge smo uporabili žagovino in skoblance smrekovine, ki nastanejo pri mizarski dejavnosti. Za primerjavo nekaterih rezultatov smo uporabili vzorce industrijskih peletov dveh slovenskih proizvajalcev. Energijske vrednosti peletov nismo ugotavljali.

Pri stiskanju skoblancev je nastala težava, ker so se zaradi oblike kmalu začeli nalagati prečno na luknjice matrice in tako ustvarili nekakšen lijak na obodu cevi. Za najboljše se je izkazala fina žagovina, presejana skozi sito.

Pri stiskanju surovine s prenizko vlažnostjo je prihajalo do zamašitev, zato smo surovini pred stiskanjem dodali 5% - 15% vode. Z 1% - 2% dodatkom olja surovini smo dosegli bolj enakomerno izstiskanje.

Izdelanim peletom smo izmerili prostorninsko maso, nasipno prostorninsko maso, obstojnost in vlažnost.

Vsi izdelani peleti so imeli nižjo vlažnost kot surovina, iz katere smo jih izdelali. Izmerjeni vzorci peletov so imeli prostorninsko maso nad 1.000 kg/m^3 . Nasipno prostorninsko maso smo izmerili z združevanjem večjega števila vzorcev in dobili skupno povprečno vrednost 630 kg/m^3 . Obstojnost eksperimentalnih peletov je bila slabša kot pri komercialnih peletih.

S preučevanjem delovanja eksperimentalne stiskalnice smo ugotovili, da je izdelava peletov na takšen način sicer možna, vendar zamašitev stiskalnice predstavlja velik in resen problem, ki ga nismo zadovoljivo rešili.

8 VIRI

8.1 CITIRANI VIRI

ASAE S 269.4. Cubes, pellets and crumbles-definitions and methods determining, durability and moisture content. 1996

Fenyvesi A., Pecznik F. 2002. Energy requirement of biomass compressing. V: Proceedings from the twelfth European Biomass Conference: Biomass for energy industry and climate protection, held in Amstrdam, 17-21 june 2002: 498-500

Jannasch R., Quan Y., Samson R. 2001. A Process and Energy Analysis of Pelletizing Switchgrass
http://www.reap-canada.com/online_library/feedstock_biomass/11%20A%20Process.pdf
(8. apr. 2009)

Lehtikangas P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy, 20: 351-360

Matrica »ring dye«. 2009
www.indiamart.com/company/793980/products.html (10. nov. 2009)

Matrica in stiskalnica »flat dye«. 2009
<http://www.akahl.de/index.php?hid=47> (7. apr. 2009)

Nordin A., Kjellström B. 1996. Biomass for heat and electricity production - Engineering aspets: 253-315

O'Connror L. 2001. Wood peleting : Quality, output, energy-The view of a die manufacturer. Second European Roundtable Woodpeletes, November 2001

Olsson M., Kjällstrand J. 2002. Emissions from burning of softwood pellets. V: Proceedingsn of the first world conference on pellets, organised by the Sweden bioenergy association, Stockholm, 2 april 2002: 111-114

Pastre O. 2002. Analysis of the thechnical obstacles related to the production and utilisation of fuel pellets made from agricultural residues: 51-107
<http://www.eubia.org> (5. mar. 2007)

Rabier F., Temmerman M., Böhm T., Hartmann H., Jensen D.P., Rathbauer J., Carrasco J., Fernández M. 2006. Particle density determination of pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy, 30: 954-963

Reiterer A., Stanzl-Tschegg. 2001. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain: 705-715

Rhen C., Gref R., Sjöström M., Wäsrerlund I. 2005. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets
Samson R., Duxbury P., Drisdelle M., Lapinte C. Assessment of Pelletized Biofuels 2000.

<http://www.reap-canada.com/Reports/pelletaug2000html> (3. feb. 2007)

Ståhl M., Granström K., Berghel J., Renström R. 2002. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. V: Proceedings of the first world conference on pellets, organised by the Sweden Bioenergy Association, Stockholm Sweden, 2 apr. 2002: 87-91

Stiskalnica »ring dye«. 2009

http://www.cpmroskamp.com/images/products/popup_pelletmillCAD.jpg (10. nov. 2009)

Temmerman M., Rabier F., Jensen D.P., Hartmann H., Böhm T. 2006. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy, 30: 964-972

Thek G., Obernberger I. 2004. Wood pellet production costs under Austrian and in comparison to Swedish framework conditions. Biomass and Bioenergy, 27, 6, 671-693

Viak A. 2000. Wood pellets in Europe - State of the art, technologies, activities, markets, Technische Universität München. Part of the Thermine B project.

Wahlund B., Yan J., Westermarck M. 2004. Increasing biomass utilisation in energy systems: A comparative study CO₂ reduction and cost for different bioenergy processing options. Biomass and Bioenergy, 26: 531-5

ZAHVALA

Delo diplomske naloge je bilo opravljeno na Katedri za mehanske in obdelovalne tehnologije lesa, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Bojanu Bučarju za pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge, recenzentki doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za nasvete in pregled diplomske naloge, g. Bojanu Gospodariču za tehnično pomoč v laboratoriju in g. Karlu Vovku za izdelavo matrice.