

UNIVERZA V LJUBJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dejan KAKER

**TEHNOLOŠKE ZNAČILNOSTI IZDELAVE LESNIH
KURIV**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2009

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Dejan KAKER

TEHNOLOŠKE ZNAČILNOSTI IZDELAVE LESNIH KURIV

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

**TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WOOD FUEL
PRODUCTION**

GRADUATION THESIS

Higher professional studies

Ljubljana, 2009

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za žagarstvo in lesna tvoriva Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorico diplomskega dela imenovala doc.dr. Dominiko Gornik Bučar, za somentorja prof. dr. Bojana Bučarja in za recenzenta prof. dr. Željka Goriška.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Član:

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Dejan Kaker

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*839.81
KG	lesna kuriva/bukovina/vlažnost/temperatura stiskanja
AV	KAKER, Dejan
SA	GORNIK BUČAR, Dominika (mentorica)/BUČAR, Bojan (somentor)/GORIŠEK, Željko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2009
IN	TEHNOLOŠKE ZNAČILNOSTI IZDELAVE LESNIH KURIV
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	XI, 57 str., 10 pregl., 30 sl., 1 pril., 39 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Nastajajoča energetska kriza odpira možnosti alternativnim energetskim virom, istočasno pa pridobivajo na pomenu klasična lesna kuriva, oplemeniteni z novimi tehnologijami izdelave. S stiskanjem lesne mase lahko zagotovimo višje kurilne vrednosti kuriv, lažji transport in skladiščenje. Postopki izdelave stiskancev so odvisni od končnega proizvoda v obliki sekancev, peletov ali briketov. Na energijsko učinkovitost vplivajo predvsem kakovost lesne mase in njena vlažnost, na uporabnost stiskancev pa tudi pogoji med izdelavo. Vplive vlažnosti in temperature med stiskanjem smo raziskali z laboratorijskimi poskusi. Izdelana je bila posebna stiskalna naprava za izdelavo stiskancev, ki smo jo vstavili v testirni stroj Zwick. Bukovo žagovino smo uravnovesili na vlažnosti 9,8 %, 11,8 %, 14,8 %, 18 % in 27,4 %. Stiskance smo izdelovali pri temperaturah 50 °C, 60 °C, 70 °C in 80 °C. Po fazi stiskanja, ki je trajala okoli 72 s, smo opazovali sproščanje notranjih napetosti v stiskancih oziroma relaksacijo stiskancev. Rezultate meritev smo normalizirali s pomočjo modelov za stiskanje in sproščanje. Poskusi so pokazali, da smo dobili največje kompaktnosti stiskancev pri vlažnostih pod 15 % in temperaturah nad 50 °C.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs

DC UDC 630* 839.81

CX wood fuels/beechn wood/moisture/compression temperature

AU KAKER, Dejan

AA GORNIK BUČAR, Dominika (supervisor)/BUČAR, Bojan (co-supervisor)/GORIŠEK, Željko (reviewer)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2009

TI TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WOOD FUEL PRODUCTION

DT Graduation Thesis (Higher professional studies)

NO XI, 57 p., 10 tab., 30 fig., 1 ann., 39 ref.

LA sl

AL sl/en

AB The emerging energetic crisis paves paths for alternative energy sources and also reverts to classical wood fuels augmented by new production technologies. By compressing wood residues, comparably higher combustion heat values, facilitated transportation and warehousing are obtained. Technological processes are different, depending on the final products being either woodchips, pellets, or briquettes. Their energy efficiency is influenced by the quality of densified wood logs (slugs) and the moisture contents, while their applicability features depend on the conditions during a piston-and-mould process. We tested the moisture and temperature dependencies in several laboratory experiments. A mould was constructed and used in a Zwick testing machine. We balanced beech wood saw residues at 9.8 %, 11.8 %, 14.8 %, 18 %, and 27.4 % moisture levels and, afterwards, compressed them at temperatures 50 °C, 60 °C, 70 °C, and 80 °C. After the compression completed in about 72 s, we observed intrinsic tensions in the logs during the relaxation phase. We normalised the resulting measurements by the compression and relaxation models. The experiments proved the best quality densified logs with highest compactness were obtained with moistures below 15 % and temperatures above 50 °C.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PREGLEDNIC	X
KAZALO PRILOG	XI
1 UVOD	1
1.1 UVODNA OBRAZLOŽITEV	1
1.2 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.3 CILJI IN HIPOTEZE	1
1.4 METODE DELA	1
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1 VRSTE LESNIH KURIV IN SUROVINE ZA NJHOVO IZDELAVO	3
2.2 LASTNOSTI LESA KOT KURIVA	6
2.2.1 Kurilna vrednost lesnih kuriv in njihova energijska učinkovitost	6
2.2.2 Vlažnost lesa in vsebnost vode v lesu	8
2.2.3 Gostota in kemična sestava lesa	9
2.2.4 Ohranjenost lesa	10
2.3 TEHNOLOGIJE PRIPRAVE LESNIH KURIV	11
2.3.1 Tehnologije za pripravo polen in cepanic	12
2.3.1.1 Sečnja in spravilo	12
2.3.1.2 Izdelava polen in cepanic	12
2.3.1.3 Transport, skladiščenje in sušenje cepanic ter polen	13
2.3.1.4 Kurilne naprave	13
2.3.2 Tehnologije za pripravo lesnih sekancev	13

2.3.2.1	Izdelava lesnih sekancev	14
2.3.2.2	Transport, skladiščenje in sušenje sekancev.....	15
2.3.2.3	Kurilne naprave	15
2.3.3	Tehnologije za pripravo briketov.....	16
2.3.3.1	Izdelava lesnih briketov	16
2.3.3.2	Transport, skladiščenje in sušenje briketov	17
2.3.3.3	Kurilne naprave	18
2.3.4	Tehnologije za pripravo peletov.....	18
2.3.4.1	Izdelava lesnih peletov	18
2.3.4.2	Transport, skladiščenje in sušenje peletov	21
2.3.4.3	Kurilne naprave	22
2.4	STANDARDI IN ZAKONODAJA.....	23
3	MATERIALI IN METODE	27
3.1	PRIPRAVA VZORCA	27
3.1.1	Granulacija lesne mase	27
3.1.2	Uravnovešanje vzorcev na različne vlažnosti.....	28
3.2	IZVEDBA NAPRAVE ZA IZDELAVO STISKANCEV	29
3.2.1	Zasnova stiskalne naprave.....	30
3.2.2	Gretje vzorca in merjenje temperature.....	31
3.3	IZDELAVA STISKANCEV	33
3.3.1	Nastavitve stroja	33
3.3.2	Fazi stiskanja in sproščanja.....	34
3.3.3	Tehtanje in merjenje stiskancev.....	35
3.4	NORMIRANJE MERITEV IN UPORABA MODELOV	36
4	REZULTATI IN INTERPRETACIJA MERITEV	39
4.1	DIMENZIJE IN MASE STISKANCEV	39

4.2	PARAMETRI JONESOVIH IN PELEGOVIH MODELOV	42
4.3	NAPETOSTI V STISKANCIH PRED SPROŠČANJEM IN PO NJEM	44
4.4	SPREMEMBE DOLŽIN STISKANCEV PO STISKANJU.....	47
5	RAZPRAVE IN SKLEPI.....	50
6	POVZETEK.....	54
7	VIRI	55

ZAHVALA

PRILOGA

KAZALO SLIK

Slika 1:	Osnovna shema tehnologije priprave lesnega kuriva	4
Slika 2:	Briketi	5
Slika 3:	Peleti	5
Slika 4:	Primerjava energijskih vrednosti drevesnih vrst na osnovi mase – osnova je energijska vrednost bora	7
Slika 5:	Primerjava energijskih vrednosti drevesnih vrst na osnovi prostornine – osnova je energijska vrednost robinije	7
Slika 6:	Kotel na lesne sekance z zalogovnikom in polžastim prenosom sekancev	16
Slika 7:	Strojna linija za izdelavo briketov	17
Slika 8:	Švedski stroj za izdelavo peletov	20
Slika 9:	Bobenski sekalnik BRUKS 805 CT	20
Slika 10:	Prikaz polnjenja peletov iz zalogovnika v peč	22
Slika 11:	Kotel na lesne pelete	23
Slika 12:	Šestkaskadni sejalni stroj	28
Slika 13:	Vlažilne komore s kadičkami za material	29
Slika 14:	Shematski prikaz eksperimentalnega okolja, ki ga sestavljajo stiskalni stroj Zwick Z-100 (S), stiskalna naprava z valjem (A), podstavkom (B) in batom (C) ter grelna telo (D) s temperaturnim regulatorjem N480D – V3.2x (E)	30
Slika 15:	Stiskalna naprava: valj (A), nosilna plošča z nastavkom za valj in luknjo za temperaturno tipalo (B) ter batnica z batom (C)	31
Slika 16:	Cilindrično grelna telo (levo) in mikroprocesorski regulator temperature (desno)	32
Slika 17:	Merilnik temperature DT-300	32
Slika 18:	Postavitev stiskalne naprave v okvir testirnega stroja	34
Slika 19:	Potek sil med stiskanjem in sproščanjem: primer 1 (višja krivulja) kaže meritev, pri kateri smo natresli največjo maso stiskanega materiala (68,73 g suhe snovi pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 70 °C), primer 2 (nižja krivulja) pa meritev, pri kateri smo natresli najmanjšo količino lesne mase (42 g suhe snovi pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 50 °C). Primera se nanašata na posamezno meritev.	35
Slika 20:	Označeni in odloženi stiskanci po opravljenih meritvah	36
Slika 21:	Grafični prikaz Jonesovega modelnega parametra k_1 v odvisnosti od vlažnosti in temperature	42
Slika 22:	Grafični prikaz Jonesovega modelnega parametra k_2 v odvisnosti od vlažnosti in temperature	43
Slika 23:	Grafični prikaz Pelegovega modelnega parametra k_3 v odvisnosti od vlažnosti in temperature	43
Slika 24:	Grafični prikaz Pelegovega modelnega parametra k_4 v odvisnosti od vlažnosti in temperature	44
Slika 25:	Normirane napetosti, dosežene v stiskancu tik pred začetkom sproščanja. Normirane vrednosti so bile dobljene s pomočjo postopka, ki upošteva Jonesov model stiskanja, in so prikazane kot povprečje treh meritev pri enaki vlažnosti in temperaturi.	45

Slika 26: Normirane napetosti, dosežene v stiskancu ob izteku sproščanja. Normirane vrednosti so bile dobljene s pomočjo postopka, ki upošteva Pelegov model sproščanja napetosti v lesni masi, in so prikazane kot povprečje treh meritev pri enaki vlažnosti in temperaturi.....	46
Slika 27: Razlika med napetostmi pred sproščanjem in po njem. Normirane vrednosti so bile dobljene s pomočjo postopka, ki upošteva Jonesov model stiskanja in Pelegov model sproščanja napetosti v lesni masi. Prikazane so kot povprečje treh meritev pri enaki vlažnosti in temperaturi.	46
Slika 28: Spremembe med dolžino, na katero so bili stiskanci stisnjeni, in dolžino, na katero so se raztegnili, potem ko smo jih vzeli iz valja.	47
Slika 29: Prikaz stiskancev, izdelanih pri vlažnosti 27,4 % in temperaturah, višjih od 50 °C – ko smo jih potisnili iz stiskalne naprave, so se popolnoma razsuli.....	48
Slika 30: Primer stiskancev, izdelanih pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 60 °C – kažejo primerno kompaktnost oziroma trdnost.	48

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Energijska vrednost kuriv	8
Preglednica 2: Kurilnost lesa	9
Preglednica 3: Kurilnost lesa v odvisnosti od vlažnosti	10
Preglednica 4: Gostote svežega in zračno sušenega lesa	11
Preglednica 5: Ključni podatki za pelete in sekance	19
Preglednica 6: Lastnosti peletov in briketov po avstrijskem standardu ÖNORM M 7135 ..	24
Preglednica 7: Lastnosti sekancev po avstrijskem standardu ÖNORM M 7133	24
Preglednica 8: Primerjava standardov za lesne pelete	25
Preglednica 9: Pričakovane vlažnosti lesne mase, če so izpostavljene določeni klimi	28
Preglednica 10: Mase in dolžine stiskancev, potem ko so bili po stiskanju vzeti iz valja ..	39

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Grafična predstavitev meritev

1 UVOD

1.1 UVODNA OBRAZLOŽITEV

Lesna biomasa, kamor uvrščamo les in lesne ostanke, sodi med obnovljive vire energije. Les je bil že od nekdaj najpomembnejše kurivo, vendar se je s pojavom fosilnih goriv zanimanje zanj zmanjšalo. Zaradi vse večjega onesnaževanja okolja, nastanka tople grede, omejenih količin fosilnih goriv in odvisnosti od političnih razmer, pa zadnje čase les spet pridobiva pomembno vlogo pri pridobivanju energije.

Samo spoznanje, da je energijska raba lesa prijazna za okolje, pa ne bi prepričalo ljudi, naj les uporabljajo za pridobivanje toplotne energije, če ne bi bil hkrati dosežen tudi pomemben tehnološki napredek pri izdelavi in uporabi lesnih kuriv. Tako lahko danes naštejemo celo vrsto prednosti, ki jih ima raba lesne biomase, od gospodarskih, okoljevarstvenih, tehničnih in razvojno političnih.

V diplomski nalogi najprej prikažemo najpogostejše oblike lesne biomase za pridobivanje toplotne energije, to so lesna kuriva v obliki cepanic in polen, sekancev, peletov ter briketov. Opisujemo današnje tehnologije za izdelavo lesnih kuriv ter vpliv fizikalno kemičnih in bioloških lastnosti lesa na lesna kuriva in njihovo kurilno vrednost. Tehnologije za izdelavo lesnih kuriv se vse bolj izpopolnjujejo, kar na eni strani omogoča proizvodnjo standardiziranih kuriv in avtomatizacijo celotnega procesa, na drugi strani pa proizvodnjo visokokakovostnih kuriv z visoko kurilno vrednostjo. Gre predvsem za pelete, ki predstavljajo najkakovostnejše sodobno lesno kurivo, imenovano tudi oplemenitena lesna biomasa (Stritih in Butala, 2002). V praktičnem delu diplomske naloge smo izdelali stiskance in preučevali parametre, kot sta vlažnost lesne mase in temperatura med stiskanjem, ter njihovega vpliva na kakovost oziroma kompaktnost stiskancev.

1.2 OPREDELITEV PROBLEMA

Surovine za izdelavo lesnih kuriv so zelo različne, tako po obliki kot po fizikalno-kemičnih lastnostih, zato je treba tem značilnostim prilagoditi tudi tehnološke postopke izdelave. Od ustrezne izbire tehnologij pridobivanja lesnih kuriv je odvisna kakovost kuriva in ekonomičnost izrabe kuriva. Zanimalo nas je, kako vplivata na kompaktnost stiskancev vlažnost lesne mase in temperatura med njihovim stiskanjem.

1.3 CILJI IN HIPOTEZE

Osnovni cilj diplomske naloge je, da ugotovimo, kakšna je tehnološka zahtevnost izdelave različnih lesnih kuriv.

Preučevali smo tehnološke značilnosti lesnih kuriv, posebej **stiskancev**, z vidika vlažnosti **lesa** ter temperature in tlaka pri njihovi izdelavi. Predvidevamo, da temperatura in vlažnost vplivata na kompaktnost stiskancev.

1.4 METODE DELA

Pri izdelavi naloge smo uporabili dva različna pristopa. Iz objavljenih dognanj in rezultatov raziskav smo analizirali obstoječe tehnologije in značilnosti surovin, ki so

primerne za proizvodnjo lesnih kuriv. Zatem smo v laboratorijskem okolju izdelali serijo stiskancev in ob tem preučevali njihovo kakovost in obnašanje.

Pri analiziranju obstoječih tehnologij smo sistematično obdelali znane, na spletu dostopne tehnologije, kot so izdelava, sušenje, skladiščenje in transport najpogostejših lesnih kuriv.

Ker je vhodna surovina za vsa lesna kuriva les in lesni ostanki, smo analizirali tudi lastnosti lesa z vidika vsebnosti vode oziroma vlažnosti lesa, gostote in ohranjenosti lesa.

Za preverjanje lastnosti lesnih kuriv smo izdelali stiskance. V ta namen smo v laboratoriju izdelali stiskalno napravo z batom in grelnim telesom. Stiskali smo žagovino bukovine, ki je bila uravnovešena na različno stopnjo vlažnosti. S pomočjo računalniškega programa so bili izmerjeni tlaki pri stiskanju in nato napetosti sproščanja po končanem postopku stiskanja.

2 SPLOŠNI DEL

Lesno kurivo je skupno ime za različne oblike kuriva iz lesa za pridobivanje energije. Ko govorimo o učinkoviti rabi lesne biomase v energijske namene, govorimo o učinkoviti in sodobni rabi vseh oblik lesa za ogrevanje in segrevanje sanitarne vode ter za pridobivanje elektrike.

Z okoljevarstvenega vidika morajo države, zaradi strogih ekoloških predpisov, težiti k zmanjšanju emisij v zrak, z ekonomskega vidika pa k temu, da se čim več investira v izpopolnjevanje tehnologij za pripravo lesnih kuriv, predvsem v tehnologijo drobljenja lesa in sušenja kuriv, ker se s tem povečuje izkoristek energije, pridobljene iz lesa.

Od ustrezne izbire tehnologije za izdelavo lesnega kuriva sta odvisni kakovost kuriva in tudi ekonomičnost izdelave. Za učinkovito energijsko izrabo lesne biomase je zelo pomembna pravilna priprava kuriva. Zopet pa je pravilna priprava lesnih kuriv odvisna od vrste kuriva, le-ta pa je pogojena z značilnostmi vhodnih surovin za izdelavo lesnih kuriv. Vse surovine niso primerne za vse vrste lesnih kuriv, saj njihove fizikalno-kemične lastnosti, vlažnost in ohranjenost narekujejo vrsto kuriva. Oblika lesnega kuriva vpliva z vsemi svojimi značilnostmi tudi na proces sušenja, skladiščenja, transport in vrsto kurilne naprave.

Najbolj tradicionalno lesno kurivo, ki se za pridobivanje toplotne energije uporablja še danes, so polena in cepanice. Tehnološko predelano kurivo so sekanci, ki predstavljajo razsekane kose lesa, medtem ko so najsodobnejše in tehnološko najbolj predelano lesno kurivo stiskanci v obliki briketov in peletov.

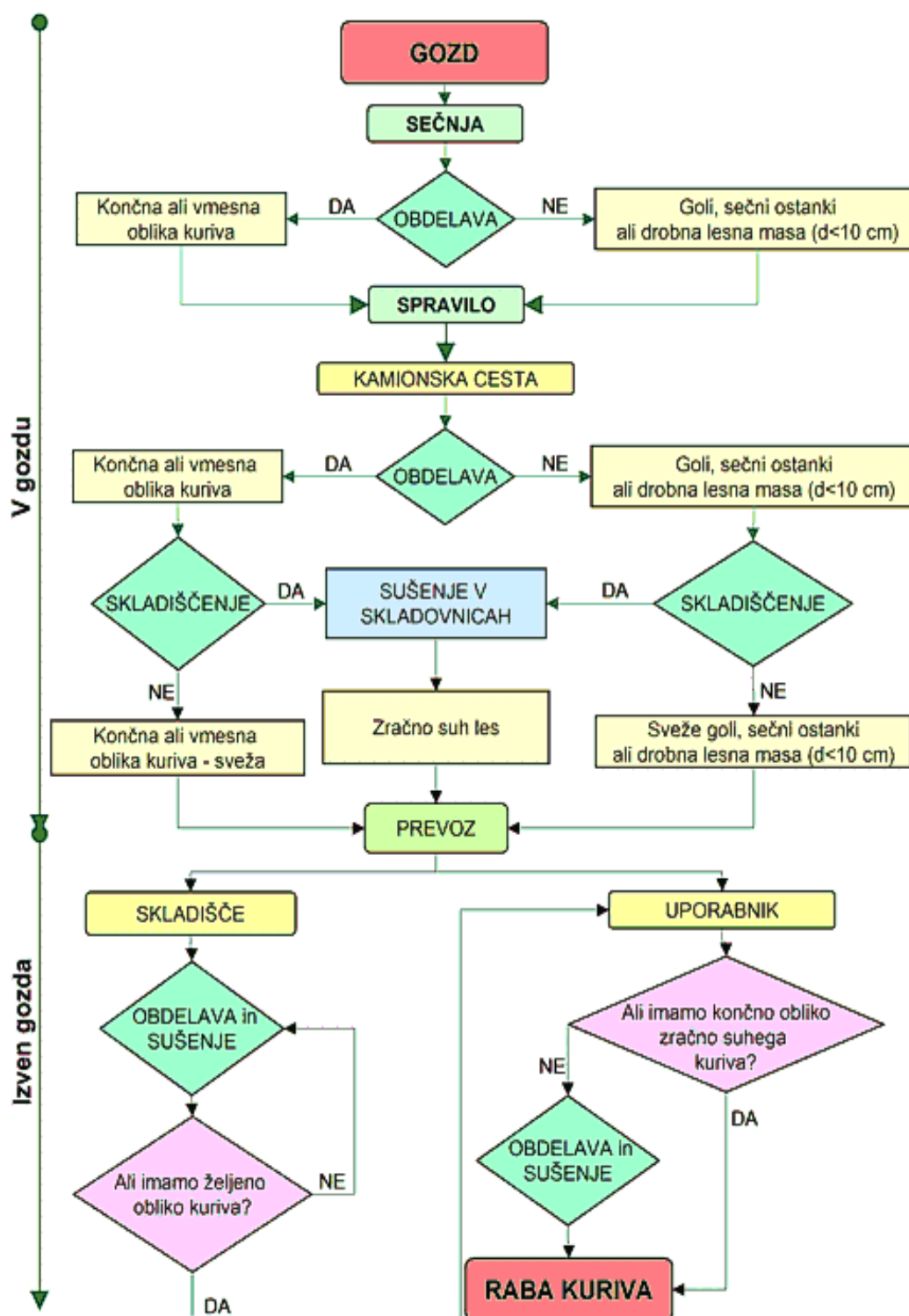
Na sliki 1 je prikazana osnovna shema tehnologij za pridobivanje in izdelavo lesnih kuriv (Krajnc, 2003).

2.1 VRSTE LESNIH KURIV IN SUROVINE ZA NJIHOVO IZDELAVO

Les se uporablja v zelo različnih oblikah, od tradicionalnih polen do sekancev in različnih oblik stiskancev. Lesna kuriva se delijo glede na velikost, od tega pa so odvisni način priprave, skladiščenje, transport in naprave za kurjenje. Marutzky in Seeger (1999) delita lesna kuriva na večji kosovni les, kamor prištevata metrski les, polena in brikete. Med srednje kosovni les prištevata sekance in pelete, medtem ko oblance, žagovino in lesni prah prištevata med drobni material. To delitev opravičujeta kot smiselno, ker določa način skladiščenja, transporta in vrsto kurilne naprave.

Po Katalogu produktov lesne biomase (2005) se lesna kuriva uporabljajo v obliki:

- okroglic,
- cepanic,
- polen,
- sekancev,
- žagovine in
- stiskancev (briketi in peleti).



Slika 1: Osnovna shema tehnologije priprave lesnega kuriva (Krajnc, 2003)

Okroglice so 1 m dolga polena s premerom **približno** 10 cm, ki se pridobivajo iz drobnejšega okroglega lesa slabše kakovosti.

Cepanice so 1 m dolga polena s premerom **približno** 10 cm, ki se pridobivajo s cepljenjem okroglega lesa slabše kakovosti. Tako kot pri polenih se tudi pri cepanicah uporablja sveži les, gozdno suh les in zračno suh les.

Polena so razžagani in razcepljeni kosi lesa, dolgi od 30 do 50 cm, ki se pridobivajo neposredno iz okroglega lesa slabše kakovosti. Uporablja se sveži les, ki ima vlažnost nad 40 %, gozdno suh les, ki ima vlažnost med 20 in 40 %, in zračno suh les, ki ima vlažnost do 20 %.

Med sodobnejše in tehnološko naprednejše obdelana lesna kuriva prištevamo sekance ter brikete in pelete. Sekanci so lesno kurivo, ki nastane z drobljenjem različnih vrst lesa. Veliki so do 10 cm, njihova kakovost pa je odvisna od kakovosti vhodne surovine in tehnologije drobljenja. Običajno se sekanci izdelujejo iz drobnega lesa, lesa slabše kakovosti ali iz lesnih ostankov.

Briketi so standardizirano lesno kurivo. Narejeni so s stiskanjem lubja, suhega lesnega prahu, žagovine, oblancev ter drugih lesnih ostankov. Najpogostejše so valjaste oblike premera od 20 do 120 mm in dolžine do 400 mm (slika 2).



Slika 2: Briketi



Slika 3: Peleti

Tudi peleti so standardizirano lesno kurivo. Narejeni so s stiskanjem suhega lesnega prahu, žagovine, oblancev ter drugih lesnih ostankov. So valjaste oblike premera od 4 do 20 mm in dolžine do 100 mm (slika 3).

Surovine za izdelavo lesnih kuriv oziroma viri lesne biomase v Sloveniji so (Krajnc in Kovač, 2003):

gozd:

- redna sečnja (asortimenti slabše **kakovosti**),
- sečni ostanki (vejevja, vrhovi, vendar ne tanjši od 5 cm premera),
- redčenja (drobni assortimenti),
- premene,
- sanitarne sečnje;

kmetijske in urbane površine:

- krčitve grmišč,
- obnove sadovnjakov in vinogradov,
- vzdrževanje parkov in zelenic,
- čiščenje pašnikov,
- gradnja objektov;

lesni ostanki:

- primarna predelava lesa (krajniki, žamanje, očelki, žaganje),
- sekundarna predelava lesa (lesni prah, oblanci),
- lubje;

odpadni in odsluženi les:

- lesna embalaža,
- gradbeni les,
- pohištvo in
- odpadki na komunalnih odlagališčih.

Slovenija ima velike naravne možnosti za pridobivanje in izkoriščanje lesne biomase, saj ima po podatkih Zavoda za gozdove iz leta 2006 kar 57,7 % ozemlja poraščenega z gozdovi. Za pridobivanje energije iz lesa izkoriščamo v Sloveniji predvsem lesne ostanke iz gozdov in lesne ostanke iz lesnopredelovalnih industrij. Uporaba lesne biomase se tudi v Sloveniji iz leta v leto povečuje, pri tem pa ima vse pomembnejšo vlogo država, ki bo morala z ugodnimi krediti vzpodbujati ne le gojitvene ukrepe v mladih gozdovih, kjer je vir lesne biomase, ampak tudi uporabnike pri investicijah v sodobne kurilne naprave.

2.2 LASTNOSTI LESA KOT KURIVA

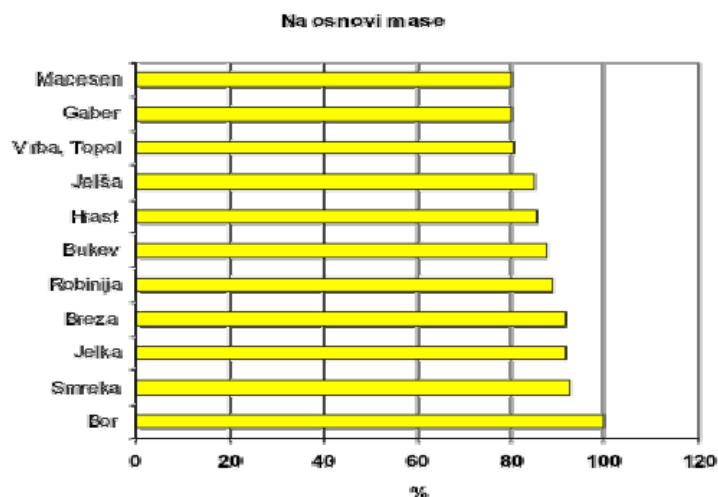
Učinkovitost sistemov za proizvodnjo energije je v precejšni meri odvisna od lastnosti lesa kot kuriva. Les ima različne lastnosti. Z vidika kurilne vrednosti lesa so pomembne fizikalne in fizikalno-kemične lastnosti lesa. Med fizikalnimi lastnostmi lesa sta najpomembnejši gostota lesa in vlažnost lesa, med fizikalno-kemičnimi lastnostmi lesa pa je najpomembnejša gorljivost oziroma kurilna vrednost lesa. Dejavniki, ki v največji meri vplivajo na kurilno vrednost lesa, so gostota in vlažnost lesa, pomembni pa sta tudi kemična sestava in ohranjenost lesa.

2.2.1 Kurilna vrednost lesnih kuriv in njihova energijska učinkovitost

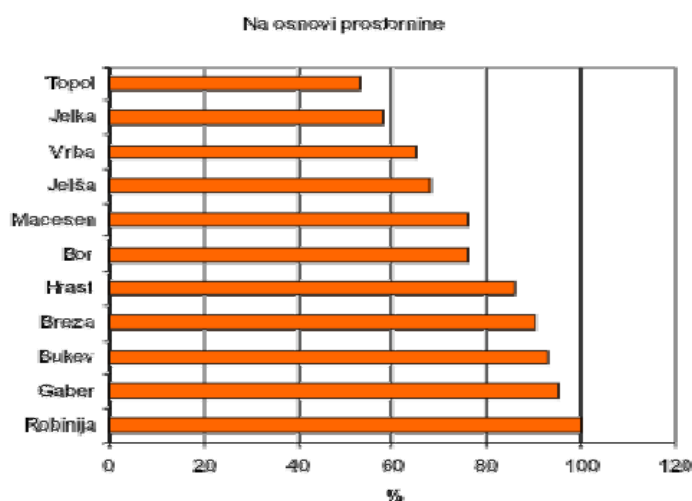
Energijska vrednost je količina energije na enoto mase ali prostornine, ki se sprosti pri popolnem zgorevanju (Turk in sodelavci, 2006). Vsako kurivo ima določeno energijsko vrednost.

Na slikah 4 in 5 ter v preglednici 1 vidimo primerjave energijskih vrednosti lesnih kuriv. Sliki 4 in 5 prikazujeta energijsko vrednost različnih drevesnih vrst glede na maso in prostornino. Pri enaki masi ima npr. bukev okrog 15 % nižjo kurilno vrednost od bora. Če pa primerjamo kurilno vrednost drevesnih vrst na osnovi prostornine, ugotovimo, da ima npr. bukev okrog 15 % višjo kurilno vrednost od bora. Preglednica 3 prikazuje energijsko vrednost lesnih kuriv v primerjavi s kurilnim oljem, premogom in zemeljskim plinom, ki ima od vseh navedenih klasičnih kuriv največjo kurilno vrednost.

Kurilna vrednost je količina toplote, ki jo vsebuje masna ali prostorninska enota pri določeni vsebnosti vode. Izražena je v kWh/kg, MJ/kg, kWh/m³ ali MJ/m³. Kurilnost pa je količina toplote, ki nastane pri popolnem zgorevanju enote goriva, pri čemer se produkti zgorevanja ne ohladijo pod temperaturo rosišča vodne pare (Kopše in Krajnc, 2005).



Slika 4: Primerjava energijskih vrednosti drevesnih vrst na osnovi mase – osnova je energijska vrednost bora (Grum, 2006)



Slika 5: Primerjava energijskih vrednosti drevesnih vrst na osnovi prostornine – osnova je energijska vrednost robinije (Grum, 2006)

Različne drevesne vrste se med seboj razlikujejo po različni kurilni vrednosti. Les z večjo gostoto ima višjo kurilno vrednost od lesa z nižjo gostoto. Glede na maso imajo največjo kurilno vrednost iglavci, glede na prostornino pa listavci. Zato je za ogrevanje primeren les listavcev, ki ima večjo gostoto in zato višjo kurilno vrednost na m³, saj listavci zgorevajo počasneje in imajo več žerjavice. Za kuhanje pa je primernejši les iglavcev, ki ima višjo kurilno vrednost na kg, ker les iglavcev zgoreva hitreje in intenzivneje. Trohneč les ima manjšo gostoto in s tem tudi nižjo kurilno vrednost (Dolinšek in sod., 1999).

Preglednica 1: Energijska vrednost kuriv (Senegačnik in Oman, 2005)

Vrsta kuriva	Energijska vrednost MJ/kg
sveži, moker les	8
zračno suh les	16
kurilno olje	42
zemeljski plin	49
lignit, rjavi premog	10 - 25

2.2.2 Vlažnost lesa in vsebnost vode v lesu

Rast drevesa je odvisna od vode, ki v zunanjem delu beljave prenaša rudninske snovi iz korenin do listov. Voda je pomembna za proces fotosinteze in za vzdrževanje življenjskih funkcij drevesa. Količina vode v drevesu pa ni enakomerno razporejena. Največ vode je v zunanjem delu beljave, proti jedru pa upada. V lesu ločimo prosto ali kapilarno vodo, ki se v obliki kapljevine nahaja v porah oziroma lumnih, in vezano ali higroskopsko vodo, ki se nahaja v celičnih stenah. Proste ali kapilarne voda je največ v **rastočem** lesu in lesu takoj po sečnji. Količina te vode se med letom spreminja, saj je vlažnost lesa najnižja pozimi, najvišja pa spomladi in zgodaj poleti. Stanje, ko pore ne vsebujejo več proste vode, v celičnih stenah pa se nahaja še vsa vezana voda, imenujemo točko nasičenosti celičnih sten. Lesna vlažnost pri točki nasičenosti celičnih sten niha med 22 in 35 %. Pri sušenju najprej izhlapi prosta voda, s tem postane les lažji, nato pa pride do izhlapevanja vezane vode, kar ima za posledico, da les začne spreminjati dimenzijo.

Vlažnost lesa je fizikalna lastnost lesa, ki vpliva na njegovo kurilno vrednost. Vlažnost lesa izračunamo kot razmerje med maso vode in maso lesa v absolutno suhem stanju. Vsebnost vode v lesu in vlažnost lesa pa sta različno **definirani**. Vsebnost vode v lesu je definirana z razmerjem med maso vode in skupno maso lesa in vode, medtem ko je vlažnost lesa razmerje med maso vode in maso popolnoma suhega lesa. Preglednica 2 (Butala in Turk, 1998) prikazuje, kakšno je razmerje med vsebnostjo vode in vlažnostjo lesa pri določeni kurilni vrednosti lesa. Kurilna vrednost lesa se namreč z zmanjševanjem vsebnosti vode povečuje.

Vlažnost lesa u (v %) izračunamo po formuli: $u = \frac{m_{vode}}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_{vl} - m_0}{m_0} \cdot 100$ (%), (1)

pri čemer je: u – vlažnost lesa (%),

m_{vode} – masa vode v lesu (kg),

m_0 – masa absolutno suhega lesa (kg) in

m_{vl} – masa vlažnega lesa.

Vsebnost vode x (v %) v lesu je določena glede na maso vlažnega lesa:

$$x = \frac{m_{vode}}{m_{vl}} \cdot 100 = \frac{m_{vl} - m_0}{m_{vl}} \cdot 100$$
 (%) (2)

V procesu zgorevanja lesa voda izhlapeva, pri tem pa se porablja energija. Čim več je vode v lesu, tem več energije se porabi za njeno izhlapevanje, zato je ostane manj za ogrevanje. Vsakih 10 % vode zmanjšuje kurilno vrednost lesa za 12 %. Za izhlapevanje 1 kg vode je potrebnih 0,68 kWh energije. Če kurimo gozdno suh les, porabimo za izhlapevanje vode četrtno energije, uskladiščene v lesu. Če pa uporabljamo vlažen les, se poraba energije poveča za 20 do 30 % in s tem stroški ogrevanja. Če je vsebnost vode v lesu višja od 25 %, se lahko pojavi plesen, ki povzroči gnitje lesa. Pri tem se energijska vrednost suhe mase lesa zmanjšuje, raste pa delež prahu.

Preglednica 2: Kurilnost lesa (Butala in Turk, 1998)

Vsebnost vode [%]	Vlažnost lesa [%]	Kurilnost [kJ/kg]
61,5	160	5880
54,6	120	7350
50,0	100	8400
43,5	80	9660
37,6	60	10920
33,3	50	11970
23,0	30	14070
17,0	20	15540
9,8	10	16800

Glede na vsebnost vode v lesu ločimo (Katalog produktov ..., 2005):

- sveži les – les takoj po poseku, ki ima vlažnost nad 40 %,
- gozdno suh les – les pol leta po poseku v primeru zimske sečnje oziroma štiri mesece po poseku v primeru letne sečnje, ki ima vlažnost od 20 do 40 %,
- zračno suh les – 6 mesecev sušen les na zračnem in pokritem mestu, ki ima vlažnost do 20 %,
- tehnično suh les – umetno sušen les, ki ima vlažnost od 6 do 15 % .

Kolikšna je kurilna vrednost posameznih naštetih vrst lesa, prikazuje preglednica 3.

2.2.3 Gostota in kemična sestava lesa

Gostota lesa pri določeni vlažnosti je razmerje med maso in volumnom lesa. Izračunamo jo

po formuli: $\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$, (3)

pri čemer je: ρ_u – gostota lesa pri vlažnosti u (kg/ m³),

m_u – masa lesa pri vlažnosti u (kg),

V_u – prostornina lesa pri vlažnosti u (m³).

Enota za gostoto je kg/m³ ali g/cm³, pretvornik pa je 1g/cm³ = 1000 kg/m³.

Preglednica 3: Kurilnost lesa v odvisnosti od vlažnosti (Katalog produktov ..., 2005)

Sušen les	Vsebnost vlage [%]	Kurilnost [kWh/kg]
Popolnoma suh les	0	5,2
Les sušen v zaprtem prostoru	8	4,7
Zračno suh, sušen zunaj več let in pokrit	15	4,3
Sušen v gozdu, nepokrit, sušen več kot 6 mesecev	30	3,4
Sveži les	40 – 60	2,8 – 1,6

Različna gostota in kemična sestava drevesnih vrst in delov lesa vplivata na kurilno vrednost lesa. Gostota lesa je odvisna od velikosti celic, debeline celičnih sten in deleža tkiv. Z naraščanjem vlažnosti lesa se masa lesa povečuje bolj kot prostornina, zato gostota lesa z naraščanjem vlažnosti narašča, kot to prikazuje preglednica 4. Nad točko nasičenosti celičnih sten je naraščanje gostote še hitrejše, ker les ne nabreka več. Po Katalogu produktov (2005) se les glede na gostoto razvršča v naslednje skupine:

- les trdih listavcev (hrast, bukev, robinija, gaber, jesen, brest, javor),
- les mehkih listavcev (breza, lipa, jelša, vrba, topol),
- les iglavcev (smreka, jelka, bor, macesen) in
- mešan les (trdi listavci, mehki listavci, iglavci).

Različne drevesne vrste imajo tudi različno kemično sestavo. V lesu je približno 50 % ogljika, 43 % kisika, 6 % vodika in 1 % dušika in drugih elementov. Les je zelo kompleksna snov, ki vsebuje tudi veliko različnih spojin: celulozo (med 40 in 50 %), polioze (med 25 in 35 %), lignin (med 20 in 30 %), pektine, tanine, terpenske derivate, kot so eterična olja, smole, alkaloidi, barvila in pepel (Polanc in Leban, 2004). Kemični elementi, ki so v lesu, imajo različno kurilno vrednost in ker je kemična sestava različnih vrst lesa različna, je tudi kurilna vrednost različnih vrst lesa različna. Ker ima lignin višjo kurilno vrednost od celuloze, je kurilna vrednost iglavcev, ki imajo več lignina, višja kot pri listavcih. Mineralne snovi ostanejo pri gorenju lesa kot pepel.

2.2.4 Ohranjenost lesa

Les je organska snov, zato je izpostavljen razpadanju. Razgradnjo povzročajo vremenski, toplotni in kemični dejavniki, kakor tudi številni živi organizmi, ki jim les predstavlja vir hrane in bivališče. Razkroj lesa z mikroorganizmi lahko poteka le pri določeni vlažnosti

(30 do 70 %) in temperaturi (15 do 30 °C), kar pomeni, da so pogoji za biološko razgradnjo lesa omejeni.

Preglednica 4: **Gostote svežega in zračno sušenega lesa** (Kopše in Krajnc, 2005, po Wagenführ, 1996)

Drevesna vrsta	Sveži les	Zračno suh les
	kg/m ³	kg/m ³
Smreka	960 (beljava), 520 (jedrovina)	470
Bor	980 (beljava), 550 (jedrovina)	520
Jelka	980 (beljava), 510 (jedrovina)	450
Bukev	1060	720
Gaber	970	830
Hrast	1000	700
Kostanj	900	570
Topol		450

Ohranjenost lesa bistveno vpliva na kurilno vrednost lesnih kuriv. Trohneč les ima manjšo gostoto in s tem tudi manjšo kurilno vrednost. Zato je za kvalitetno lesno kurivo pomembna tehnologija sušenja in skladiščenja lesa. Na ohranjenost lesa pa vplivajo tudi zunanji dejavniki kot so teren, kjer les raste, zračnost in propustnost svetlobe ter zdrava zasnova lesne vrste.

Zaradi novejših tehnologij in vrst lesnih kuriv, ki za vhodne surovine ne zahtevajo prvovrsten les, temveč les slabše kakovosti in lesne ostanke v lesno predelovalni industriji, slab les v povprečju ne zmanjšuje kurilne vrednosti lesa. Postopki drobljenja, mletja, stiskanja in sušenja namreč odpravijo negativne učinke lesa slabše kakovosti. Seveda pa mora biti les še vedno v takšnem stanju in s takšnimi fizikalno-kemičnimi lastnostmi, da omogoča industrijsko predelavo. Trohneč les vseh teh lastnosti nima, zato je z vidika kakovosti lesnih kuriv manj primeren za industrijsko predelavo.

S pravilnim sušenjem in skladiščenjem lesa ohranimo čvrstost lesa, s tem pa podaljšamo njegovo uporabnost in ohranjamo njegovo kurilno vrednost. Zato je tehnologija sušenja in skladiščenja za lesna kuriva zelo pomembna.

2.3 TEHNOLOGIJE PRIPRAVE LESNIH KURIV

Čeprav se srečujemo z množico različnih lesnih kuriv, ki smo jih že našli, pa temeljijo tehnologije za njihovo izdelavo in uporabo na podobnem zaporedju. Gre za pripravo materiala, izdelavo kuriv, njihov transport, skladiščenje in sušenje, na koncu pa še kurjenje v ustreznih kuriščih. V naslednjih podpoglavjih bomo na kratko pregledali glavne

tehnološke značilnosti danes najbolj uporabnih lesnih kuriv, posebej pa se bomo osredotočili na naj sodobnejše vrste kuriv, kot so peleti in briketi.

2.3.1 Tehnologije za pripravo polen in cepanic

Polena in cepanice so staro, povsem naravno lesno kurivo. Tehnologije izdelave polen in cepanic se precej razlikujejo od izdelave sodobnih oblik lesnih kuriv, saj zaradi lažjega transporta in končne uporabe spremenijo le dimenzijo. Merska enota pri polenih in cepanicah je prostorninski meter (prm). To je količina lesa, ki napolni 1m³ prostora z zračnimi medprostori.

Tehnologije priprave polen in cepanic zajemajo:

- sečnjo in spravilo lesa,
- izdelavo polen in cepanic,
- transport, skladiščenje in sušenje ter
- rabo kuriv.

2.3.1.1 Sečnja in spravilo

Polena in cepanice so tradicionalno lesno kurivo, katerih priprava je fizično najtežja in tudi najbolj nevarna. Priprava lahko poteka le v gozdu, kjer se posekajo drevesa, medtem ko izdelava lahko poteka na bolj prijaznem in varnem terenu. Obstaja več načinov sečnje dreves, vendar je v novejšem času tudi na tem področju prišlo do tehnološkega napredka, čeprav še vedno obstajajo določena dela v gozdu, ki jih je zaradi terena možno opraviti le ročno.

Priprava polen in cepanic zajema sečnjo dreves, žaganje goli, cepljenje ter zlaganje v skladovnice. Pri tradicionalnem načinu priprave polen žagamo goli z motorno žago, medtem ko se strojna sečnja lesa izvaja s tako imenovanimi harvesterji, ki so lahko izvedeni kot dva, tri ali štiri osni zgibni kolesniki ali goseničarji. V obeh primerih je stroj opremljen s hidravličnim dvigalom, na dvigalu pa je nameščena glava za sečnjo in obdelavo lesa, ki drevo v celoti obdelava in hkrati razžaga na željeno dolžino (Kovač, 2006).

2.3.1.2 Izdelava polen in cepanic

Cepanice nastanejo s cepljenjem 1 m dolgih goli na toliko delov, da je premer cepanice okrog 10 cm. Goli žagamo z motorno žago, cepljenje pa lahko opravimo ročno ali s hidravličnim cepilnikom. Rezalno cepilni stroji predstavljajo bistven napredek v tehnologiji izdelave polen in cepanic, saj je delo popolnoma avtomatizirano.

Polena nastanejo z razpolavljanjem metrskega lesa ali z rezanjem na tretjine oziroma četrtine, odvisno od kurišča. Tudi na tem področju so se tehnologije izpopolnile, predvsem pa je delo lažje in manj nevarno. Na trgu se namreč pojavljajo različni stroji za izdelavo polen in rezalno-cepilni stroji, s katerimi se iz goli izdelujejo polena želenih dimenzij.

Rezalno cepilni stroji oziroma stroji za izdelavo polen in cepanic imajo lahko lasten pogon ali pa so izdelani kot traktorski priključek.

2.3.1.3 Transport, skladiščenje in sušenje cepanic ter polen

Za prevoz lesa lahko uporabljamo različna transportna sredstva. Prevoz lesa se lahko začne že na gozdni vlaki, če se izdelana polena in cepanice na traktorsko prikolico nalagajo ročno. V teh primerih transport do gozdne ceste poteka v obliki spravila lesa ali kot transport do končnega porabnika. Slaba stran tega transporta je v težkem ročnem nalaganju lesa na traktorsko prikolico. Bolj enostaven je prevoz s kamionom, kjer teren to omogoča, saj voznik tovornjaka sam s hidravličnim dvigalom naloži les.

Pravilno sušenje in skladiščenje lesa vpliva na vsebnost vode v lesu in na ohranjenost lesa, to pa vpliva na kurilno vrednost lesa. Ker sveži les vsebuje nad 40 % vlage, ga je treba pred kurjenjem primerno skladiščiti, da vlaga izhlapi. Po enem oziroma dveh letih doseže skladiščen les stanje, ko rečemo, da je zračno suh. Takrat je vlažnost lesa med 15 in 20 %.

Cepanice se zložijo v skladovnice, ki morajo biti na odprtem, sončnem in rahlo nagnjenem terenu. Zaradi lažjega nalaganja in transporta je priporočljivo, da cepanice po izdelavi zložimo na kovinske konzole, oblikovane v polkrog, ki se z jeklenimi trakovi zvežejo v butare.

Izdelana polena se zložijo ali nasujejo v zračne drvarnice oziroma druge pokrite prostore. Ker so polena manjši kosi lesa, se tudi hitreje sušijo. Polena, izdelana iz goli zimske sečnje in pravilno skladiščena, imajo ob naslednji kurilni sezoni med 20 in 30 % vlage. Za doseganje dobre kakovosti je potrebno, da se polena dve leti skladiščijo v suhem prostoru, s čimer se zniža vsebnost vode pod 20 %.

2.3.1.4 Kurilne naprave

Zgorevanje lesa je fizikalno-kemični proces spajanja gorljivih sestavin lesa s kisikom iz zraka, pri katerem se sprošča toplota. Če zgorevanje ni popolno, se v ozračje sprošča mnogo več škodljivih plinov kot pri popolnem izgorevanju. Kurilne naprave za polena in cepanice so prilagojene njihovim značilnostim in procesu zgorevanja lesna.

Tehnične značilnosti sodobnih kotlov na polena, so:

- prisilni vlek zraka s pomočjo ventilatorja,
- dovajanje zgorevalnega zraka je ločeno za primarni in za sekundarni zrak,
- imajo lambda-sondo, ki meri preostanek kisika v dimnih plinih,
- imajo večji zalogovnik in podaljšan čas vzdrževanja žerjavnice tudi do 20 ur dnevno, kar omogoča enkrat dnevno polnjenje pri 50-odstotni obremenitvi kotla,
- imajo dobro toplotno izolacijo, s tem pa manjše toplotne izgube kotla v mirovanju,
- zgorevanje je popolnejše, zato se količina pepela zmanjša na približno 5 %.

2.3.2 Tehnologije za pripravo lesnih sekancev

Sekanci so kosi sekanega lesa, veliki do 10 cm. Kakovost sekancev je odvisna od kakovosti vhodne surovine in tehnologije drobljenja. Merska enota pri sekancih je nasuti meter (nm^3). En nasuti meter tehta od 200 do 300 kg, odvisno od vrste lesa, velikosti in homogenosti kosov ter **vlažnosti oziroma vsebnosti vode v lesu.**

Tehnologije priprave lesnih sekancev se povezujejo z naslednjimi fazami:

- izdelavo lesnih sekancev,

- transportom, skladiščenjem in sušenjem
- kurjenjem v posebnih kotlih za lesne sekance.

2.3.2.1 Izdelava lesnih sekancev

Sekance običajno izdelujemo iz lesa slabše kakovosti ali iz lesnih ostankov. Kakovost sekancev je odvisna od kakovosti vhodne surovine in tehnologije drobljenja. Visokokakovostne sekance lahko pridobivamo le iz ustrezne surovine. Če se za sekance uporablja okrogli les, je priporočljivo, da je minimalni premer tega lesa 5 cm.

Sekanci se med seboj razlikujejo po velikosti, po vsebnosti vode in po vhodni surovini oziroma drevesni vrsti. Glede na navedene lastnosti imajo sekanci različno kurilno vrednost. Kljub izmerjeni vlažnosti je sekancem težko določiti energijsko vrednost. Kot merilo za določanje energijske vrednosti se zato uporablja atro teža. To je teža absolutno suhega lesa, s pomočjo katerega se določi energijska vrednost sekancev brez ugotavljanja drevesne vrste. Iz atro kilograma (kilogram absolutno suhega lesa) vseh drevesnih vrst se lahko pridobi enaka količina energije, to je 5,2 kWh/kg ali 19 MJ/kg. Zaradi vsebnosti smol odstopajo te vrednosti za 5 % navzgor le pri iglavcih (Kovač, 2006).

Velikost sekancev se prilagaja kurilni napravi. Po Katalogu produktov (2005) se lesni sekanci delijo v tri skupine:

- G30, pri katerih prečni prerez posameznih kosov lesa ne sme biti večji od 3 cm², dolžina pa ne večja od 8,5 cm;
- G50, pri katerih prečni prerez posameznih kosov lesa ne sme biti večji od 5 cm², dolžina pa ne večja od 12 cm;
- G100, pri katerih prečni prerez posameznih kosov lesa ne sme biti večji od 10 cm², dolžina pa ne večja od 25 cm.

Obstaja več vrst sekalnikov za izdelavo sekancev, ki se razlikujejo po kapaciteti in zmogljivosti. Sekalniki imajo tudi različne načine izvedbe rezil. Spreminja se lahko število rezil, vrtilna hitrost motorja z rezili in razdalja med rezili. Sekalniki se običajno delijo na:

- lahke,
- srednje velike in
- težke sekalnike.

Glede na funkcijsko izvedbo Marutzy in Seeger (1999) delita sekalnike na:

- kolutne oziroma diskaste sekalnike,
- bobenske ali rotorske sekalnike in
- sekalnike s polžem.

Marutzy in Seeger (1999) nadalje ugotavljata, da je v primeru že uporabljenega lesa pred sekanjem priporočljivo uporabiti še drobilnik. Ta stroj grobo nalomi les na 500 mm dolge kose in predela od 10 do 15 ton na uro. Za drobilnikom se lahko uporabi še udarni mlin, ki s kovinskim kladivom drobi lesni material. V primerjavi z bobenskim sekalnikom je manj občutljiv za kovinske tujke. Če pa se zahteva stopnja drobljenja delcev, manjših od 5 mm, se dodatno uporabi še naprava za fino mletje lesa, ki ima od 30 do 50 nožičkov in mrežo z manjšimi luknjami.

2.3.2.2 Transport, skladiščenje in sušenje sekancev

V zvezi s pripravo in sušenjem sekancev obstajata dve možnosti. Možna je priprava svežih lesnih sekancev, ki se sušijo šele po izdelavi, ali pa se najprej sušijo vhodne surovine za sekance in se nato iz zračno suhega lesa naredijo sekanci. Najprimerneje in tudi iz ekonomskega vidika najučinkovitejše je naravno sušenje gozdnih ostankov v gozdu pred izdelavo sekancev. **Tehnično** sušenje zelenih sekancev se običajno ne izvaja, saj bi se pri tem porabilo okrog 33 % notranje energije goriva. Sušenje sekancev pri sodobnih kurilnih napravah ni več tako pomembno, ker ustrezna konstrukcija kurišča omogoča sušenje in učinkovito zgorevanje tudi pri povečani vlažnosti (npr. kurišče s pomično rešetko). Lesni sekanci z vlažnostjo 20 % (zračno suh les) so trajno obstojni. Sekanci z vsebnostjo vlage 30 % so delno obstojni, z vlažnostjo nad 30 % pa so neobstojni, ker strohnijo (Krajnc in Kopše, 2005).

Pri skladiščanju in rabi lesnih sekancev potrebujemo poleg kotla še zalogovnik za sekance ter polžast prenosni sistem za dovajanje sekancev v kotel. Zalogovnik mora biti suh in zračen, da se ohrani kakovost sekancev, njegova velikost pa takšna, da zadostuje za eno ali dvakratno polnjenje.

Marutzy in Seeger (1999) naštevata za različno gostoto lesnih kuriv celo vrsto možnih načinov skladiščenja. Med njimi naštevata skladiščenje s sistemom talnih predalov, ki je primerno za sušenje drobnega lesnega materiala. V pravokotnem silosu s predalčniki se lahko različni materiali nasujejo od 3 do 10 m visoko, širina posameznega predala pa je od 5 do 10 m. Dolžina skladišča je 20 do 25 m, kar pomeni skupaj do 2500 m³ skladiščnega prostora. Nadalje omenjata potujoča tla (*walking-floor*), ki so v mirovanju popolnoma ravna, ko pa se začne praznjenje skladišča, se vsaka druga od paralelno nameščenih kovinskih plošč dvigne in se začne pomikati proti izhodu, z njimi pa tudi lesni material, ki je nasut. Omenjata tudi silose, ki so 30 do 40 m visoki in imajo 12 do 15 m premera. Obstajala naj bi tudi tehnika mobilnega skladiščenja s transportnimi vsebniki, ki imajo vgrajen izhodni transportni sistem.

Prevoz sekancev se lahko začne že na sečišču, če se sekanci izdelujejo s strojem za sečnjo in sekalnikom ali zgibnim pol prikoličarjem, na katerem je nameščen sekalnik prikolico.

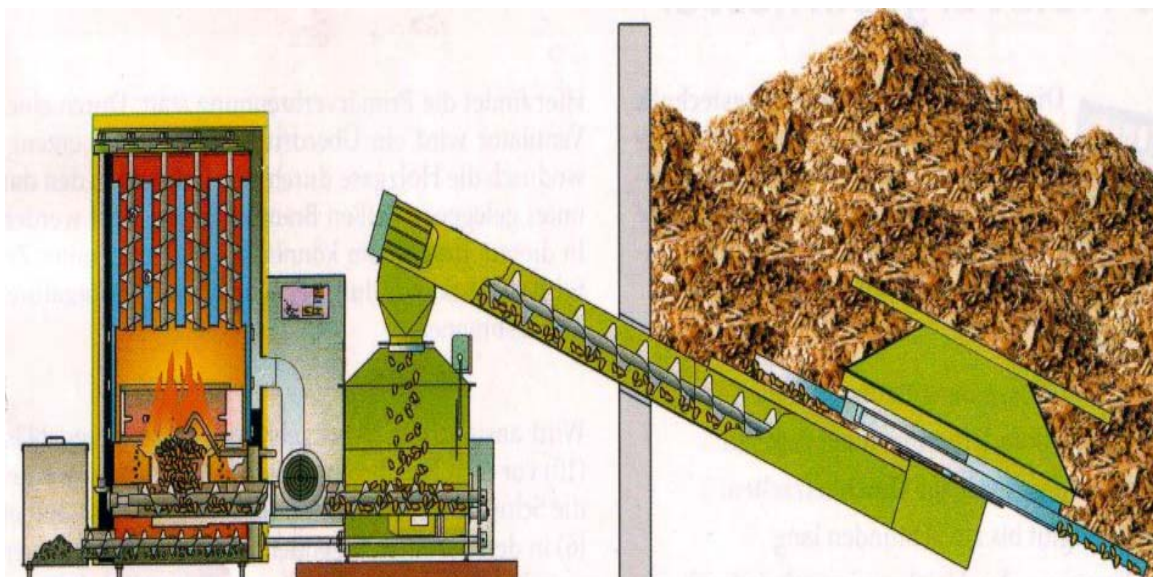
Za transport sekancev se uporabljajo posebna vozila, v tujini tudi s 70 m³ tovarnega prostora. Tuje izkušnje kažejo, da transport sekancev z manjšimi vozili ne povečuje ceno sekancev.

2.3.2.3 Kurilne naprave

Lesni sekanci se uporabljajo za avtomatizirano kurjenje v sodobnih kotlih, kjer sekanci gorijo v tako imenovani retortni zgorevalni komori. Sekance dovaja iz zalgovnika polž po cevi, ki je izvedena stopničasto, kot to vidimo na sliki 6.

Sekanci na poti do komore padajo prosto iz ene stopnje v drugo, s čimer se prepreči povratno gorenje sekancev, kotlovska naprava pa je opremljena tudi z varnostnim sistemom. Ventilator dovaja kontrolirano količino primarnega in sekundarnega zraka v komoro in tako regulira optimalno gorenje lesnih sekancev. Najnovejši sistemi delujejo z elektronsko regulacijo, ki nadzoruje tako zgorevanje kakor tudi razdelitev toplote. Standardna postaja tudi dodatna oprema za samodejni vžig, čiščenje toplotnega prenosnika

in iznos pepela. Tak sistem zahteva enakomerno velikost suhih lesnih sekancev (največ 35-odstotna vlažnost). Izkoristki kvalitetnih kotlov na sekance praviloma presegajo 90 %.



Slika 6: Kotel na lesne sekance z zalogovnikom in polžastim prenosom sekancev (Stroji in oprema ..., 2007)

2.3.3 Tehnologije za pripravo briketov

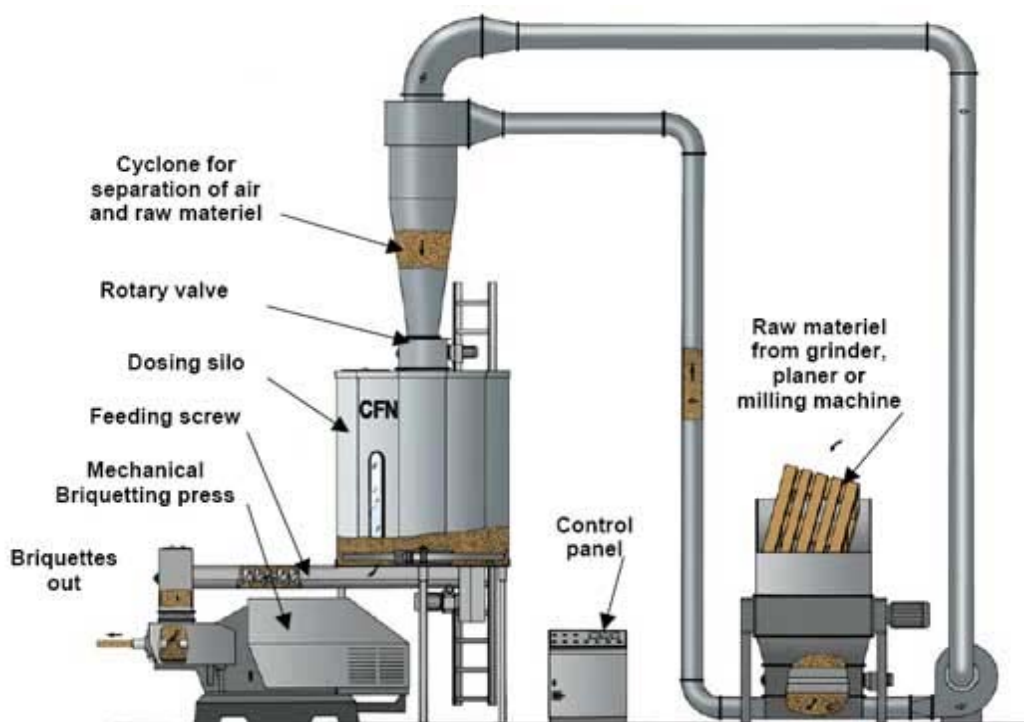
Lesni briketi so standardizirano ekološko kurivo z visoko kurilno vrednostjo, katerih izdelava je podobna izdelavi lesnih peletov.

Tehnologije priprave lesnih briketov zajemajo:

- priprava lesa ter
- transport, skladiščenje in sušenje.

2.3.3.1 Izdelava lesnih briketov

Izdelava lesnih briketov je podobna izdelavi lesnih peletov, saj je tehnologija podobna, le da so briketi stiskanci večjih dimenzij, premera od 20 do 120 mm ter dolžine do 400 mm. V postopku izdelave se uporabljata zgolj visok tlak in para. Izdelujejo se iz lubja, oblancev, žagovine in suhega lesnega prahu. Zaradi trdnosti se jim lahko dodaja od 1 do 3 % organskih dodatkov v obliki krompirjevega škroba in koruzne moke. Stroji za izdelavo lesnih briketov se imenujejo briketirke (slika 7). Od vrste ter kapacitete teh strojev je odvisna dimenzija in oblika briketov. Vhodni material za brikete mora imeti vlažnost manjšo kot 15 %, material pa se stiska s tlakom do 5000 kg/cm². Kurilna vrednost lesnih briketov znaša med 17,5 in 19,5 MJ/kg in je približno od 10 do 20 % večja od kurilne vrednosti zračno suhih polen (Marutzky in Seeger, 1999).



Slika 7: Strojna linija za izdelavo briketov (Stroji in oprema ..., 2007)

Napisi na sliki 7 so poslovenjeni, kot sledi:

1. Raw materiel from grinder, planer or milling machine – surovi material iz brusilnika, skobeljnika in mlina
2. Control panel – nadzorna plošča
3. Cyclone for separation of air and raw materiel – ločevanje surovega materiala in zraka
4. Rotary valve – krožni ventil
5. Dosing silo – dozirni silos
6. Feeding screw – podajalni polž
7. Mechanical briquetting press – briketirnik
8. Briquettes out – izhod briketov

2.3.3.2 Transport, skladiščenje in sušenje briketov

Sušenje briketov je podobno kot pri peletih. Za sušenje se uporabljajo tračni sušilniki, ki delujejo pri nizki sušilni temperaturi, in sicer na vходу pri 110 °C in na izhodu pri 70 °C.

Ker so briketi večjih dimenzij kot peleti in tudi manj sipki, skladiščenje v silosih ne pride v poštev. Briketi se zaradi sposobnosti vpijanja vlage ponavadi pakirajo v manjše ali večje bale, zavite v folijo. S tem so tudi že pripravljeni za transport.

Transport briketov od proizvajalca do končnega porabnika se običajno opravlja z avtomobili oziroma tovornjaki. Glede na namen uporabe brikete pakiramo v manjše, v folijo zavite pakete ali v večje zavoje, od tega pa je odvisen tudi način transporta. Omenili

smo že, da briketi niso primerni za avtomatizirane sisteme kurjenja, ker zaradi večje dimenzije niso tako sipki kot peleti. Njihov transport s cisterno ni mogoč.

2.3.3.3 Kurilne naprave

Briketi so zaradi svojih značilnosti primerni za kurjenje v kaminih in v pečeh na lesna kuriva, neprimerni pa za avtomatski sistem kurjenja, kot je uveljavljen za pelete. Ker pa imajo višjo kurilno vrednost od polen in cepanic, so z ekonomskega vidika primernejši. Za uporabnika so tudi bolj sprejemljivi, saj je njihova uporaba čista in preprostejša.

2.3.4 Tehnologije za pripravo peletov

Peleti so sodobno, standardizirano kurivo, narejeno iz suhega lesnega prahu, žaganja, oblacev ter drugih neonesnaženih lesnih ostankov. Imajo valjasto obliko premera od 4 do 20 mm in dolžino do 100 mm oziroma obliko tablet premera od 5 do 15 mm in dolžine od 10 do 30 mm. Njihova značilnost je manjša prostornina in večja gostota, kar posledično pomeni večjo energijsko vrednost. Merska enota za pelete je nasuti meter.

Tehnologije izdelave peletov zajemajo:

- pripravo surovine (deponiranje),
- grobo sekanje ali mletje,
- sušenje,
- fino mletje,
- kondicioniranje in mešanje,
- stiskanje oziroma peletiranje,
- hlajenje in sušenje,
- pakiranje ter
- transport in skladiščenje.

2.3.4.1 Izdelava lesnih peletov

Peleti se izdelujejo iz čiste, neonesnažene lesne biomase, brez kemijskih vezivnih sredstev. V pelete se stiskajo oblanci, žagovina in suh lesni prah. Kot vezivo služi le smola v lesu. Za izboljšanje mehanske trdnosti se jim lahko doda še od 1 do 3 % krompirjevega ali koruznega škroba. V postopku izdelave se uporabljata zgolj visok tlak in povišana temperatura. S tem se zmanjša vsebnost vode in prostornina, poveča pa se gostota. Zaradi večje gostote imajo lesni peleti višjo kurilno vrednost. Zaradi manjše prostornine in višje kurilne vrednosti na enoto prostornine so tudi primernejši za transport in skladiščenje. Standardizirana oblika peletov omogoča avtomatizacijo celotnega kurilnega sistema in kakovostno zgorevanje. Zaradi naštetih lastnosti so peleti idealni za doziranje, priročni za pakiranje, odlično se sipajo in vpihujejo, izgorevanje je skoraj popolno, ostanek pepela pa je minimalen.

Pri izdelavi peletov je zelo pomembna vlažnost vhodne surovine, ki mora biti manjša od 12 %. Če ima vhodna surovina višjo vlažnost, jo je treba pred stiskanjem sušiti. Prevelika vlažnost vhodne surovine ogroža trdnost končnega izdelka. Peleti s povečano vsebnostjo vlage so bolj drobljivi, zato nastaja prah, ob daljšem skladiščenju pa tudi bolj plesnijo.

Preglednica 5 prikazuje primerjavo lastnosti in vrednostih enot za pelete in sekance. Vidimo, da imajo peleti precej večjo kurilno vrednost in gostoto od sekancev, medtem ko je vsebnost vode pri njih manjša.

Preglednica 5: Ključni podatki za pelete in sekance (Obnovljivi viri ..., 2005)

	Lesni peleti	Sekanci
kurilnost	17 GJ/t	13,4 GJ/t
- na kg	4,7 kWh/kg	3,7 kWh/kg
- na m ³	3077 kWh/m ³	744 kWh/m ³
vsebnost vode	8 %	25 %
gostota	650 kg/m ³	200 kg/m ³
vsebnost pepela (% mase)	0,5 %	1 %

Grobo mletje lesa se opravlja s sekalnikom ali mlinom za mletje. S tem se zagotovi enakomerna struktura materiala za dovajanje v peletirko. Optimalni premer sekancev je 4 mm. Običajno se uporabljajo batni mlini, ki so v različnih velikostih in s številnimi dodatki.

Sušenje lesa za izdelavo peletov poteka v bobnasto-parnih sušilnikih ali sušilnikih na vroč zrak. Sušenje lesa je potrebno, ker vlažnost lesa za izdelavo peletov ne sme presegati 17 %, priporočljivo pa je, da je manjša od 12 %.

Za fino mletje se uporablja mlin kladivar, v katerem se suhi sekanci fino zmeljejo do žagovine.

Kondicioniranje in mešanje je postopek priprave materiala za izdelavo peletov. V mešalcu, kjer je temperatura okrog 70 °C, se surovina ogreva in navlaži. Potrebna sta voda in komprimiran zrak. S pravilnim postopkom se doseže višja kakovost peletov.

Stiskanje peletov poteka v peletirki. Nevezan material se polni v boben, kjer se material zaradi rotacije in tlačnih sil stisne skozi matrico v pelete. Dodatki se običajno ne uporabljajo, ker lignin v lesu deluje kot vezivo, saj se v procesu peletiranja zmehča. Posebni noži režejo pelete na ustrezno dolžino. Kapaciteta peletirke je od 500 kg do 3500 kg peletov na uro.

Hlajenje in sušenje vročih, mehkih in vlažnih peletov poteka s pomočjo hladnega zraka. To je zelo pomemben del tehnologije za izdelavo peletov, saj imajo peleti, ko zapustijo peletirko, temperaturo od 90 do 95 °C. S hlajenjem se peleti, zaradi ohlajevanja lignina, stabilizirajo in otdijo, s tem pa dobijo svojo kompaktnost.

Slika 8 kaže primer švedskega stroja za izdelavo peletov, katerega zmogljivost je od 150 kg/h do 800 kg/h, odvisno od vhodne surovine. Material, ki se uporablja, je žagovina,

oblanci bora, smreke, hrasta in jelše, vlažnost materiala pa mora biti manjša od 15 %. Vhodni material ne sme vsebovati kovinskih delov, kamenja in podobnih nečistoč.

Na spletni strani nemške firme Bruks-Kloeckner (2007) so podatki, da so v tej firmi začeli izdelovati mikro sekance za izdelavo peletov, ki so cenovno in energetsko bolj učinkoviti od tradicionalnih sekancev. Razvili so revolucionarni bobenski sekalnik (slika 9), ki naseka sekance krajše od 7 mm, kar omogoča, da se **hitreje sušijo in so prej** pripravljeni za stiskanje. Cilj družbe je bil doseči preprostejšo izdelavo peletov na cenovno ugodnejši način. S tem so uspeli izločiti celotno fazo drobljenja in sicer sekanje sekancev na standardno dolžino 30 mm pred vhodom v proces stiskanja peletov.



Slika 8: Švedski stroj za izdelavo peletov (**Stroji in oprema ...**, 2007)



Slika 9: Bobenski sekalnik BRUKS 805 CT (**Bio Fuels**, 2007)

Yadong in Henry (2000) sta objavila rezultate testiranja različnih vrst in oblik stiskancev z vidika vsebnosti vode, gostote oziroma trdnosti, obstojnosti in uporabnosti stiskancev. V tej raziskavi je bil uporabljen postopek stiskanja z batom za proizvodnjo trdih materialov z visokim tlakom. Postopek ustvari tako visok tlak, da je mogoče narediti kompaktne in odporne stiskance tudi pri normalni temperaturi, brez dodane toplote. Pri sobni temperaturi in pod tlakom od 34 do 134 MPa so s tem postopkom izdelali trdne in odporne stiskance. Analizirali so materiale iz trdega lesa (hrast), mehkega lesa (smreka) in trdo-mehkega lesa (bombaževce) v obliki žagovine, sekancev in lubja. Materiali so vsebovali od 20 do 45% vlage in so bili analizirani 24 ur za tem, ko so bili stiskanci narejeni in shranjeni v

neprepustnih vrečah. Rezultati študije so pokazali, da se je trdnost stiskancev povečala za 5 %, če je bil čas stiskanja krajši od 10 sekund. Če pa je bil čas stiskanja daljši od 20 sekund, pa se je trdnost stiskancev občutno zmanjšala. Nadalje je bilo ugotovljeno, da pri vlažnosti materiala enaki ali nižji od 4 % ni bilo možno narediti kakovostnih stiskancev, ker kasneje sami preveč vsrkavajo vlago iz zraka. Stiskanci, narejeni pri vlažnosti materiala 8 %, pa so imeli visoko gostoto in odlično **kakovost**. Stiskanci, narejeni pri vlažnosti materiala 8 %, namreč ne težijo k temu, da bi vsrkavali vlago iz zraka, zato so **kakovostnejši** tudi dolgoročno. Končni rezultati analize so pokazali, da je za visoko **kakovostne** stiskance iz vseh materialov primerna vlažnost med 5 in 12 %, optimalna vlažnost pa je 8 %. Glede časa stiskanja se je pokazalo, da so primernejši časi, krajši od 10 sekund, ker se s tem kompaktnost stiskancev poveča za 5 %. Za proizvodnjo visokokakovostnih stiskancev je bil uporabljen tlak 70 MPa. Glede vrste vhodnih materialov za izdelavo stiskancev pa so ugotovili, da je najboljši material za kakovostne stiskance hrastovo lubje, sledi žagovina, na zadnjem mestu pa so sekanci.

Do nekoliko drugačnih ugotovitev so prišli v svoji študiji Christofer Rhén in sodelavci (2005), ki so proučevali učinke vsebnosti vlage, zgoščevalni tlak in temperaturo v žagovini iz bele jelše, iz katere so izdelali pelete. Ugotovili so, da je kompaktnost stiskancev precej odvisna od njihove gostote. Visoka temperatura, vsaj 144 °C, in nizka vlažnost na začetku stiskanja (6,3 %), povečujeta suho gostoto peletov. Pri tem pa so prišli do zanimivega podatka, da ima sila stiskanja v razponu od 46 do 114 MPa le neznamenit vpliv na trdnost stiskancev, saj je za dobro kakovost stiskancev v matrici zadostoval že tlak 50 MPa.

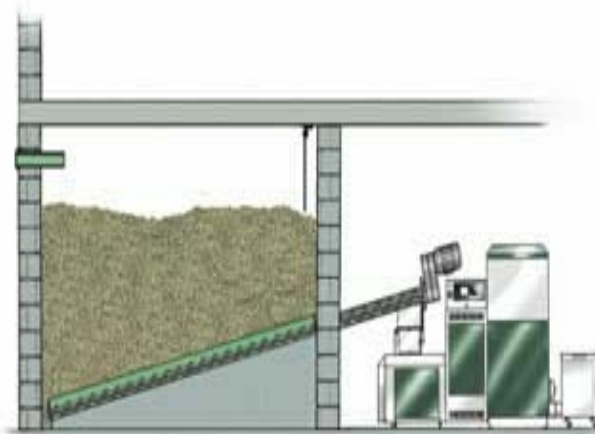
Tudi v Sloveniji se proizvodnja peletov iz leta v leto povečuje. K temu Slovenijo zavezuje Bela knjiga ES, ki predvideva podvojitev deleža obnovljivih virov energije do leta 2010, Kyotski sporazum, ki predvideva 8 % znižanje emisij CO₂ do leta 2010 v primerjavi z letom 1990, in odvisnost Slovenije od drugih virov energije. Glavne slabosti pridobivanja toplotne energije s kurjenjem lesnih peletov so visoki investicijski stroški. Ker ima Slovenija velike potencialne lesne zaloge, država s svojimi subvencijami pomaga pri pokrivanju začetnih investicijskih stroškov.

Stritih in Butala (2002) navajata, da sta znana dva glavna kriterija za ugotavljanje kakovosti peletov, ki se kažeta v kemičnih in fizikalnih lastnostih. Kemične lastnosti kažejo na sestavo kuriva, vsebnost pepela, vlago ter kurilnost. Fizikalne lastnosti pa kažejo na vizualne parametre in procese, katerim so bili peleti izpostavljeni. Peletiranje ima največji vpliv na znižanje vsebnosti vlage v lesnem kurivu. Druge kemične spremembe v lesnem materialu, iz katerega se izdelujejo peleti, so manj verjetne, saj je uporaba kemičnih ali naravnih dodatkov prepovedana. Kakovost peletov pa se ne more definirati brez navedbe tehnologije izgorevanja, saj različne kurilne naprave zahtevajo različno kakovost goriva. Nekatera vprašanja glede kakovosti peletov in tehnologij zgorevanja ostajajo še odprta, saj ni poznan vpliv kemičnih in bioloških parametrov na kakovost peletov in proces peletiranja (npr. različne kemične spojine itd.). Potrebne pa so tudi nadaljnje raziskave vpliva tehničnih parametrov (temperature, tlaka) na proces in kakovost peletov.

2.3.4.2 Transport, skladiščenje in sušenje peletov

Za lesne pelete je skladiščenje pomemben del tehnologije, ker **so higroskopi**. Zaradi relativno visoke absorpcije vlage se peleti skladiščijo v zaprtih silosih. Pri shranjevanju ne sme nastajati prah, saj lahko povzroča tehnične težave pri polnjenju in zgorevanju. Pelete pakiramo v manjše embalaže, v vreče od 10 do 15 kg ali v večje vreče, velike do 1 m³.

Lesne pelete je možno shranjevati v stavbi, kjer je kurišče, ali v ločenem zalogovniku. Zalogovnik lahko izdelamo pod zemljo ali nad zemljo kot silos, v obeh primerih pa se kurivo dovaja v kotel s pomočjo podajalnega polža, kar prikazuje slika 10.



Slika 10: Prikaz polnjenja peletov iz zalogovnika v peč (Stroji in oprema ..., 2007)

Druga možnost je tudi vsebnik s klančino ob stavbi, ki služi tovarnjakom za dovoz in odvoz vsebnikov. Transport goriva od zalogovnika do kotla pa je možen v kombinaciji s hidravličnim podajalnikom, dozirno napravo s kolesom in vzmetno roko, s podajalnim polžem in s sesalno cevjo, nagib terena pa mora biti vsaj 30 %.

Peleti so za prodajo pripravljeni v razsutem stanju ali v vrečah. Temu primeren je tudi njihov transport. Do končnega porabnika se lahko peleti, ker so zelo sipki, transportirajo v posebej prilagojenih zaprtih cisternah. V zalogovnik pa se peleti vpihujejo s pomočjo ventilatorja, ki je na transportnem vozilu.

2.3.4.3 Kurilne naprave

Kotli, ogrevani na lesne pelete, pomenijo trenutno največji dosežek v razvoju ogrevanja na les (slika 9). Izkoristek večine kotlov na pelete se giblje med 85 in 95 %. Obstajajo tudi kondenzacijski kotli na pelete, ki dosežejo izkoristek do 104 % in so primerni za nizkoenergijske ter pasivne hiše, ki potrebujejo generatorje toplote (Obnovljivi viri ..., 2005). Ker imajo peleti visoko gostoto in veliko energijsko vrednost, so zelo primerni za ogrevanje urbanih naselij, saj potrebujejo manjši skladiščni prostor, oskrba pa je podobna kot pri kurilnem olju.

Za centralno ogrevanje obstajajo avtomatizirane kurilne naprave z zalogovnikom prostornine okrog 1 m³ in s podajalno napravo, ki polni pelete iz centralnega zalogovnika v kurilno napravo. Delo tovrstnih kurilnih naprav je popolnoma avtomatizirano. Tudi čiščenje prenosnika toplote je običajno avtomatizirano, pri enostavnejših napravah pa ročno. Volumen posode za pepel je dimenzioniran za dvomesečno obratovanje kurilne naprave.

Kurilna vrednost peletov je 4,0 kWh/kg, kar ustreza 0,5 l kurilnega olja, saj 3 m³ razsutih lesnih peletov nadomešča 1000 l kurilnega olja. Poraba peletov za ogrevanje površine 150

m² znaša okrog 7,5 m³ (4,8 t) na kurilno sezono. Za ogrevanje manjših površin uporabljamo peči za kurjenje peletov z močjo od 2 do 10 kW toplotne moči.



Slika 11: Kotel na lesne pelete (Stroji in oprema ..., 2007)

2.4 STANDARDI IN ZAKONODAJA

Slovenija nima standardov za trda goriva in biomaso, zato bo morala sprejeti evropske standarde.

Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST) oziroma tehnični odbor Naftni derivati, maziva in sorodni proizvodi (TC NAD) je januarja 2004 sprejel sklep o ustanovitvi delovne skupine WG3 – trda biogoriva. Glavni namen ustanovitve delovne skupine je spremljanje in uvajanje evropskih standardov na področju trdih biogoriv. Skupina je pripravila prevod dveh normativnih dokumentov, ki predpisujeta tehnične zahteve, ki jih mora izpolnjevati proizvod, proces ali storitev, ki ima nižji status od standarda. To sta:

1. Standard prCEN/TS 14588 Solid Biofuels – Terminology, definitions and descriptions (Trda biogoriva, terminologija, definicija in opisi – CEN/TS 14588) in
2. Solid biofuels – Fuel specifications and classes' prCEN/TS 14961 (Trda biogoriva, razredi in specifikacija goriv – CEN/TS 14961)

V prvi tehnični specifikaciji je opisanih 147 pojmov s področja trdih biogoriv, vendar ostajajo določena vprašanja še odprta, tudi v zvezi s prevodi izrazov v slovenščino.

V drugi tehnični specifikaciji je opredeljenih 9 različnih oblik trdih biogoriv: briketi, peleti, oljne pogače, lesni sekanci, grobi lesni sekanci, drva, žagovina, skorja in slamne bale.

Cilj tehnične dokumentacije je zagotoviti nedvoumne in jasne principe za razvrščanje trdih biogoriv. Služila naj bi kot pripomoček za učinkovito trgovanje z biogorivi in dobro razumevanje med prodajalci in kupci, olajšala pa naj bi tudi postopek za izdajanje dovoljenj in priprave poročil (Krajnc, 2005).

Največ na področju standardizacije lesnih kuriv sta naredili Avstrija in Švedska.

Avstrija ima za pelete in brikete enoten standard ÖNORM M 7135, ki opredeljuje njihove lastnosti, razvidne v preglednici 6, za sekance pa ima standard ÖNORM M 7133, ki opredeljuje njihove lastnosti v preglednici 7 (Katalog produktov ..., 2005).

Preglednica 6: Lastnosti peletov in briketov po avstrijskem standardu ÖNORM M 7135

Lastnost:	Peleti	Briketi
Prečni prerez	4 – 20 mm	20 – 120 mm
Dolžina	maks. 100 mm	maks. 400 mm
Gostota	$\geq 1,0 \text{ kg/dm}^3$	$\geq 1,0 \text{ kg/dm}^3$
Vsebnost vode	$\leq 12 \%$	$\leq 18 \%$
Vsebnost pepela	$\leq 0,5^* \%$	$\leq 6,0^* \%$
Kurilna vrednost	$\geq 18,0 \text{ MJ/kg}$	$\geq 18,0 \text{ MJ/kg}$
Vsebnost žvepla	$\leq 0,04^* \%$	$\leq 0,08^* \%$
Vsebnost lepljivih snovi	$\leq 0,30^* \%$	$\leq 0,6^* \%$
Vsebnost klora	$\leq 0,02^* \%$	$\leq 0,04^* \%$
* relativno glede na suho snov		

Preglednica 7: Lastnosti sekancev po avstrijskem standardu ÖNORM M 7133

Maksimalne vrednosti			Delež mase v %, ki ostane na situ s kvadratom stranice navedene v mm		
Razred	Prečni prerez (cm ²)	Dolžina (cm)	Maks. 20%	60 – 100%	Maks. 20%
G 30	3	8,5	16	2,8	1
G 50	5	12	31,5	5,6	1
G 100	10	25	63	11,2	1

Glede na velikost sekancev standard določa 3 razrede:

- G 30 – sekanci dolžine manjše od 30 mm,
- G 50 – sekanci dolžine manjše od 50 mm,
- G 100 – sekanci dolžine manjše od 100 mm.

Glede na vsebnost vode standard določa 5 razredov sekancev:

- W 20 – vsebnost vode manjša od 20 %,
- W 30 – vsebnost vode od 20 do 29 %,
- W 35 – vsebnost vode od 30 do 34 %,

- W 40 – vsebnost vode od 35 do 39 %,
- W 50 – vsebnost vode od 40 do 49 %.

Glede na gostoto standard določa 3 razrede sekancev:

- S 160 – sekanci z gostoto pod 160 kg/m^3 (jelka, smreka),
- S 200 – sekanci z gostoto vsaj 160 kg/m^3 (bor, breza),
- S 250 – sekanci z gostoto vsaj 200 kg/m^3 (hrast, bukev).

Glede na vsebnost pepela standard določa 2 razreda sekancev:

- A 1 – sekanci, pri katerih je vsebnost pepela pod 1 % in
- A 2 – sekanci, pri katerih je vsebnost pepela od 1 do 5 %.

Preglednica 8: Primerjava standardov za lesne pelete (Kotar, 2004)

	AVSTRIJA	ŠVEDSKA	NEMČIJA
	ÖNORM M 7135	SS 18 71 20	DIN 51731
Dimenzija:	mm	mm	mm
premer	$4 \leq D \leq 10$		$6 \leq D \leq 10$
dolžina	$\leq 5 \times D$	$\leq 5 \times D$	
Nasipna gostota		$\geq 500 \text{ kg/m}^3$	
Prostorninska gostota	$\geq 1,12 \text{ kg/dm}^3$		$1 - 1,4 \text{ g/cm}^3$
Vlažnost	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$	$\leq 12\%$
Vsebnost pepela	$\leq 0,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$
Kurilnost	$\geq 18,0 \text{ MJ/kg}$ $\geq 5 \text{ kWh/kg}$	$\geq 16,9 \text{ MJ/kg}$ $\geq 4,7 \text{ kWh/kg}$	$\geq 17,5 - 19,5 \text{ MJ/kg}$ $\geq 4,9 - 5,4 \text{ kWh/kg}$
Veziva	prepovedana	količine in vrste morajo biti določene	

Razvoj obnovljivih virov energije je tudi osrednji cilj energetske politike Evropske unije. EU se namreč zaveda, da so zaloge fosilnih goriv izredno omejene in da je treba energijo za prihodnji razvoj iskati drugje. Zaradi tega s svojo zakonodajo in s številnimi programi spodbuja razvoj obnovljivih virov energije. Ker se je Slovenija z vstopom v EU odločila slediti ciljem EU, je razvoj obnovljivih virov energije eden ključnih ciljev energetske politike tudi v Sloveniji. Zakonodajni okviri in ukrepi EU za razvoj obnovljivih virov energije so:

- Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal energy market (OJ L283/33)
- Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the biofuels or other renewable fuels for transport (OJ L12342),
- Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 9242EEC (OJ L283/33),
- Directive 2003/54/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 Concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 96/EC (OJ L176/57).

Poleg naštetih direktiv EU sestavljajo pravni okvir in politiko na področju obnovljivih virov energije v Sloveniji še:

- Energetski zakon (EZ - PB2, Ur. l. RS št. 27/2007),
- Resolucija o nacionalnem energetskega programu (Ur. l. RS št. 57/2004),
- Zakon o varstvu okolja (ZVO - UPB1, Ur. l. RS št. 39/2006) in
- Zakon o trošarinah (ZTro - UPB3, Ur. l. RS št. 2/2007).

3 MATERIALI IN METODE

Lastnosti stiskancev, izdelanih pri različnih tehnoloških parametrih, kot sta vlažnost in temperatura stiskanja, smo proučevali v štirih fazah:

1. priprava bukove žagovine, ki smo jo uravnovesili na pet izbranih vlažnosti,
2. stiskanje vzorcev pri temperaturah 50, 60, 70 in 80 °C do enakega volumna,
3. spremljanje faze sproščanja (relaksacije), ko smo po stiskanju vzdrževali enak volumen,
4. ovrednotenje vseh parametrov in rezultatov poskusa glede na opravljene meritve.

3.1 PRIPRAVA VZORCA

Poskuse smo opravili z bukovo žagovino. Količino materiala smo prilagodili izbranemu načinu preizkušanja. Predvideli smo namreč naslednji potek izdelave stiskancev:

- stiskalni model do vrha napolnimo z lesno maso,
- vzorec stisnemo do predpisanega volumna in
- ob tem opravimo meritve.

Količina potrebne lesne mase za celoten poskus je torej odvisna od velikosti stiskalnega modela in od števila predvidenih meritev.

Stiskalni model smo naredili sami, kakor je opisano v podpoglavju 3.2. Njegov bistveni sestavni del je jekleni valj, v katerega nasujemo material. Dolžino valja smo izbrali glede na odločitev, da bodo stiskanci visoki med 40 in 60 mm, razmerje volumnov pred stiskanjem in po njem pa med 5 in 7. Primerna dolžina valja v stiskalnem modelu je torej 300 mm.

Žagovino, uravnovešeno na petih vlažnostih, smo stiskali pri štirih temperaturah, in sicer 50 °C, 60 °C, 70 °C in 80 °C, in imeli tako 20 kombinacij. Ker smo vsako meritev ponoviti trikrat pri enakih parametrih, smo potrebovali material za 60 stiskanj, kar je za izbrani valj za stiskanje s premerom 50 mm in dolžine 300 mm pomenilo, da smo potrebovali približno 35,35 dm³ bukovega žaganja.

Priprava žagovine je zajemala:

- poenotenje granulacij in
- uravnovešanje na vlažnosti (ciljne vlažnosti 7-8 %, 10 %, 15 %, 20 % in 25-28 %).

3.1.1 Granulacija lesne mase

Žagovino, ki je vsebovala različno velike delce in tudi precej lesnega prahu, smo presejali z različnimi siti, s premeri luknjic 4 mm, 2 mm, 1 mm in 0,237 mm (odslej bomo sita označevali samo s številko, ki pomeni premer luknjic). Na uporabljeni kaskadi sit 4, 2, 1, in 0,237 smo sejali 6 minut (slika 10). Vse ostanke s sit 2, 1 in 0,237 smo zbrali in stehtali. Skupna masa vsega materiala je tehtala 5240 g.



Slika 12: Šestkaskadni sejalni stroj

3.1.2 Uravnovešanje vzorcev na različne vlažnosti

Žagovino smo uravnovešali na petih relativnih zračnih vlažnostih, ki smo jih kontrolirali z različnimi solnimi raztopinami (preglednica 9).

Preglednica 9: Pričakovane vlažnosti lesne mase, če so izpostavljene določeni klimi

Sol oziroma vlažilna snov	Klima
MgCl_2	34 %
NaNO_2	65 %
NaCl	75 %
ZnSO_4	88 %
Voda (H_2O)	100 %

Vlaženje smo opravili po naslednjem postopku:

- izdelali smo mrežaste kadičke z okviri,
- kadičke smo napolnili z lesno maso,
- postavili smo jih v vlažilne komore,
- istočasno pa smo v komore dali tudi soli iz preglednice 9.

Najprej smo preverili, kako dolgo mora biti vzorec izpostavljen v vlažilni komori. Manjšo količino materiala smo v 5 kadičkah v 5 vlažilnih komorah pustili zaprto dva dni. Sledilo je sušenje, pri čemer smo vse kadičke za 24 ur postavili v sušilnik pri temperaturi 103 °C. Vzorce smo stehali vlažne in suhe. Odstotek vlažnosti materiala smo določili z gravimetrično metodo po formuli

$$u = \frac{m_v - m_s}{m_s} 100 (\%), \quad (4)$$

kjer m_v pomeni maso vlažnega materiala, m_s maso suhega materiala in u odstotek vlažnosti. Pri poskusnem vlaženju smo dosegli odstotke vlažnosti, kot jih napovedujejo v literaturi.

Vso žagovino smo razdelili na pet delov in vsakega od njih uravnovesili na različne vlažnosti (preglednica 9 in slika 13). Po petdnevem navlaževanju smo uravnovešene vlažnosti določili z gravimetrično metodo – enačba (4). Izračunali smo naslednje vlažnosti: 9,8 %, 11,8 %, 14,8 %, 18 % in 27,4 %.

Kadičke v vlažilnih komorah prikazuje slika 13.



Slika 13: Vlažilne komore s kadičkami za material (slika ne prikazuje naših kadičk z žaganjem, ampak polnitev z drugačnimi izdelki)

3.2 IZVEDBA NAPRAVE ZA IZDELAVO STISKANCEV

Izdelavo stiskancev smo proučili v laboratorijskih razmerah. Napravo za stiskanje smo izdelali in sestavili s sodelavci Katedre za mehanske obdelovalne tehnologije. Sestavljajo jo (slika 14):

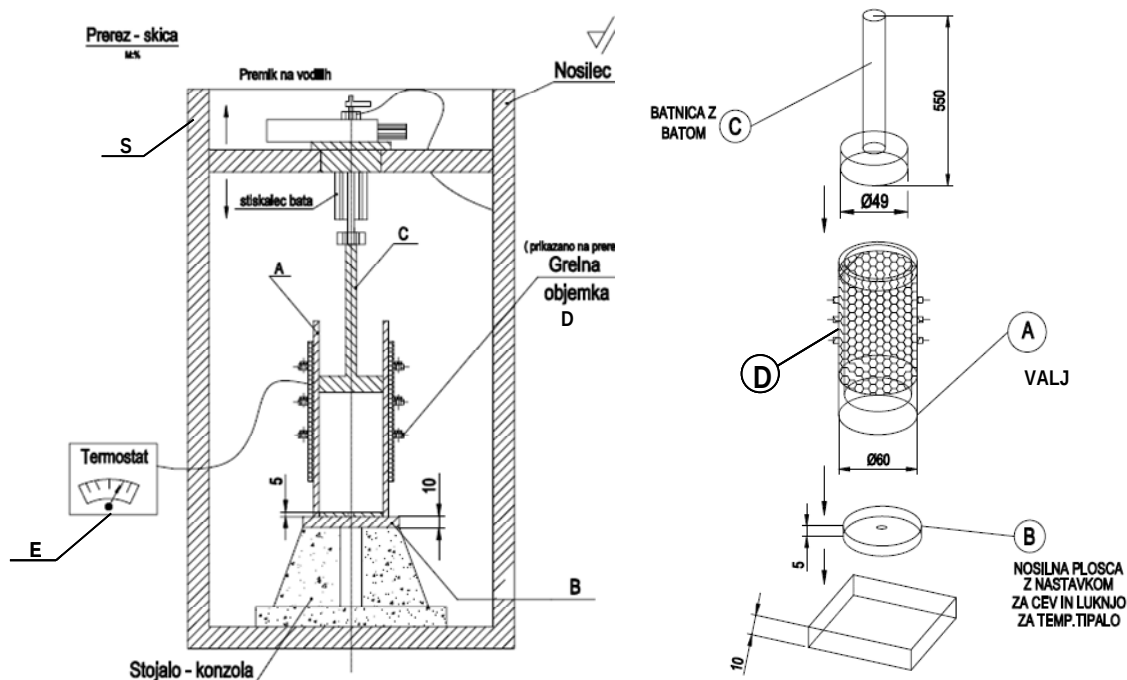
1. testirni stroj Zwick Z-100, katerega program je bil prilagojen potrebam naših poskusov,
2. nosilno jekleno ploščo,

3. jekleni valj, debelina stene 5 mm, dolžina 300 mm, premer 50 mm,
4. batnico z medeninastim batom, premer 49 mm,
5. grelna telo z mikroprocesorsko regulacijo nastavljene temperature (N480D – V3.2x),
6. temperaturni merilnik Voltcraft DT-300.

3.2.1 Zasnova stiskalne naprave

Pri izdelavi stiskalne naprave smo morali upoštevati več zahtev:

- model se mora dati vstaviti v okvir stroja Zwick Z-100;
- valj za nasuti material mora biti dovolj dolg, da je mogoče doseči predvidena stiskalna razmerja;
- valj mora imeti dovolj trdne stene, da prenese tlake, ki nastanejo v končnih fazah stiskanja;

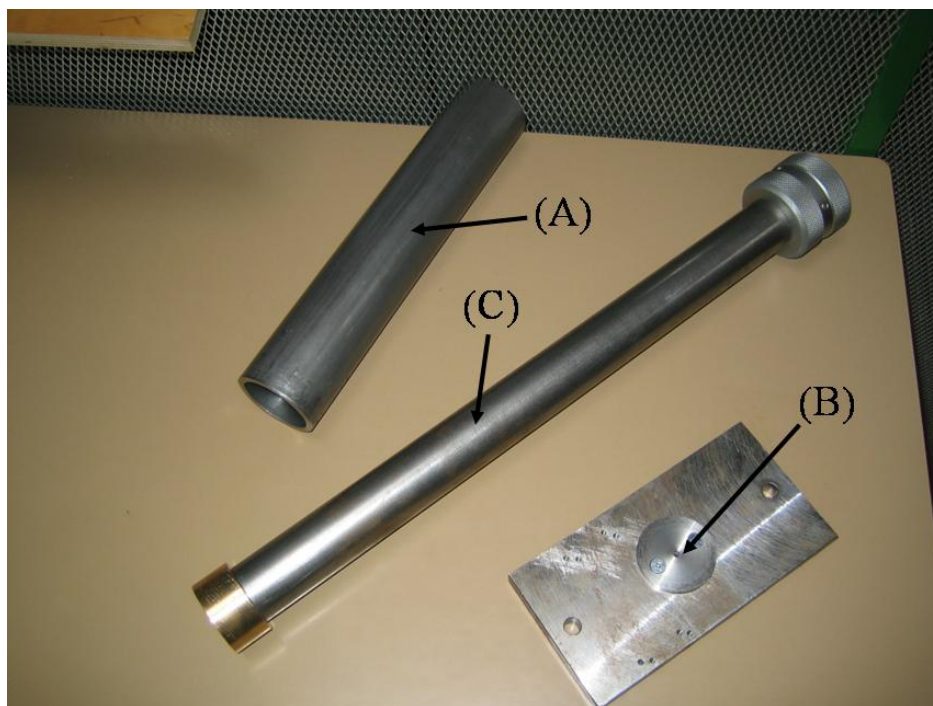


Slika 14: Shematski prikaz eksperimentalnega okolja, ki ga sestavljajo stiskalni stroj Zwick Z-100 (S), stiskalna naprava z valjem (A), podstavkom (B) in batom (C) ter grelna telo (D) s temperaturnim regulatorjem N480D – V3.2x (E)

- podloga za valj mora biti popolnoma stabilna, tako da se tudi ob večjih tlakih ne upogne in da nudi zanesljivo oporo valju, ki mora biti ves čas stiskanja zasidran na istem mestu;
- dodatno je potreben nastavek, ki se lahko vstavi med valj in podlogo, zato da lahko potisnemo po stiskanju stiskanec iz valja;
- stiskalna naprava mora biti opremljena s termostatisanim grelom, katerega moč mora zagotavljati segrevanje stiskanih vzorcev v valju na več kot 80 °C;
- podloga za valj mora omogočati, da pred stiskanjem potisnemo skozi in naprej v sredino vzorca tipalo elektronskega termometra.

Na sliki 15 vidimo sestavne dele stiskalne naprave. To so valj (A), podloga z vodom (podstavkom) za valj (B) in batnica z batom (C).

Podlogo za valj predstavlja jeklena plošča debeline 15 mm. Na podlogi je pritrjen krožni nastavek s premerom 49 mm in debelino 5 mm. Nanj se natakne valj, da med stiskanjem ne zdrsne iz položaja. Na sredini nastavka je luknja s premerom 4 mm. Namenjena je vstavljanju temperaturnega tipala v stiskani vzorec. Jeklena batnica dolžine 550 mm nosi medeninast bat s premerom 49 mm. Bat zlahka zdrsne v stiskalno cev, batnico pa na drugi strani vpnejo v vpenjalno glavo stiskalnega stroja.



Slika 15: Stiskalna naprava: valj (A), nosilna plošča z nastavkom za valj in luknjo za temperaturno tipalo (B) ter batnica z batom (C)

3.2.2 Gretje vzorca in merjenje temperature

Izdelali smo stiskance pri temperaturah 50 °C, 60 °C, 70 °C in 80 °C. V stiskalno napravo smo vgraditi grelec, ki je ogrel lesno maso v valju na želeno temperaturo in potem vzdrževal stalno temperaturo ves čas meritev. Izbrali smo cilindrični grelec Maras 9249. Grelec smo priključili na regulacijsko enoto N480D – V3.2x, ki jo izdeluje podjetje Novus (Microprocessor Based ..., 1998). Namestitev kaže slika 16.



Slika 16: Cilindrično grelni telo (levo) in mikroprocesorski regulator temperature (desno)

Temperaturo smo merili z elektronskim termometrom DT-300 podjetja Voltcraft (LCD Handthermometer ..., 2003). Termometer meri temperature med $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, in sicer z ločljivostjo $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ v območju od $-19,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $199,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatura se vzorči enkrat na sekundo. Temperaturno tipalo je dolgo 144 mm in izhaja iz držaja, dolgega 120 mm , tako da smo z njim brez težav segli v sredino vzorca v valju. Merilnik prikazuje slika 17.



Slika 17: Merilnik temperature DT-300

3.3 IZDELAVA STISKANCEV

V laboratorijskih razmerah smo izvedli nadzorovan poskus, pri katerem smo izdelovali stiskance in opazovali ta proces pri različnih vlažnostih vzorcev in temperaturah, do katerih smo jih pred stiskanjem segreli.

Pred izvedbo poskusa smo pripravili stiskalno napravo, jo vgradili v stiskalni stroj, tega pa programirali za stiskanje. Stiskanje vzorcev je potekalo v naslednjem zaporedju:

- valj smo do vrha napolnili z lesno maso;
- vzorec smo segreli do izbrane temperature;
- pognali smo testirni stroj Zwick Z-100, ki je potisnil bat 240 mm navzdol;
- na tem mestu je stroj ostal naslednjih 230 do 240 s, da smo lahko opazovali fazo sproščanja;
- nato smo vpenjalo stroja dvignili, sneli valj s podstavka in ga postavili na širšo odlagalno cev, ki smo jo fiksirali na nosilni plošči stiskalne naprave;
- stroj smo spet aktivirali, tako da je bat vstopil v valj in iz njega izrinil stiskanec, ki je zdrsnil v podstavljeno odlagalno cev;
- ko smo vpenjalo stroja ponovno dvignili, smo vzeli stiskanec iz odlagalne cevi ter ga stekali in izmerili njegovo dolžino.

Vse podatke o silah, ki jih je izmeril testirni stroj v fazah stiskanja in sproščanja, je program avtomatično zabeležil in shranil v posebno podatkovno zbirko. Pozneje smo jih uporabili za ovrednotenje rezultatov, dobljenih pri poskusu.

3.3.1 Nastavitve stroja

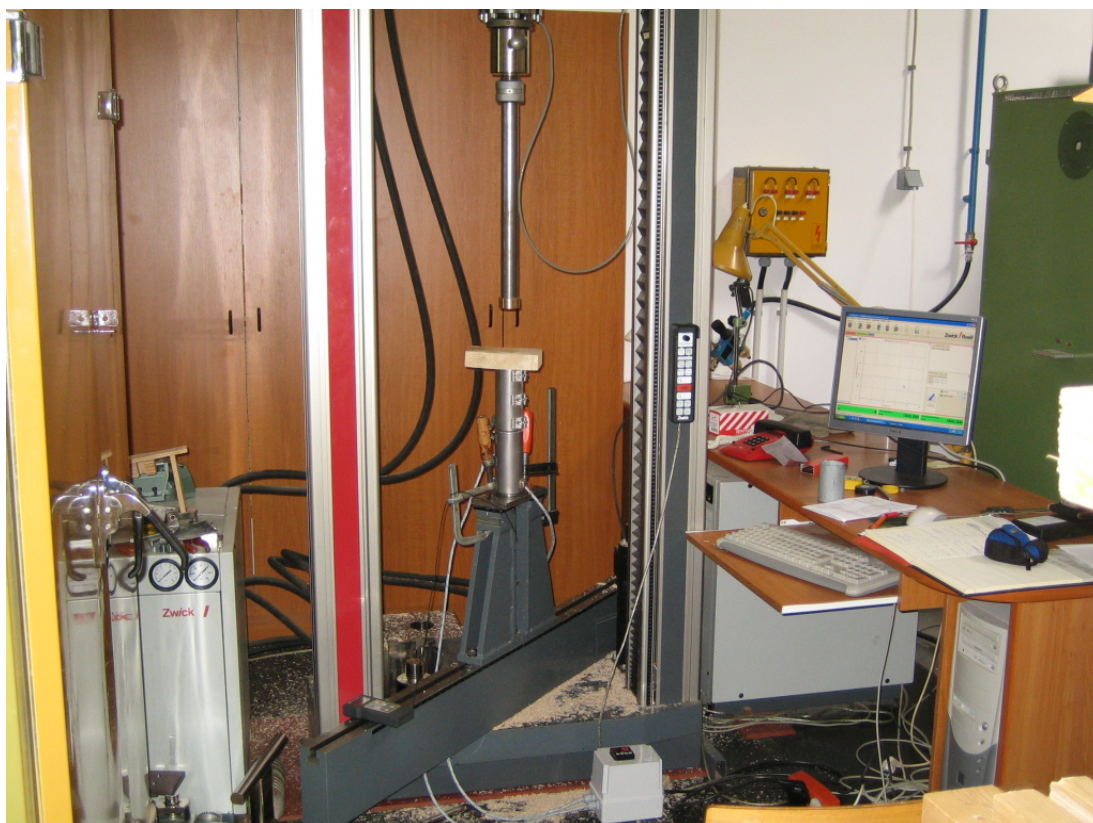
Pred stiskanjem smo postavili stiskalno napravo na primerno višino v testirnem stroju. V okvir stroja smo namestili trdno nosilno konstrukcijo in nanjo s sponami privili nosilno ploščo stiskalne naprave (slika 18).

Nosilna plošča stiskalne naprave je bila dobro izravnana, tako da je valj stal na njej navpično in je lahko potoval bat med stiskanjem po njem brez zdrsov po stenah cevi.

Ko smo tako dokončno opredelili mesto stiskalne naprave in valja, smo vpeli batnico z batom v vpenjalno glavo testirnega stroja. Bat smo previdno spustili točno do vrhnjega roba valja in zabeležili vzdolžno koordinato stroja na tem mestu. Znašala je 1651,5 mm nad izhodiščem strojevega koordinatnega sistema.

Za delo s testirnim strojem smo uporabljali merilni program, ki deluje v naslednjih korakih:

- ob zagonu se strojeva vpenjalna glava postavi v položaj, ki privede stiskalni bat točno do gornjega roba valja;
- na začetku meritve (gumb START) začne stroj premikati bat v valju s stalno hitrostjo 200 mm/min;
- ko doseže vzdolžno koordinato 1411,5 mm, tj. 240 mm pod zgornjim robom valja, se ustavi;
- v tem položaju smo ga puščali še 230 do 240 s, nakar smo s pritiskom na gumb za konec meritve (STOP) dosegli, da je stroj potegnil bat iz cevi in se vrnil v svoj najvišji položaj;



Slika 18: Postavitev stiskalne naprave v okvir testirnega stroja

- stroj od začetka do konca meritve beleži pretečeni čas, vzporedno pa še silo, s katero potiska bat navzdol oziroma s katero vzorec pritiska na bat v obratni smeri (tudi v času sproščanja, ko se bat ne premika več).

3.3.2 Fazi stiskanja in sproščanja

Obnašanje stiskancev smo spremljali v treh fazah: med stiskanjem, v času sproščanja in neposredno zatem, ko smo jih vzeli iz valja.

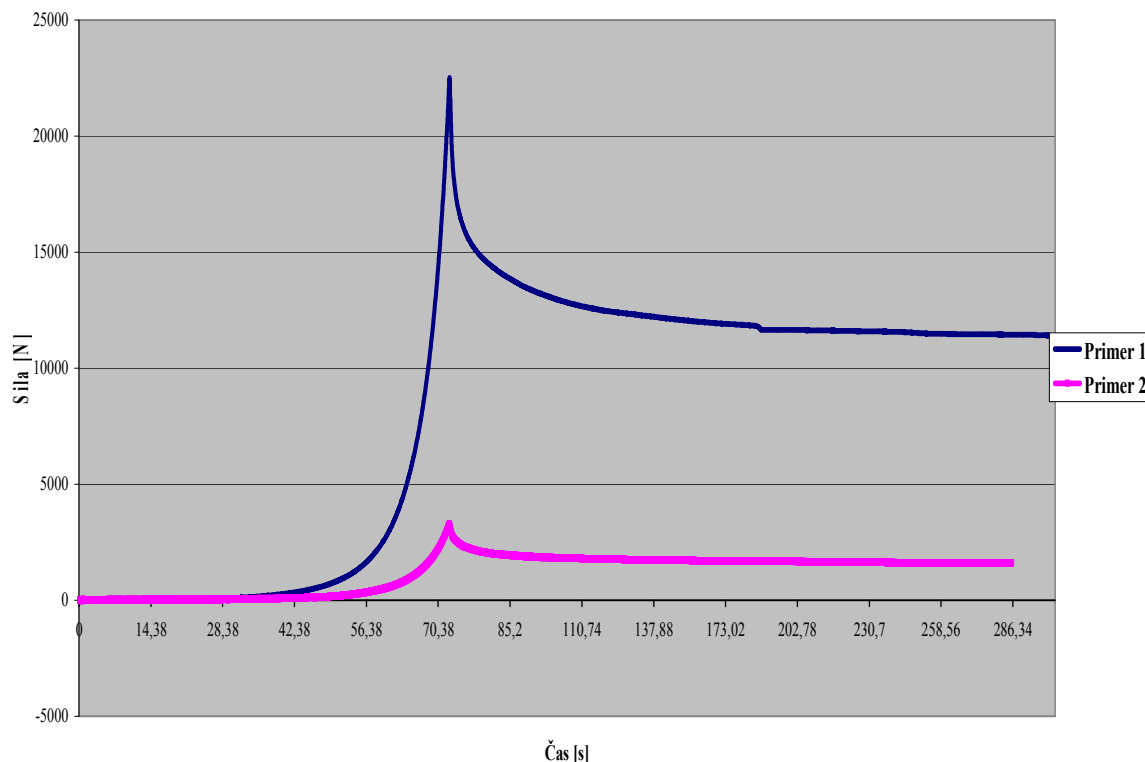
Pred vsakim stiskanjem smo valj nataknili na nastavek na nosilni plošči stiskalne naprave in ga do vrha napolnili z lesno maso ustrezne vlažnosti. Seveda na ta način nismo natresli vedno enakih količin lesne mase, kar smo morali upoštevati pri razlagi meritev, saj sicer izmerjenih podatkov med seboj ne bi mogli primerjati.

Fazo stiskanja je vedno trajala okoli 72 s. Na začetku nismo izmerili povratnih sil. Material v cevi je bil tedaj še tako zrahljan, da pri stiskanju ni nudil odpora. Zato je merilnik v testirnem stroju kazal sile, ki niso bile povezane s stiskanjem materiala. Pri več meritvah so bile začetne sile celo negativne. Te netočnosti niso več opazne, šele ko sile stiskanja presežejo vrednosti nekaj 100 N.

Po spustu bata za 240 mm smo dosegli največjo silo stiskanja. Ta je odvisna predvsem od količine lesne mase v vzorcu, delno pa tudi od njene vlažnosti in temperature. V spodnjem položaju smo bat zadržali še 230 do 240 s in izmerili sile med sproščanjem stiskanca. Sproščanje pomeni fazo, v kateri se volumen lesne mase ne spreminja, napetosti v njej pa

popuščajo, saj del dovedene energije povzroča bolj ali manj trajne spremembe v stiskancu. Čas opazovanja smo določili empirično, tako da smo v nekaj poskusnih merjenjih ugotovili, po kolikem času se napetost v vzorcu vidno ne spreminja več.

Na sliki 19 prikazujemo poteka dveh meritev z lepo vidnima fazama stiskanja in sproščanja. Nižji graf kaže meritev, pri kateri je bilo natresenega najmanj materiala (42 g), višji pa tisto, pri kateri smo natresli največ lesne mase (68,73 g). Očitno je, da so izmerjene sile med stiskanjem in sproščanjem zelo odvisne od količine lesne mase v vzorcu. V prvem primeru smo dosegli največjo silo 3266,86 N, v drugem pa 22517,20 N.



Slika 19: Potek sil med stiskanjem in sproščanjem: primer 1 (višja krivulja) kaže meritev, pri kateri smo natresli največjo maso stiskanega materiala (68,73 g suhe snovi pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 70 °C), primer 2 (nižja krivulja) pa meritev, pri kateri smo natresli najmanjšo količino lesne mase (42 g suhe snovi pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 50 °C). Primera se nanašata na posamezno meritev.

3.3.3 Tehtanje in merjenje stiskancev

Ko je bila posamezna meritev končana, smo vsak stiskanec stehali na digitalni tehtnici in ga izmerili z digitalnim kljunastim merilom. Vse stiskance smo popisali (slika 20). Mase vlažnih stiskancev so se gibale od 48,3 g do 75,6 g, izmerjene dolžine pa od 55,8 mm do 94,5 mm. Vse izmere opisuje preglednica 10.



Slika 20: Označeni in odloženi stiskanci po opravljenih meritvah

3.4 NORMIRANJE MERITEV IN UPORABA MODELOV

Ker smo stiskance izdelovali z različnimi količinami lesne mase v vzorcih, smo izmerili sile, ki so odvisne od vlažnosti in temperature snovi, dodatno pa tudi od mase (količine) snovi v vzorcu. Slednjega si ne želimo, ker nas zanimajo le odvisnosti od vlage in temperature. Zato je bilo treba dobljene rezultate razlagati tako, da se znebimo vpliva različnih količin lesne mase v vzorcih. Obstaja več možnosti za takšne pristope:

- rezultate ovrednotimo z relativnimi spremembami med posameznim poskusom, recimo z razmerjem gostote stiskanca v posameznih trenutkih stiskanja in po njem. Ker je gostota linearno odvisna od mase materiala, razmerje (deljenje) dveh gostot pri enaki količini materiala, tj. znotraj istega poskusa, izniči vpliv mase;
- primerjamo sile ali napetosti v točkah, kjer smo dosegli enako gostoto lesne mase, ko smo vzorec stiskali;
- če obstajajo znani modeli za obnašanje, ki ga opazujemo, lahko iz vseh izmerjenih podatkov za posamezno meritev izračunamo modelne parametre. Zgrajeni model lahko kasneje uporabimo za napovedovanje, če vanj vstavimo poljubne vrednosti parametrov. Tako na primer lahko določimo, kakšna bi bila največja napetost v materialu, če bi njegova masa bila drugačna, kot je v resnici bila med meritvijo.

Gre torej za normiranje izmerjenih podatkov, tako da so potem neposredno primerljivi. V nadaljevanju bomo razložili, kako smo z modeli za stiskanje in sproščanje sipkih snovi obdelali sile, izmerjene pri izdelavi stiskancev.

Modele za normiranje meritev smo povzeli iz literature in simulirali primerljive razmere za izmerjene podatke. Ti analitično opisujejo fazi stiskanja in sproščanja pri laboratorijskem izdelovanju stiskancev.

Že dolgo je znano značilno obnašanje sipkih snovi, kot so žagovina, praški in podobno, če jih stiskamo (Shaw in Tabil, 2007). Obstaja namreč povezava med gostoto stisnjene snovi in tlakom, ki ga potrebujemo, da snov stisnemo do takšne gostote:

$$\ln \rho = k_1 \ln P + k_2, \quad (5)$$

pri čemer ustreza ρ gostoti, P tlaku, k_1 in k_2 pa sta modelna parametra, ki v dobljenem linearnem modelu pomenita naklon in izhodiščno ordinato premice. Shaw (2008) navaja, da je parameter k_1 je premo sorazmeren stisljivosti materiala. Iz enačbe (5) tudi vidimo, da je parameter k_2 določen kot naravni logaritem gostote snovi pri tlaku 1. Model iz enačbe (5) se po svojem avtorju imenuje tudi Jonesov model.

Modelirati se da tudi obnašanje materiala v fazi sproščanja. Tedaj velja:

$$\frac{F_m \cdot t}{F_m - F(t)} = k_3 \cdot t + k_4, \quad (6)$$

kjer pomenijo F_m največjo silo na začetku sproščanja, $F(t)$ silo v trenutku t med sproščanjem in k_3 ter k_4 modelna parametra, ki v dobljenem linearnem modelu pomenita naklon in izhodiščno ordinato premice. Shaw (2008) navaja, da lahko parameter k_3 razumemo kot pokazatelj trdnosti snovi. Iz enačbe (6) tudi vidimo, da je parameter k_4 enak maksimalni sili pred sproščanjem, deljeni z odvodom v začetni točki krivulje sproščanja. Model iz enačbe (6) se po svojem avtorju imenuje tudi Pelegov model.

Jonesov in Pelegov model smo uporabili za normiranje meritev. Držali smo se naslednjega postopka:

1. V vsaki meritvi smo poiskali najvišjo doseženo silo in podatke razdelili v dva dela: podatke do najvišje sile smo obdelali z Jonesovim, podatke po njej pa s Pelegovim modelom.
2. Iz znane mase vlažne snovi smo izračunali glede na odstotek vlažnosti vsebnost suhe snovi. Pri tem smo obrnili enačbo (4), tako da smo dobili:

$$m_s = \frac{m_v}{1 + \frac{u}{100}}. \quad (7)$$

3. Čase in sile iz faze stiskanja smo upoštevali samo od trenutka, ko so sile stalno presegale 500 N. Na začetku meritve še namreč izmerjeni podatki niso bili posledica stiskanja. Če bi tudi te vključili v model, bi model zgradili s precejšnjo napako.
4. Tako smo torej vzeli vse izmerjene sile od trenutka, ko so začele presegati 500 N, iz pripadajočih časov pa smo določili lego bata in izračunali trenutni volumen stiskanca. Po enačbi (7) smo tudi preračunali nasuto maso suhe lesne snovi in v vsakem trenutku stiskanja določili trenutno gostoto stiskanca. Tako smo dobili za vsak zabeležen trenutek meritve pripadajočo gostoto in tlak. Kakor zahteva Jonesov model (5), smo izračunali njihove naravne logaritme in s pomočjo metode najmanjših kvadratnih odstopanj določili modelna parametra k_1 in k_2 (funkcija

LINEST v Microsoftovem Excelu). Modelne parametre smo izračunali in si jih shranili za vsako meritev posebej.

5. Potem smo vzeli vse izmerjene sile po trenutku, ko se je začelo sproščanje, in za vsak zabeležen vzorec meritve ugotovili čas in silo. Vse vzorce (čase in sile) smo upoštevali v Pelegovem modelu (6), tako da smo s pomočjo metode najmanjših kvadratnih odstopanj tudi tukaj izračunali modelna parametra k_3 in k_4 . Modelne parametre smo izračunali in si jih shranili za vsako meritev posebej.
6. Nazadnje smo določili gostoto, ki ustreza 40 g suhe snovi pri dolžini stiskanca 55 mm, tj. $0,37 \text{ g/cm}^3$. Ker smo pri vseh poskusih uporabili več kot 40 g suhe snovi, smo pri vseh to gostoto zanesljivo dosegli. Vstavili smo jo v Jonesov model za vsako meritev posebej in izračunali, kakšna sila bi glede na dani model ustrezala tej gostoti. Te sile smo privzeli kot normirane največje pred sproščanjem, tj. F_{mp} .
7. Normirane največje sile smo vstavili kot začetne sile v Pelegov model sproščanja. Ker vse meritve niso trajale popolnoma enako dolgo, smo morali izbrati trenutek, ki opredeljuje konec sproščanja in ki ga še vsebujejo vse meritve. Ugotovili smo, da je tak trenutek oddaljen 229 s od dejansko dosežene najvišje sile pred sproščanjem. Zato smo za končni čas sproščanja vzeli:

$$t_k = t_m + 229 [s], \quad (8)$$

če t_m ustreza času največje sile pred sproščanjem. Ta čas smo pri vsaki meritvi vstavili v model (6) in s prej določenimi modelnimi parametri (točka 4 zgoraj) izračunali normirane končne sile F_{kp} po sproščanju: $F_{kp} = F(t_k)$.

4 REZULTATI IN INTERPRETACIJA MERITEV

Pri laboratorijskem izdelovanju stiskancev smo merili sile med stiskanjem in v fazi sproščanja. Grafični poteki vseh meritev so prikazani v prilogi. Zanimalo nas je, kako vlažnost in temperatura vzorcev vplivata na stisljivost in kompaktnost stiskancev. Stisljivost je definirana kot sprememba gostote stiskanca pri določenem tlaku, kompaktnost pa je sorazmerna mehanski trdnosti stiskancev pri določenem tlaku (Shaw, 2008). Tlak v stiskancih je premo sorazmeren silam, ki smo jih pri naših poskusih izmerili pred sproščanjem in po njem. To pomeni, da lahko na osnovi izmerjenih sil, potrebnih za stiskanje vzorca na določeno dolžino, sklepamo o stisljivosti in kompaktnosti (trdnosti) stiskancev. Poleg tega smo tudi izmerili, koliko so se stiskanci raztegnili, ko smo jih po stiskanju vzeli iz stiskalne naprave, kar je dodaten pokazatelj njihove trdnosti, saj je raztezek obratno sorazmeren asimptotičnemu modulu, ki kaže na trdnost snovi (Shaw in Tabil, 2007).

4.1 DIMENZIJE IN MASE STISKANCEV

Opravili smo 60 poskusov, tako da smo za vsako kombinacijo petih vlažnosti in štirih temperatur izvedli po tri meritve (preglednica 7). Pri tem smo uporabili različne količine žagovine (stolpec 4 v preglednici) in po sproščanju, ko smo stiskance vzeli iz valja, zanje izmerili različne dolžine (stolpec 5 v preglednici).

Preglednica 10: Mase in dolžine stiskancev, potem ko so bili po stiskanju vzeti iz valja

Vlažnost [%]	Temperatura [°C]	Meritev	Mase stiskancev [g]	Dolžine stiskancev [mm]
9,8	50	1	53,15	72,50
		2	52,33	70,40
		3	53,09	71,50
	60	1	60,12	67,00
		2	67,20	66,60
		3	65,28	67,60
	70	1	55,70	66,30
		2	64,00	65,20
		3	60,02	65,20
	80	1	57,00	64,60

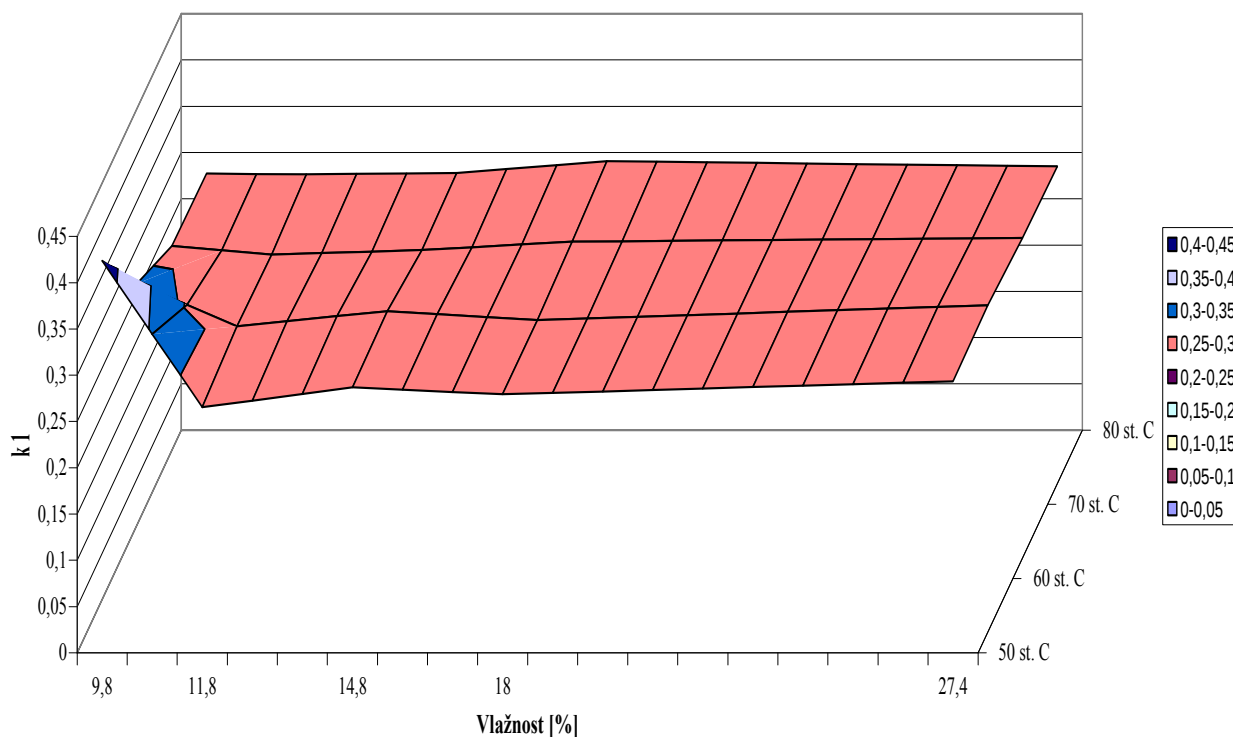
Vlažnost [%]	Temperatura [°C]	Meritev	Mase stiskancev [g]	Dolžine stiskancev [mm]
		2	65,16	59,00
		3	64,00	59,50
11,8	50	1	71,26	57,30
		2	71,23	68,80
		3	72,60	68,20
	60	1	63,10	57,30
		2	70,50	55,90
		3	72,30	55,80
	70	1	71,04	60,20
		2	68,54	60,60
		3	75,60	57,40
	80	1	62,90	59,30
		2	64,60	59,70
		3	70,30	60,10
14,8	50	1	48,30	68,10
		2	58,80	68,50
		3	58,90	67,70
	60	1	58,50	66,00
		2	53,01	66,40
		3	51,90	66,20
	70	1	62,02	66,10
		2	67,40	66,40

Vlažnost [%]	Temperatura [°C]	Meritev	Mase stiskancev [g]	Dolžine stiskancev [mm]
		3	69,70	67,80
	80	1	59,00	66,20
		2	60,00	66,70
		3	69,80	68,50
18	50	1	66,60	68,50
		2	50,60	68,30
		3	64,60	69,30
	60	1	53,24	66,80
		2	65,30	70,10
		3	63,20	69,20
	70	1	56,50	71,20
		2	56,60	70,90
		3	61,30	68,90
	80	1	51,80	69,60
		2	54,30	71,80
		3	52,40	72,80
27,4	50	1	63,50	90,90
		2	58,20	94,50
		3	66,40	93,20
	60	1	57,90	razpadlo
		2	64,00	razpadlo
		3	60,00	razpadlo

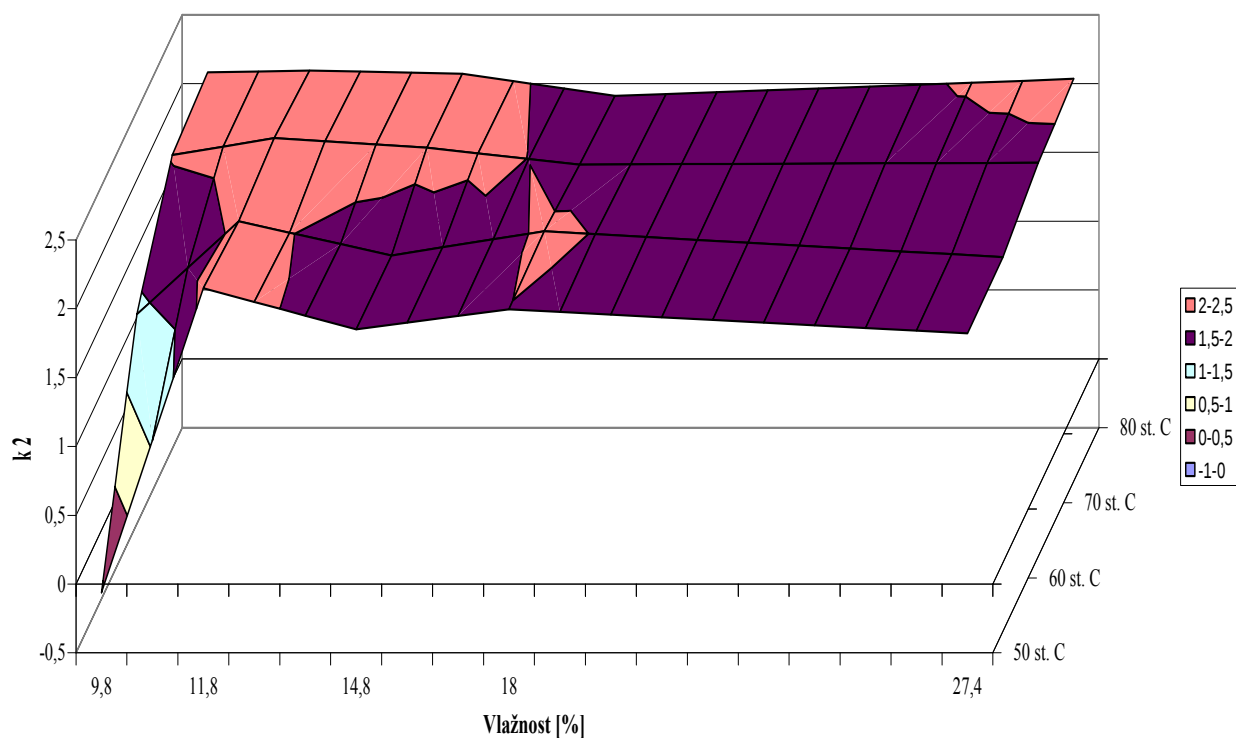
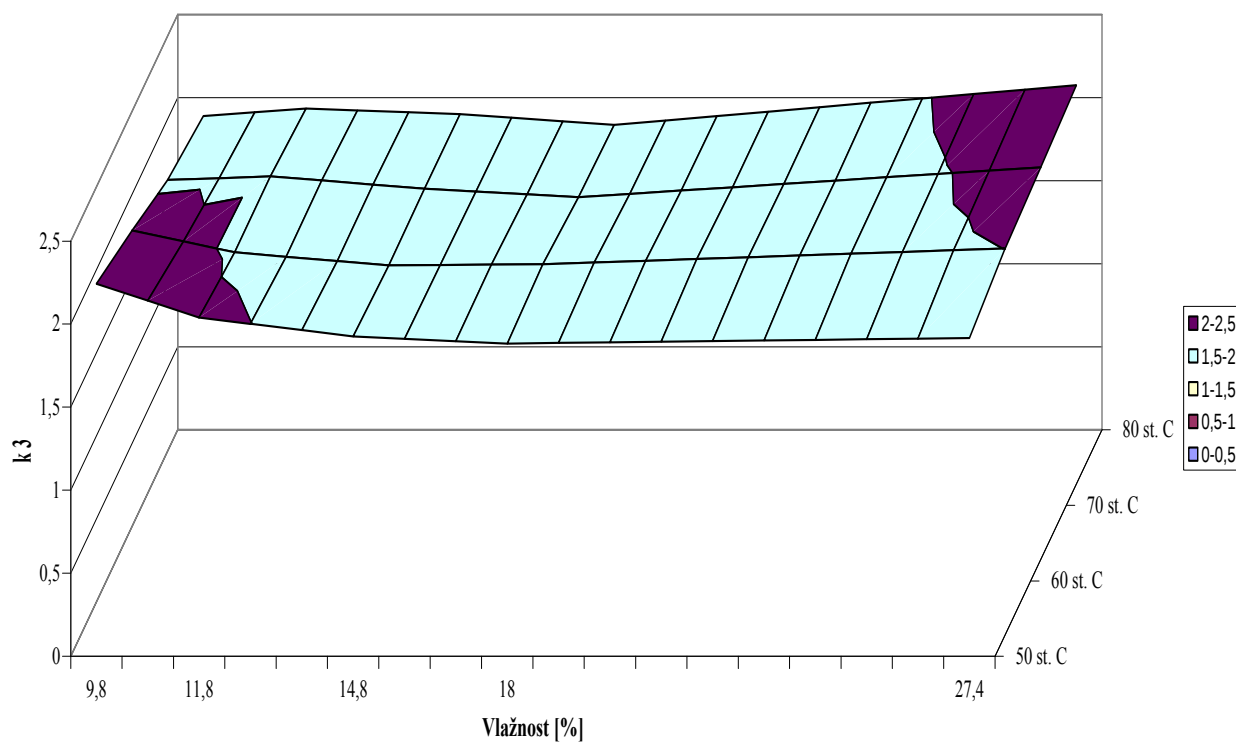
Vlažnost [%]	Temperatura [°C]	Meritev	Mase stiskancev [g]	Dolžine stiskancev [mm]
	70	1	56,76	razpadlo
		2	67,30	razpadlo
		3	65,50	razpadlo
	80	1	67,10	razpadlo
		2	65,30	razpadlo
		3	70,10	razpadlo

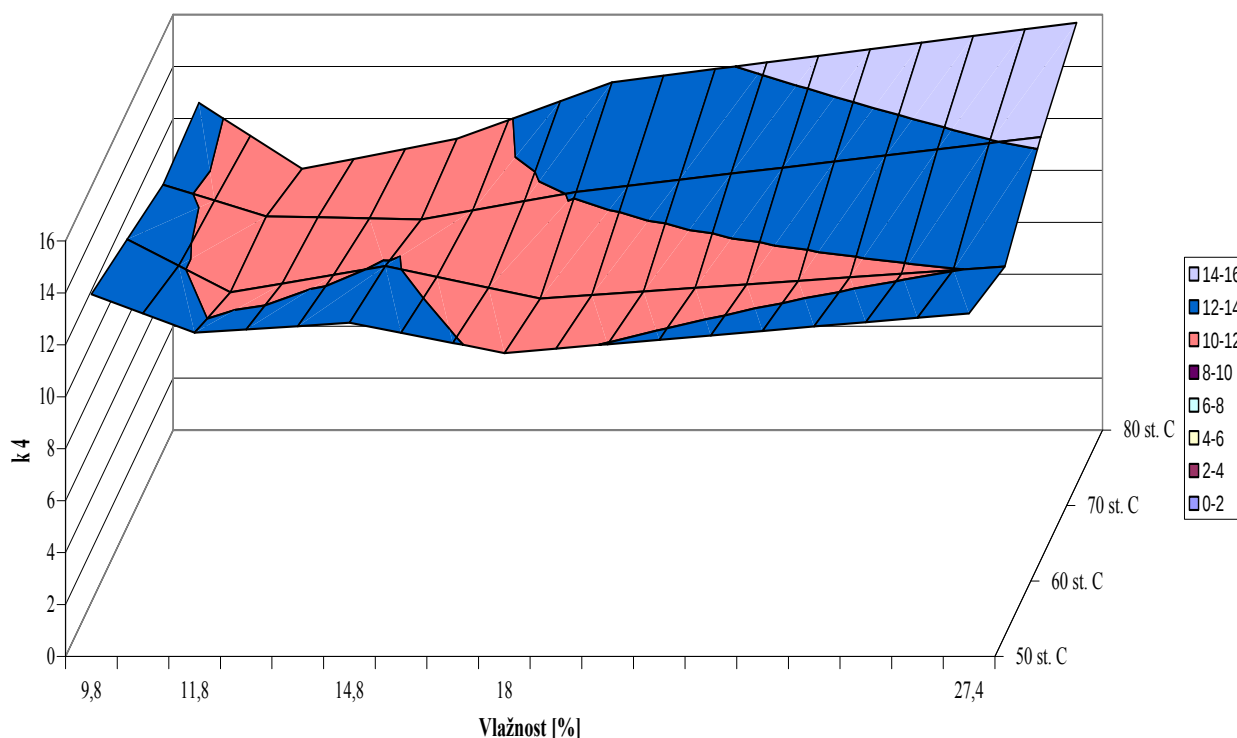
4.2 PARAMETRI JONESOVIH IN PELEGOVIH MODELOV

Za normiranje meritev smo uporabili Jonesov in Pelegov model, kakor je razloženo v podpoglavju 3.4. Jonesovi modelni parametri (k_1 , k_2) in Pelegovi modelni parametri (k_3 , k_4) so odvisni od vlažnosti in temperature vzorca, ki smo ga stiskali. Izračunali smo njihova povprečja za trojice meritev, ki so bile opravljene pri vsaki izmed 20 kombinacij vlage in temperature. Grafično jih prikazujejo slike 21, 22, 23 in 24.



Slika 21: Grafični prikaz Jonesovega modelnega parametra k_1 v odvisnosti od vlažnosti in temperature

Slika 22: Grafični prikaz Jonesovega modelnega parametra k_2 v odvisnosti od vlažnosti in temperatureSlika 23: Grafični prikaz Pelegovega modelnega parametra k_3 v odvisnosti od vlažnosti in temperature

Slika 24: Grafični prikaz Pelegovega modelnega parametra k_4 v odvisnosti od vlažnosti in temperature

Iz vrednosti modelnih parametrov lahko sklepamo glede na njihove definicije naslednje:

- k_1 se praktično ne spreminja, kar je pričakovano, saj je proporcionalen stisljivosti materiala, ki je bil pri vseh naših poskusih enak;
- k_2 nakazuje, da gostota materiala pri enakem tlaku narašča s temperaturo, ni pa odvisna od vlažnosti;
- k_3 ima za vse kombinacije temperature in vlažnosti vrednosti okoli 2, kar govori o ne bistveno različni trdnosti izdelanih stiskancev;
- k_4 je večji pri višjih temperaturah in pri večjih vlažnostih, kar pomeni, da tedaj sproščanje poteka počasneje (plastične deformacije so počasnejše).

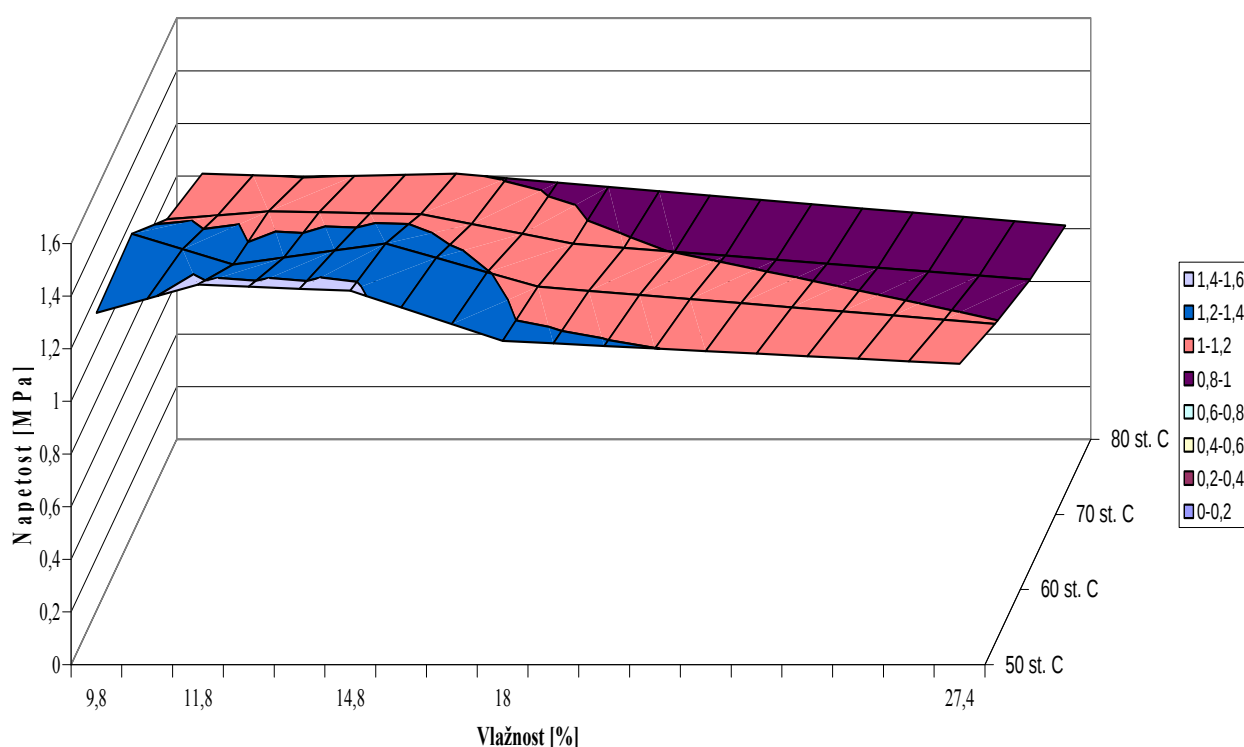
4.3 NAPETOSTI V STISKANCIH PRED SPROŠČANJEM IN PO NJEM

Ko smo lesno maso stiskali s stalno hitrostjo spuščanja bata v valju, je napetost v njej rasla tako, kakor opisuje Jonesov model (5). Čim manjši je volumen stiskanca, tem večja je napetost v njem, vendar pa zveza ni linearna. Zato smo morali pri normiranju napetosti za različne količine lesne mase (podpoglavje 3.4) uvesti postopke, ki upoštevajo nelinearne razmere.

Sproščanje notranje napetosti v materialu je definirano kot sprememba napetosti pri stalni prostornini (Shaw, 2008). Pri naših poskusih smo jo opazovali tako, da se je bat po 240 mm stiskanja ustavil in miroval, dokler nismo meritve ročno prekinili. Ko je bat miroval, je vzdrževal stalno prostornino in gostoto lesne mase. Ta pa je zaradi svoje notranje napetosti pritiskala na stene valja, na njegovo dno in na bat. Slednje je zabeležil testirni stroj kot izmerjeno silo. Med sproščanjem notranja napetost v materialu popušča, zato smo beležili

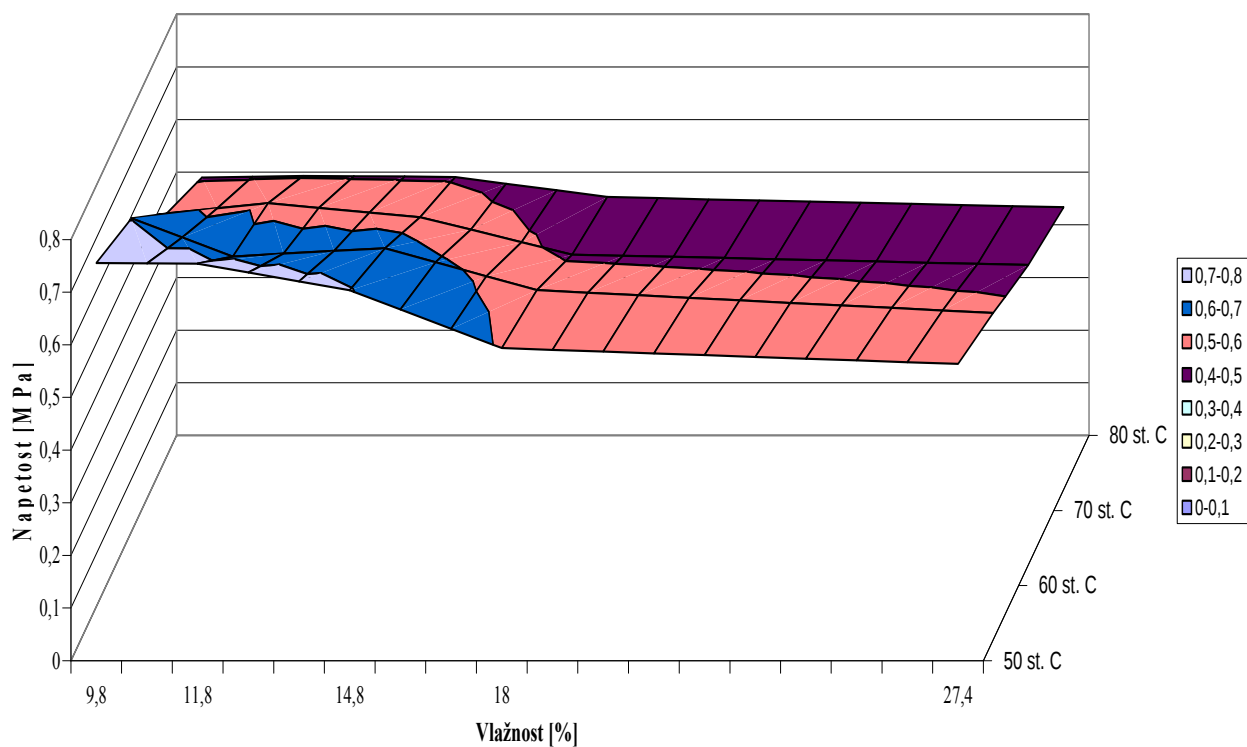
upadanje sile, s katero je stiskanec pritiskal na bat. Njen upadajoči potek dobro opisuje Pelegov model (6), fazi stiskanja in sproščanja pa nazorno prikazuje slika 19.

Napetosti pred sproščanjem kaže grafikon na sliki 25 za normirane vrednosti z Jonesovim modelom. Površinski graf ponazarja, kako so bile največje napetosti odvisne od vlažnosti in temperature vzorcev. Napetosti so izračunane kot povprečja iz treh meritev, izvedenih za vsako kombinacijo vlažnosti in temperature. Izračunali smo tudi standardni odklon napetosti znotraj skupin treh meritev, ki smo jih izvedli pri enaki vlažnosti in temperaturi. Odklon znaša v povprečju 0,03 MPa, kar je okoli 2 % najvišje dosežene napetosti pred sproščanjem. Ker je tako majhen, ga nismo narisali v grafikone s povprečnimi napetostmi, dokazuje pa, da so bile opravljene meritve zelo stabilne in da smo ob enakih pogojih izmerili enake sile oziroma napetosti.

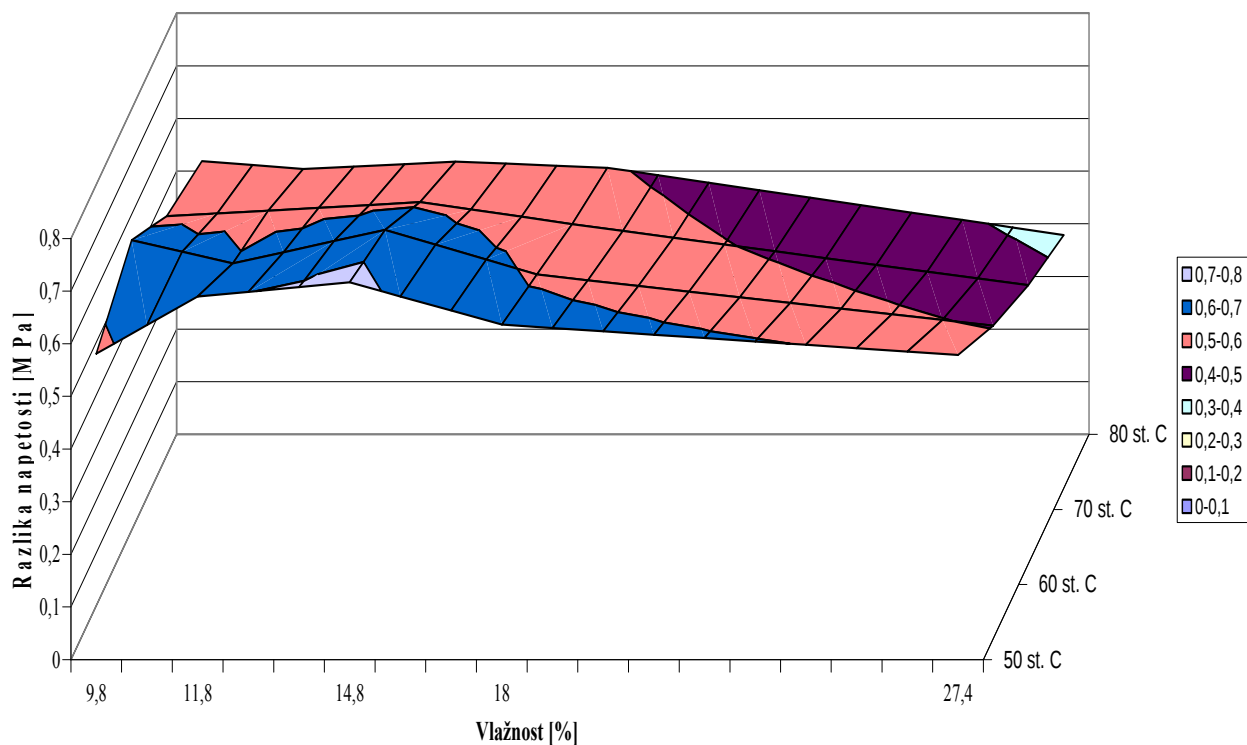


Slika 25: Normirane napetosti, dosežene v stiskancu tik pred začetkom sproščanja. Normirane vrednosti so meritev pri enaki vlažnosti in temperaturi.

Podobno kot grafikon za prikaz največjih napetosti pred sproščanjem je zasnovan tudi grafikon, ki na sliki 26 kaže napetosti, zadržane v stiskancih na koncu faze sproščanja. Slika vsebuje podatke o normiranih napetostih, kakor so bile preračunane po Pelegovem modelu za sproščanje in so izračunane kot povprečja iz treh meritev, izvedenih za vsako kombinacijo vlažnosti in temperature. Izračunali smo tudi standardni odklon napetosti znotraj skupin treh meritev, ki smo jih izvedli pri enaki vlažnosti in temperaturi. Odklon znaša v povprečju 0,02 MPa, kar je okoli 2,5 % najvišje dosežene napetosti na koncu faze sproščanja. Ker je tako majhen, ga nismo narisali v grafikone s povprečnimi napetostmi, dokazuje pa, da je tudi sproščanje potekalo zelo stabilno in da smo ob enakih pogojih izmerili enake vrednosti.



Slika 26: Normirane napetosti, dosežene v stiskancu ob izteku sproščanja. Normirane vrednosti so bile dobljene s pomočjo postopka, ki upošteva Pelegov model sproščanja napetosti v lesni masi, in so prikazane kot povprečje treh meritev pri enaki vlažnosti in temperaturi.

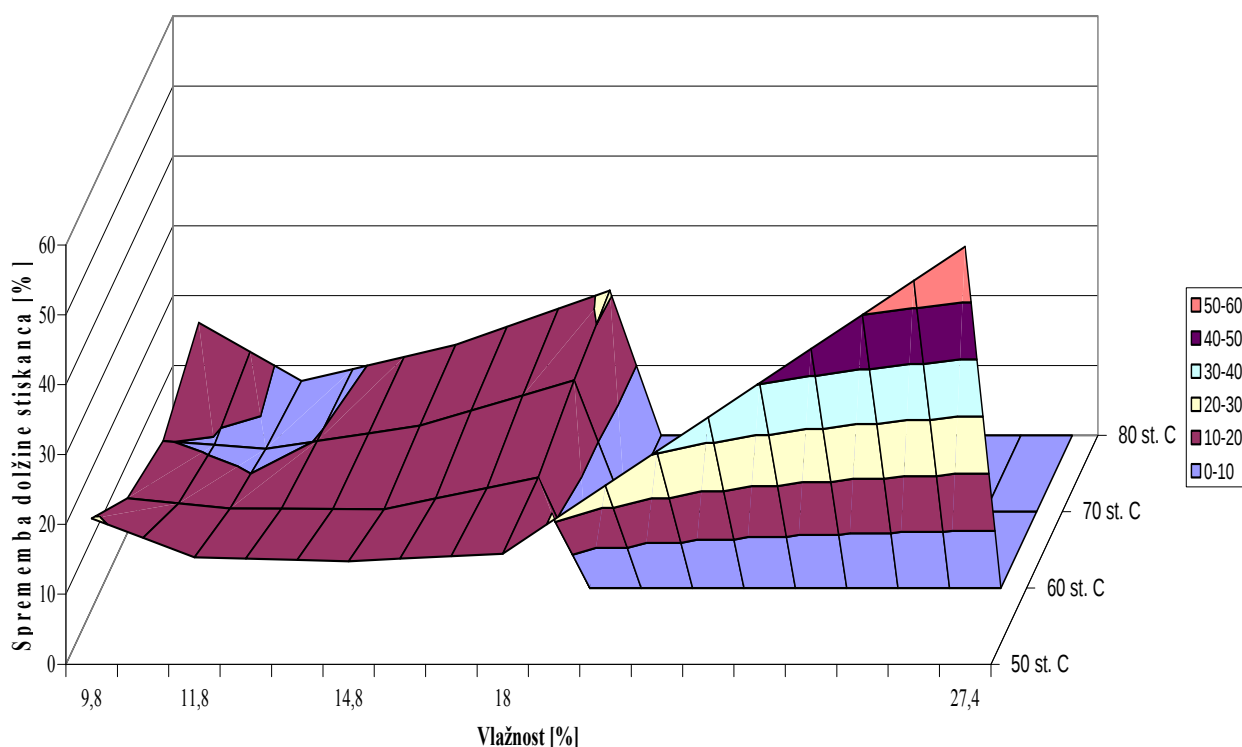


Slika 27: Razlika med napetostmi pred sproščanjem in po njem. Normirane vrednosti so bile dobljene s pomočjo postopka, ki upošteva Jonesov model stiskanja in Pelegov model sproščanja napetosti v lesni masi. Prikazane so kot povprečje treh meritev pri enaki vlažnosti in temperaturi.

Podatke o napetostih pred sproščanjem in po njem smo nazadnje združili, tako da smo na sliki 27 prikazali njihovo razliko. Na tej sliki torej vidimo razliko grafov s slik 25 in 26. Gre za tisti del napetosti, ki je med sproščanjem povzročil plastične spremembe stiskancev. Rezultate podrobneje razlagamo v poglavju 5.

4.4 SPREMEMBE DOLŽIN STISKANCEV PO STISKANJU

Ko smo fazo sproščanja po približno treh minutah opazovanja končali, je testirni stroj dvignil bat iz valja. Tik pred tem je bila dolžina stiskancev določena s položajem bata in je v večini meritev znašala 55 mm. Pri nekaj meritvah smo začeli stiskanje pomotoma iz nižjega položaja, tako da so nekateri stiskanci bili krajši do 10 mm, vendar smo vse te razlike upoštevali pri postopkih za poenotenje sil oziroma napetosti.

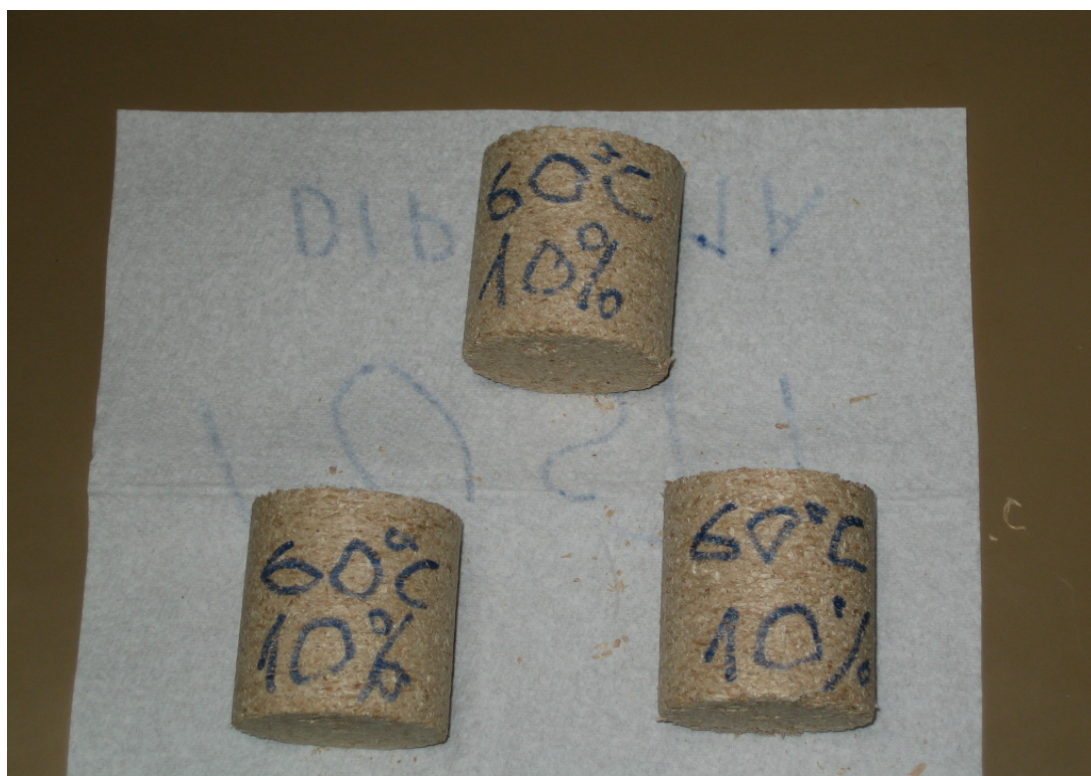


Slika 28: Spremembe med dolžino, na katero so bili stiskanci stisnjeni, in dolžino, na katero so se raztegnili, potem ko smo jih vzeli iz valja.

Končne napetosti, ki smo jih izmerili po sproščanju, so pomenile, da so stiskanci takrat pritiskali na bat (in stene valja ter podlago) z določeno silo. Ker je faza sproščanja praktično izzvenela, lahko trdimo, da gre za sile, ki jih prenese stiskanec brez nadaljnjih plastičnih deformacij. Zato je jasno, da so se v trenutku, ko smo bat dvignili, stiskanci tudi nekoliko raztegnili. Pozneje, ko smo jih potisnili iz valja, smo izmerili njihovo dolžino s kljunastim merilom (preglednica 10). Izmerjeno dolžino smo primerjali z dolžino, na katero jih je stisnil stroj, in izračunali odstotek raztezka. Grafikon na sliki 28 prikazuje, za koliko odstotkov so se stiskanci podaljšali, ko smo jih vzeli iz valja. Pri vlažnosti 9,8 % se pojavlja najslabša kompaktnost ob temperaturi 50 °C. Pri vlažnosti 18 % pa je kompaktnost pri 50 °C že boljša kot pri višjih temperaturah, vendar pa slabša kot pri vlažnostih pod 15 % in hkrati temperaturah nad 50 °C. Najslabša kompaktnost nasploh pa



Slika 29: Prikaz stiskancev, izdelanih pri vlažnosti 27,4 % in temperaturah, višjih od 50 °C – ko smo jih potisnili iz stiskalne naprave, so se popolnoma razsuli.



Slika 30: Primer stiskancev, izdelanih pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 60 °C – kažejo primerno kompaktnost oziroma trdnost.

se pojavlja pri vlažnosti 27,4 %, kjer je prišlo do razpada stiskancev (slika 29). Rezultate podrobneje razlagamo v poglavju 5.

Na sliki 30 prikazujemo primer stiskancev, izdelanih pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 60 °C. Izkazujejo primerno kompaktnost.

Poudariti pa je treba, da smo meritve opravljali pri zelo nizkih tlakih, ki po normiranju niso presegali 1,51 MPa. V literaturi opisani poskusi (Rhén in sodelavci, 2005; Yadong in Henry, 2000) navajajo tlake od 14 do 140 MPa, kot najboljše za izdelavo peletov pa omenjajo tlake med 30 in 50 MPa. Če bi bili tudi sami uporabili takšne tlake, bi dosegli večje trdnosti stiskancev in gotovo ne bi pri nobeni kombinaciji vlažnosti in temperature po stiskanju razpadli. Zato bi kazalo v bodoče izkoristiti laboratorijsko opremo, ki smo jo izdelali za naše poskuse, in preveriti, kako se obnašajo stiskanci, če so izdelani pri različnih tlakih.

5 RAZPRAVE IN SKLEPI

Po pregledu in primerjavi tehnologij za izdelavo lesnih kuriv smo ugotovili, da so se v zadnjih letih zelo izpopolnile. Najbolj tradicionalna je ostala tehnologija za izdelavo polen in cepanic, vendar so tudi na tem področju stroji in pripomočki izpodrinili klasično ročno podiranje dreves in izdelavo polen. Največji tehnološki napredek je gotovo dosežen v postopkih za izdelavo lesnih sekancev in stiskancev, saj postajajo energijsko in uporabno enakovredni fosilnim gorivom. Tehnologija za izdelavo peletov omogoča, da je sistem za ogrevanje s peleti povsem avtomatiziran in zelo prijazen za uporabnika, saj so peleti majhni in imajo visoko kurilno vrednost (4,7 kWh/kg). Peleti so od vseh, v tej diplomski nalogi analiziranih lesnih kuriv, najkvalitetnejše standardizirano kurivo, ki nima samo visoke kurilne vrednosti, ampak je sprejemljivo tudi z okoljevarstvenega vidika. Po kurilni vrednosti jim sledijo briketi, ki pa zaradi večjih dimenzij niso primerni za avtomatizirane sisteme za kurjenje. S tega vidika so primernejši sekanci, ki imajo s 3,7 kWh/kg sicer nižjo kurilno vrednost kot peleti, ravno tako pa dopuščajo avtomatizirano kurjenje.

Znano je, da imajo pomembno vlogo pri izdelavi lesnih kuriv fizikalno-kemične in biološke lastnosti lesa, saj les z večjo gostoto in dobro ohranjenostjo daje več toplotne energije oziroma ima večjo kurilno vrednost kot pa les drevesne vrste z nižjo gostoto in slabše kakovosti. Tudi vhodne surovine so pri različnih vrstah lesnih kuriv različne, saj je kvalitetne pelete možno izdelovati le iz žagovine in lesnega prahu, medtem ko se za sekance lahko uporabi les slabše kakovosti v gozdu in lesni predelovalni industriji. Pri izdelavi stiskancev je še posebej pomembno, da poskrbimo za njihovo dolgotrajno kompaktnost in trdnost. Le tako jih lahko dalj časa skladiščimo, pred tem brez težav transportiramo in nazadnje nemoteno uporabimo z njihovo polno kurilno vrednostjo.

V podpoglavju 2.3.4.1 smo omenili študiji, ki ugotavljata, kakšni so najugodnejši parametri pri izdelavi peletov (Yadong in Henry, 2000; Rhén in sodelavci, 2005). Raziskovali so odvisnost kakovosti stiskancev od vhodne vlažnosti lesne mase, od temperature in tlakov pri stiskanju ter od hitrosti stiskanja. Tudi sami smo v laboratorijskih razmerah preverili, kakšne učinke imata lesna vlažnost in temperatura pri izdelavi stiskancev. Poskuse smo zasnovali tako, da smo presejano bukovo žagovino uravnovesili na različne vlažnosti in jo ob različnih temperaturah stiskali do volumna 108 cm³ (poglavje 3).

Ker smo se odločili, da pri stiskanju upoštevamo enak končni volumen stiskancev, smo vedno pazili le, da smo nasuli poln valj materiala, nismo pa bili pozorni na njegovo težo, zato smo izdelali stiskance z različno maso. To je preprečilo, da bi lahko izmerjene sile oziroma tlake med posameznimi meritvami neposredno primerjali med seboj. Predhodno smo jih morali normirati. Preračune smo opravili tako, da smo najprej iz vseh izmerjenih podatkov zgradili za vsako meritev po dva modela, in sicer Jonesovega za stiskanje in Pelegovega za sproščanje, potem pa smo s pomočjo modelov izračunali normirane sile, ki bi se pojavile pri primerjalni gostoti stiskancev. Z modeliranjem procesov stiskanja in sproščanja smo dobili modele, s katerimi smo nato lahko simulirali razmere, ki jih v realnosti nismo opazovali. Tako smo lahko izračunali, kakšne sile bi se pojavljale med stiskanjem in sproščanjem pri katerikoli količini stiskane snovi. Poleg tega pa ima izračun Jonesovih in Pelegovih modelov še eno prednost. Izračunani modelni parametri so odvisni od procesa, ki ga opazujemo – v našem primeru od obnašanja lesne mase med stiskanjem in sproščanjem. Glede na vrednosti teh parametrov lahko sklepamo o stisljivosti materiala,

o gostoti, doseženi pri enakem tlaku, o končni kompaktnosti oziroma trdnosti stiskancev in o hitrosti sproščanja.

Za skupine treh meritev, ki smo jih opravili pri isti vlažnosti in temperaturi, smo iz izmerjenih sil izračunali povprečne napetosti pred sproščanjem in na njegovem koncu. Določili smo tudi standardni odklon znotraj skupin treh meritev. Odkloni so bili majhni, okoli 2 % najvišjih sil, doseženih pred sproščanjem, in okoli 2,5 % sil ob koncu sproščanja. To dokazuje, da je izdelava stiskancev potekala zelo stabilno in da smo ob enakih pogojih izmerili enake vrednosti.

Iz poteka grafa na sliki 25 razberemo, da smo ob stiskanju vzorcev dosegli večje napetosti pri nižjih temperaturah. To pomeni, da je pri nižjih temperaturah lesna masa manj stisljiva. Največje dosežene napetosti so opazno nižje tudi pri večjih vlažnostih. Kaže, da se absolutno najvišja napetost (približno 1,5 MPa za normirane vrednosti) pojavi v območju okoli 12 % vlažnosti pri temperaturi stiskanja 50 °C. Sklepali bi lahko še, da je najvišja napetost, dosežena pred sproščanjem, precej manj odvisna od vlažnosti lesne mase, če stiskamo pri višji temperaturi. Še posebej velja to za 80 °C. To kaže na dejstvo, da je stisljivost lesne mase bolj odvisna od temperature kot od vlažnosti (sicer pa se z višanjem ene in druge povečuje tudi stisljivost).

Očitno je tudi, da je najvišja dosežena napetost v stiskancih večja, če je vlažnost lesne mase pod 15 %. V tem območju kaže večjo variabilnost in doseže absolutno največje vrednosti. V območju vlažnosti nad 15 % pa napetost z večanjem vlažnosti upada (stisljivost se povečuje), in to neodvisno od temperature med stiskanjem. Različne poteke grafa pod 15 % vlažnosti in nad njimi lahko morda delno pripisujemo dejstvu, da smo tri vlažnosti postavili na interval med 9,8 % in 14,8 %, naslednji dve pa precej višje, tj. na 18 % in 27,4 %. Na ta način smo skalo vlažnosti naredili precej nelinearno. Značilno je še, da je razmerje med največjo in najmanjšo doseženo normirano napetostjo pred sproščanjem približno 1 proti 0,8. To razmerje je tudi neodvisno od temperature pri stiskanju.

Če primerjamo napetosti pred sproščanjem in po njem, ugotovimo, da so se med sproščanjem znižale za okoli 50 %, in to ne glede na vlažnost in temperaturo (razliko napetosti kaže slika 27). Ker je to razmerje precej konstantno pri vseh meritvah, ki so v celoti prikazane v prilogi, sklepamo, da je tudi neodvisno od količine nasute lesne mase in doseženih najvišjih sil stiskanja. Ugotovitev se ne ujema s predvidevanji v literaturi (Shaw, 2008), ki pravi, da se pri večjih vlažnostih sprosti več napetosti. Edina razlika med izvedbo poskusov, opisanih v literaturi, in naših poskusov je v doseženih končnih tlakih pri stiskanju in drugačnih hitrostih povečevanja tlaka. Shaw (2008) ugotavlja, da se končna gostota stiskancev po stiskanju precej spremeni, če je hitrost povečevanja tlaka pod 5 MPa/s. Sklicuje se tudi na poskuse, pri katerih so bili končni tlaki med 30 in 150 MPa. Pri naših poskusih je bila najvišja dosežena hitrost stiskanja okoli 0,18 MPa/s, najvišji doseženi, nenormirani tlaki pa so bili okoli 13 MPa. Oboje bi lahko obšli, če bi imel uporabljeni valj manjši presek.

Graf, ki kaže napetosti po sproščanju, poteka podobno, kot je opisano za napetosti pred sproščanjem. Napetosti so ves čas sproščanja večje pri nižjih temperaturah ne glede na odstotek vlažnosti. Spet opažamo precej večjo variabilnost v območju pod 15 % vlažnosti in značilno zniževanje napetosti v območju nad 15 %.

Napetosti po sproščanju so nižje za večje vlažnosti in višje temperature, kar pa je verjetno predvsem posledica dejstva, da so takšna razmerja kazale že napetosti, dosežene s stiskanjem pred sproščanjem. Vendar pa tukaj ne opažamo takšnega temperaturno neodvisnega razmerja med napetostmi pri najmanjši in največji vlažnosti kot pri napetostih pred sproščanjem. Pri 50 °C znaša približno 1 proti 0,7, medtem ko pri 80 °C beležimo le razmerje 1 proti 0,9. Nasploh kažejo napetosti po sproščanju manjšo odvisnost od vlažnosti pri višjih temperaturah.

Preglejmo rezultate poskusov, prikazanih na slikah 25 in 26, še z izotermičnega stališča. Opazujemo napetosti, ki so bile izmerjene pri enaki temperaturi. Odvisnost notranjih napetosti od vlažnosti lesne mase je pri enaki temperaturi zelo podobna tako pred sproščanjem (slika 25) kot po njem (slika 26). Največja napetost je dosežena pri 11,8-odstotni vlažnosti. Od tega odstopajo le meritve pri 60 °C, ki izkazujejo največje napetosti pri vlažnosti 9,8 %. Odstopanje se pojavlja pri vseh meritvah za to kombinacijo vlažnosti in temperature, tako da ne gre le za učinek posamezne popolnoma napačne meritve. Res pa je, da so bila ravno stiskanja pri vlažnosti 11,8 % tista, pri katerih smo nekajkrat pognali bat iz napačne (nižje) začetne točke in smo zato dosegli bistveno večje tlake kot pri drugih meritvah. Najizrazitejša tovrstna odstopanja so se pojavila po enkrat pri temperaturah 50 in 70 °C, dvakrat pa pri 60 °C. Kljub temu menimo, da smo s postopki normiranja meritev takšna odstopanja upoštevali pravilno. Zato ne znamo razložiti, zakaj je prišlo do odstopanj največje napetosti pri 60 °C.

Značilno je tudi, da se spreminjajo napetosti v odvisnosti od vlažnosti pri vseh temperaturah na podoben način. Napetosti se od vlažnosti 11,8 % do vlažnosti 18 % spremenijo za dvakrat večjo vrednost kot od vlažnosti 18 % do vlažnosti 27,4 %. Glede na maksimalne napetosti pomeni to znižanje napetosti za okoli 12 % in 6 %. Ugotovitev velja tako za napetosti pred sproščanjem (slika 25) kot za napetosti po sproščanju (slika 26). Sklepamo, da v izotermičnih razmerah vplivajo na napetost pred sproščanjem in po njem veliko bolj vlažnosti pod 15 % kot nad to mejo. Slika 27 potrjuje to domnevo, saj vidimo, da se sprosti nekoliko več napetosti pri nižjih vlažnostih. Seveda pa je to gotovo tudi posledica dejstva, da smo v fazi stiskanja dosegli višje tlake prav pri nižjih vlažnostih.

Po stiskanju smo stiskance vzeli iz valja in s kljunastim merilom izmerili njihovo dolžino. Ugotovili smo, za koliko so se podaljšali, ko smo prekinili meritev (preglednica 10). Ta podatek smo uporabili kot dodatno merilo za kompaktnost stiskancev, čeprav jo v osnovi določa že največji tlak, dosežen med stiskanjem. Izkazalo se je namreč, da ta najbolj vpliva na končne napetosti, ki po sproščanju ostanejo v stiskancih nesproščene. Le-te pa skupaj s spremembo dolžine stiskancev določajo asimptotični modul E_A (Shaw, 2008), ki je sorazmeren kompaktnosti in mehanski trdnosti stiskancev. Pri sklepanju o doseženi trdnosti stisnacev v odvisnosti od vlažnosti in temperature snovi nismo mogli neposredno uporabiti asimptotičnega modula E_A , ker nismo vseh vzorcev stisnili z enako maksimalno silo. Zato bi izračunana vrednost E_A bila pretežno odvisna od maksimalne sile, dosežene pri stiskanju vzorcev, ne pa od njihove vlažnosti in temperature.

Najprej razložimo spremembe dolžine stiskancev v izotermičnih razmerah. Kaže jih slika 28, če jih opazujemo vzdolž osi za vlažnost. Najmanjše spremembe so dosežene pri vlažnosti 11,8 %. Pri vlažnosti 9,8 % so spremembe večje, in sicer med 2 % in 9 %, če jih primerjamo s spremembami pri 11,8 % vlažnosti. Pri višjih vlažnostih so spremembe še izrazitejše, tako da pri vlažnosti 18 % dosežejo razpon med 1 % in 13 % glede na

minimum, dosežen pri 11,8 % vlažnosti. Vlažnost 27,4 % pa povzroči 40-odstotne spremembe dolžin ali celo razsutje stiskancev. Pojavi so izrazitejši pri višjih temperaturah. Manjšo kompaktnost pri višjih vlažnostih lahko razložimo z nižjimi napetostmi, ki so bile dosežene med stiskanjem. Dosežene nižje napetosti pa so posledica večje stisljivosti bolj vlažne in bolj segrete lesne mase (Shaw, 2008).

Primerjava slike 28 s sliko 26 omogoči lažje sklepanje o trdnosti izdelanih stiskancev. Vzemimo napetosti (tlake), ki smo jih izmerili na koncu sproščanja (sliki 26), in jih primerjajmo s spremembo dolžine stiskancev po jemanju iz stiskalne naprave (slika 28). Večje napetosti in hkrati manjše spremembe dolžine kažejo na večjo trdnost stiskanca. Najboljša razmerja so dosežena pri vlažnostih pod 15 % in niso bistveno odvisna od temperatur nad 50 °C. Pri vlažnosti 18 % in pri 50 °C se kaže boljša trdnost kot pri višjih temperaturah, vendar pa v celoti slabša kot za vlažnosti pod 15 %. Najslabša trdnost se pojavlja pri vlažnosti 27,4 %, kjer pride do razpada stiskancev (slika 29).

Ugotavljamo, da se naši izsledki o vplivu vlažnosti in temperature lesne mase na kompaktnost oziroma trdnost stiskancev večinoma skladajo z ugotovitvami v literaturi (Rhén in sodelavci, 2005; Yadong in Henry, 2000). Dodati pa je treba, da smo meritve opravljali pri zelo nizkih tlakih, ki po normiranju niso presegali 1,51 MPa, medtem literatura poroča o tlakih od 14 do 140 MPa, kot najboljše za izdelavo peletov pa omenjajo tlake med 30 in 50 MPa. Tudi hitrosti stiskanja (spreminjanja tlaka) so bile pri naših poskusih bistveno manjše, kot tiste, o katerih poroča literatura (Shaw, 2008).

Na koncu moramo zapisati, da pri laboratorijskih preizkusih nismo bili dovolj pazljivi. Če bi bili pri vsaki meritvi material vnaprej tehtali in vedno vzeli popolnoma enako količino suhe snovi (preračunati bi jo morali na ustrezno vlažnost) in če bi pazili, da bi vedno stisnili do popolnoma enake prostornine, bi bile izmerjene sile oziroma tlaki neposredno primerljivi. Odpadlo bi dodatno preračunavanje oziroma normiranje vrednosti, ki sprva ni bilo predvideno. Ne bi nam bilo treba zgraditi modelov in z njimi simulirati situacij, ki v resnici pri meritvah niso nastopale. Pri nadaljnjih preizkusih z izdelano stiskalno napravo bi bilo dobro to dejstvo strogo upoštevati. Hkrati bi morali dosegati večje napetosti, kakor jih priporočajo raziskovalci, tj. okoli 50 MPa. Na ta način bi zagotovili bistveno boljšo kakovost stiskancev in gotovo ne bi pri nobeni kombinaciji vlažnosti in temperature po stiskanju razpadli.

6 POVZETEK

Lesna kuriva že od nekdaj predstavljajo vir energije za ogrevanje. Njihova uporaba ob spoznanju, da zaloge fosilnih goriv upadajo, vse bolj narašča, tako v svetu kot tudi v Sloveniji. K povečani uporabi lesnih kuriv pa so v veliki meri pripomogle tudi izpopolnjene tehnologije izdelave, sušenja in kurjenja, ki omogočajo varnejšo, bolj udobno, varčnejšo in tudi z vidika emisij bolj prijazno obliko goriv.

V diplomski nalogi smo najprej opisali lesna kuriva, in sicer polena in cepanice, sekance, pelete in brikete. Nato smo prikazali za vsako vrsto kuriv znane tehnologije pridobivanja, sušenja, transporta in skladiščenja ter njihovo uporabo v sodobnih kurilnih napravah. Ker se lesna kuriva pridobivajo iz različnih vrst lesa in iz lesnih odpadkov v lesno predelovalni industriji, smo se v naslednjih podpoglavjih posvetili lastnostim lesa s fizikalno-kemičnega vidika, predvsem vplivu vlažnosti in gostote lesa na njegovo kurilno vrednost.

Za izdelavo modernih lesnih kuriv, kot so sekanci, peleti in briketi, so bili izdani standardi in predpisi, ki določajo lastnosti vhodnih materialov, tehnologije in kurilne vrednosti. Slovenija standardov za lesna kuriva nima, zgleduje pa se po tujih standardih, zato smo to področje na kratko pregledali v poglavju 2.4.

Izvedli smo serijo poskusov, pri katerih smo ugotavljali, kako je odvisna kvaliteta stiskancev od vlažnosti lesne mase in temperature med stiskanjem. V ta namen je bila v laboratorijih Biotehniške fakultete izdelana posebna stiskalna naprava, ki smo jo uporabili v testirnem stroju firme Zwick. Ker nismo zagotovili, da bi med poskusi stisnili vedno popolnoma enako maso suhe lesne snovi, izmerjene sile med stiskanjem in sproščanjem (relaksacijo) niso bile neposredno primerljive. Morali smo jih normirati, pri čemer smo procesa stiskanja in sproščanja modelirali po Jonesovem in Pelegovem modelu.

Končni, normirani rezultati so pokazali, da so bile dosežene največje napetosti pri vlažnostih pod 15 % in pri nižjih temperaturah. Napetosti, izmerjene na koncu sproščanja, smo primerjali še s spremembami dolžin, ki so jih pokazali stiskanci, ko smo jih vzeli iz stiskalne naprave. Menimo, da imajo večjo trdnost tisti stiskanci, pri katerih je bila napetost na koncu sproščanja večja in katerih dolžina se je manj spremenila **po vzetju** iz stiskalne naprave. Ob tej domnevi se izkaže, da smo najboljše trdnosti dosegli pri vlažnostih pod 15 % in temperaturah nad 50 °C.

7 VIRI

- Butala V., Turk J. 1998. Lesna biomasa – neizkoriščen domači vir energije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Femopet Slovenija: 24 str.
- Butala V., Turk J. 2002. Oplemenitena lesna biomasa: vir za klimatske spremembe in podjetniški izziv [prevod in priredba Vincenc Butala, Jani Turk, Uroš Stritih]. – Ljubljana: Konzorcij OPET Slovenija, 2002. Prevod in priredba dela: Refined biomass – a source for climate change and business opportunities. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo
- Dolenšek M., Golob A., Medved M., Pogačnik N., Šumenjak M. 1999. Energija iz lesne biomase. Slovenj Gradec Kmetovalčev priročnik. Slovenj Gradec: 28 str.
- Kopše I., Krajnc N. 2005. Ogrevanje z lesom. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije, Agencija za učinkovito rabo in obnovljive vire energije. Gozdarski inštitut Slovenije: 21 str.
- Kovač Š. 2006. Les – od gozda do peči. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, projekt GEF: 43 str.
- Krajnc N. 2001. Lesni peleti: strokovna monografija. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije, IV: 24 str.
- Krajnc N. 2005. Standardi na področju trdih biogoriv. Bilten: Učinkovito z energijo, 6: str. 2
- Krajnc N., Dolenšek M. 2001. Sodobna raba lesne biomase (potenciali in tehnologije). V: Zbornik simpozija Trendi v razvoju kmetijske tehnike. Poje Tomaž (ur.). Radenci, 14. in 15. junij 2001. Ljubljana, Društvo kmetijske tehnike Slovenije: 113-121
- Krajnc N., Medved M., Golob A., Pogačnik N., Šumenjak M. 1999. Energija iz lesne biomase. Slovenj Gradec, Kmetijska založba (Kmetovalčev priročnik): 5-11
- Krajnc N., Kopše I. 2005. Les – domač, obnovljiv in okolju prijazen vir energije. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije: Agencija za učinkovito rabo in obnovljive vire energije, Gozdarski inštitut Slovenije: 13 str.
- Krajnc N., Kovač Š. 2003. Lesna biomasa – okolju prijazen obnovljivi vir energije: strokovna monografija. Slovenska Bistrica, Občina: 23 str.
- Krajnc N., Krajnc R. 2000. Lesna biomasa – star vir v novi preobleki. Ljubljana, Kemikalije naše vsakdanje, Urad za kemikalije RS: 2 str.
- Krajnc R., Krajnc N. 2000. Procesorji za izdelavo polen. Ljubljana, Gozdarski vestnik, 58, 2: 96-97
- Krajnc R., Krajnc N. 2000. Sekalniki – stroji za izdelavo lesnih sekancev. Ljubljana, Gozdarski vestnik, 58, 1: 39-40
- Krajnc N., Krajnc R. 2003. Tehnologije pridobivanja lesnega kuriva. Gozd in obnovljivi viri, 2003, 4: 9-11
- Marutzky R., Seeger K. 1999. Energie aus Holz und anderer Biomasse. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co Leinfelden-Echterdingen: 59-94

- Polanc J., Leban I. 2004. Les – zgradba in lastnosti. Ljubljana, Lesarska založba: str. 23
- Rhén C., Gref R., Sjöström M., Wästerlund I. 2005. Fuel Processing Tehnology, 87, 1: 11-16
- Senegačnik A., Oman J. 2005. Lesna biomasa. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 135 str.
- Shaw M. D. 2008. Feedstock and Process Variables Influencing Biomass Densification. MSc Thesis. University of Saskatchewan: 103 str.
- Shaw M. D., Tabil L. G. 2007. Compression, Relaxation, and Adhesion Properties of Selected Biomass Grinds. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Manuscript FP 07 006, 9: 1-16
- Stritih U., Butala V. 2002. Proizvodnja peletov v Sloveniji. Publikacija: Obnovljivi viri energije, 1: 1-3
- Yadong L., Henry L. 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy, 19, 3: 177-186

SPLETNI NASLOVI

- Bider – kmetijski stroji. 2006. MVM.SI.
<http://www.bider.si> (3. jul. 2007)
- Bio Fuels. 2007. BRUKS Klöckner GmbH (11. jun. 2009).
<http://www.bruks.com/Industry-Segments/Bio-Fuels/> (10. jan. 2008)
- Biomasseaufbereitung. 2008. Rudnick & Enners (4. jun. 2009).
<http://www.rudnick-enners.de/de/frame/branchen/biomasseaufbereitung-kraftwerksanlagen-fuer-energieproduzenten.html> (10. jan. 2008)
- Grum A. 2006. Lesna biomasa. Ministrstvo za okolje in prostor.
<http://www.biomasa.zgs.gov.si> (15. apr. 2008)
- Izdelki, rezilno-cepilni stroji, RCA 380. 2003. Tajfun (10. jul. 2003).
http://www.tajfun.com/sl/program.asp?program=rdec&id_strani_var=96 (10. maj 2007)
- Katalog produktov lesne biomase. 2005. Portal Borzen OVE – Trgovanje z biomaso (15. jun. 2009).
<http://ove.borzen.si> (3. jul. 2007)
- Kotar R. 2004. Uporaba oplemenitene biomase pri oskrbi s toploto. Istrabenz energetski sistemi: 16 str.
http://www.rcp.ijs.si/opet/PDF_WP5/T3_Seminar/WP5_T3_seminar_boilers_JSI_biomass.pdf (3. jul. 2007)
- LCD Handthermometer DT-300. 2003. Voltcraft.
http://www2.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/100700-an-01-ml-LCD-Handthermometer_DT-300_de-en-fr.pdf (20. jun. 2008)

Microprocessor Based Temperature Controller N480D – V3.2x. 1998. Novus.

http://www.oceancontrols.com.au/controllers/novus/manual_n480d_english.pdf (20. jun. 2008)

New micro-woodchips for pellets production. 2007. Bruks-kloeckner (1. jun. 2007).

http://www.ihb.de/wood/news/Bruks_Kloeckner_Woodchips_Pellets_15064.html (15. dec. 2007)

Obnovljivi viri energije – biomasa. 2005. AURE - Agencija za učinkovito rabo energije (15. maj 2009).

<http://www.aure.si/> (15. apr. 2008)

Ogrevanje s sodobnimi kotli na lesno biomaso – informacijski list. 1995. Agencija za prestrukturiranje energetike.

<http://www.aure.gov.si/eknjiznica/IL13-biomamsa.pdf> (31. avg. 2008)

Stroji in oprema – izdelava drv. 2007. LINDAP (1. jun. 2009).

http://www.lindap.si/prodaja/biomasa/drva_oprema_obdelava.php (10. maj 2007)

Testing Machines and Systems for Automotive Industry. 2006. Zwick Testing Machines.

<http://www.zwick.co.uk/pdf/automotive.pdf> (22. jun. 2008)

Toplotne obdelave pred grobim odrezovanjem. 2005.

<http://fs-server.uni-mb.si/si/inst/itm/lm/Toplotna%20obdelava%20orodij/Toplotne%20obdelave%20pred%20grobim%20odrezovanjem.doc> (3. jul. 2007)

Turk J., Staničič D., Šubic L. 2006. Odstranjevanje ovir za povečano izrabo biomase kot energetskega vira – zloženska. Ministrstvo za okolje in prostor (22. dec. 2006).

<http://www.biomasa.zgs.gov.si> (18. nov. 2007)

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za prijaznost, spodbujanje in vodenje pri izdelavi diplomskega dela, prav tako se zahvaljujem tudi somentorju prof. dr. Bojanu Bučarju za pomoč in nasvete pri opravljanju in interpretaciji laboratorijskih poskusov. Hvala prof. dr. Željku Gorišku za recenzijo, asist. mag. Bogdanu Šegi za izdelavo merilnega programa in pomoč pri upravljanju s stiskalnim strojem Zwick. Hvala tudi sodelavcem laboratorija za merilne sisteme in regulacijsko tehniko, ki so izdelali stiskalni model.

Zahvalo izrekam vsem, ki so mi kakorkoli pomagali pri izvedbi poskusov in izdelavi diplomskega dela, med njimi lektorju prof. dr. Damjanu Zazuli. Posebej pa sem hvaležen svoji mami, ki mi je omogočila študij, me vseskozi vzpodbujala in podpirala in mi še posebej pomagala pri nastajanju diplomskega dela.

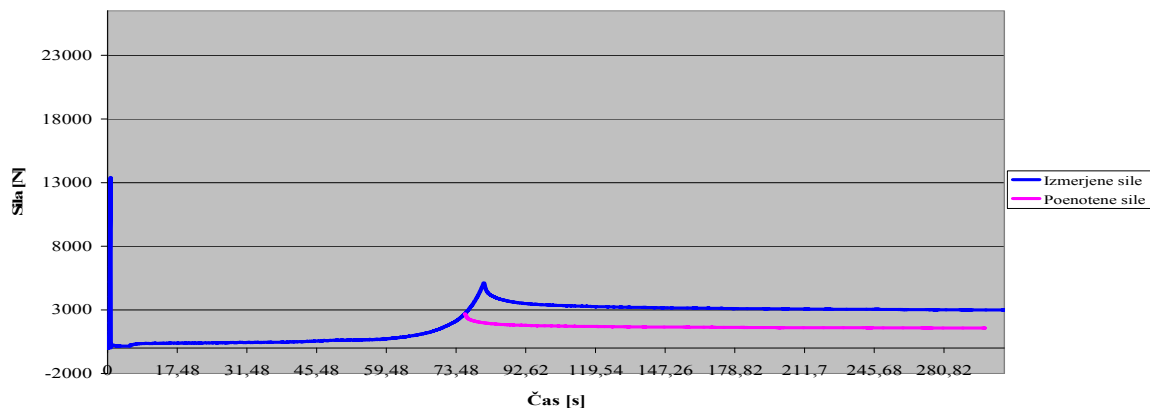
PRILOGA

V prilogi so zbrane grafične upodobitve vseh opravljenih meritev. Grafikoni imajo v naslovu vpisane podatke o vlažnosti in temperaturi lesne mase med stiskanjem ter številko meritve. Na posamezni strani so po tri meritve, ki so bile opravljene z enako vlažnostjo in temperaturo lesne mase.

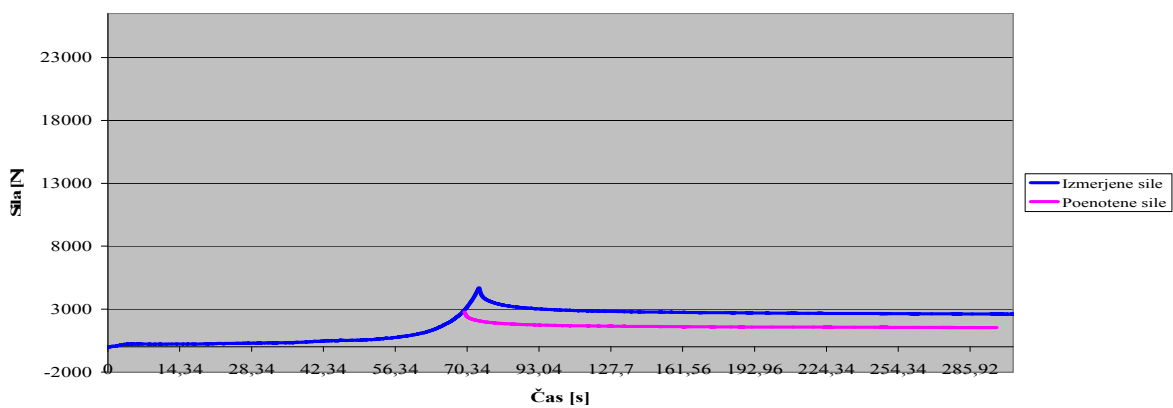
Poteke meritev kažejo modri grafi, in sicer naraščajočo fazo stiskanja ter upadajočo fazo sproščanja. Vsak grafikon pa je dopolnjen še z normirano krivuljo sproščanja, izračunano s pomočjo modelov Jonesa in Pelega. Normirana sproščanja so narisana z rožnato barvo. Pri vseh prikazih smo uporabili enako ordinatno skalo, s čimer smo tudi vizualno poudarili različnost izmerjenih sil.

Normirani grafi stiskanja se v naraščajoči fazi stiskanja ujemajo z meritvami (modre krivulje), zato jih nismo risali, ker bi s tem prekrili dele meritev.

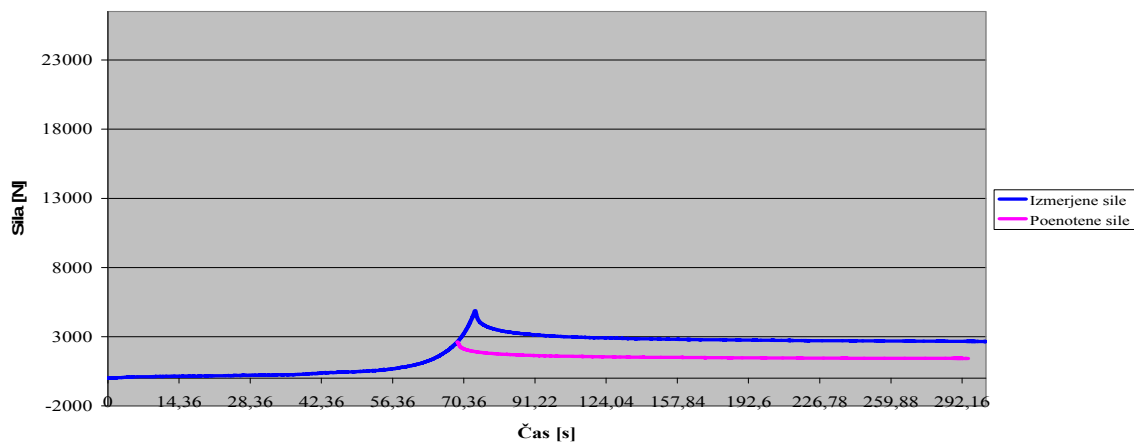
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 50 st. C, 1. meritev



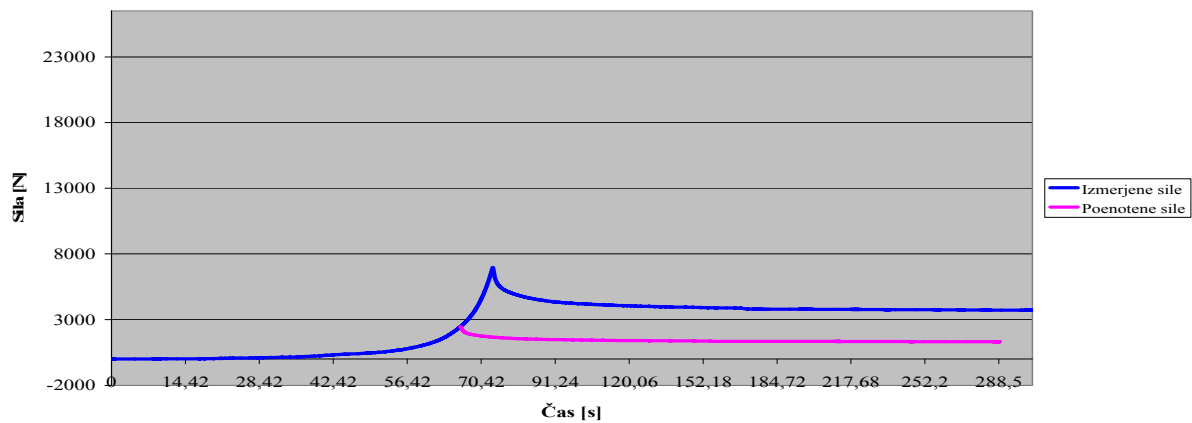
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 50 st. C, 2. meritev



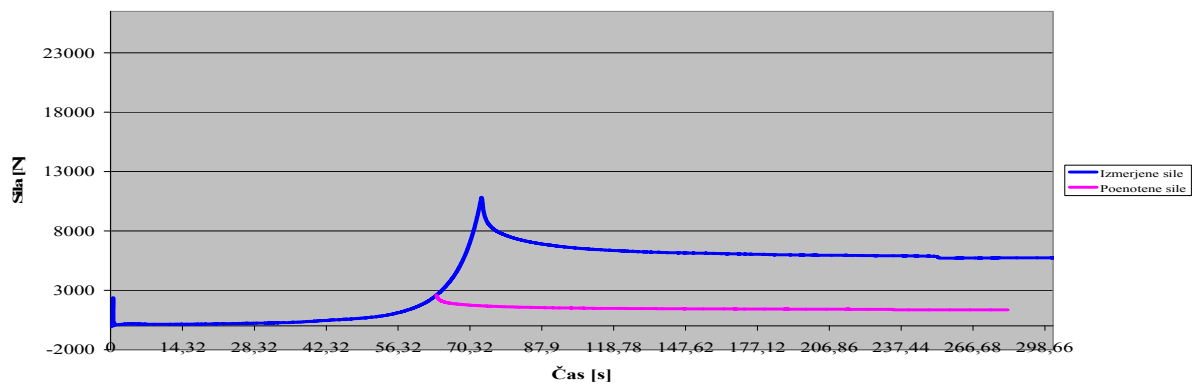
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 50 st. C, 3. meritev



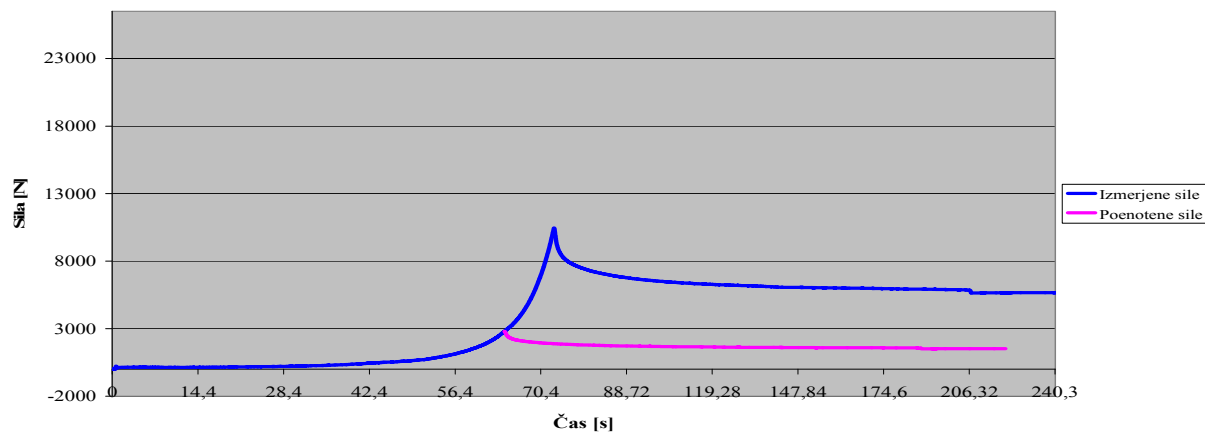
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 60 st. C, 1. meritev



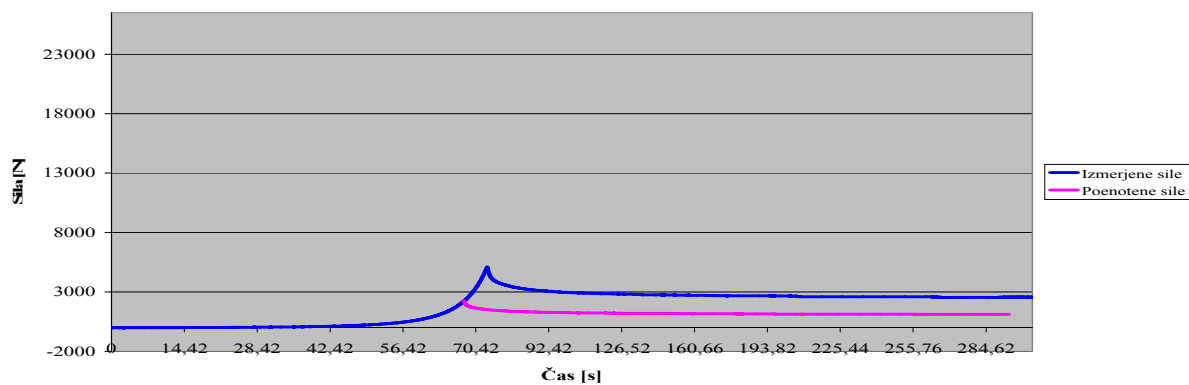
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 60 st. C, 2. meritev



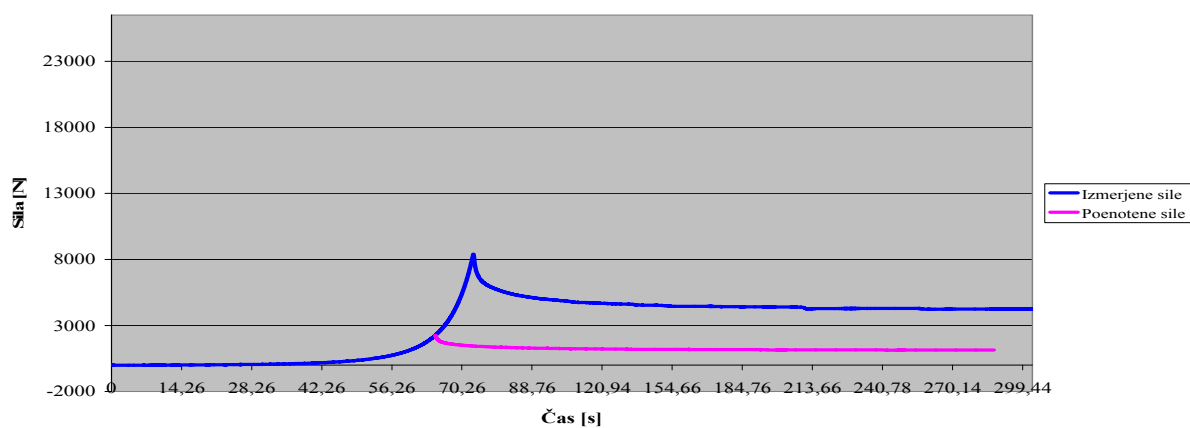
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 60 st. C, 3. meritev



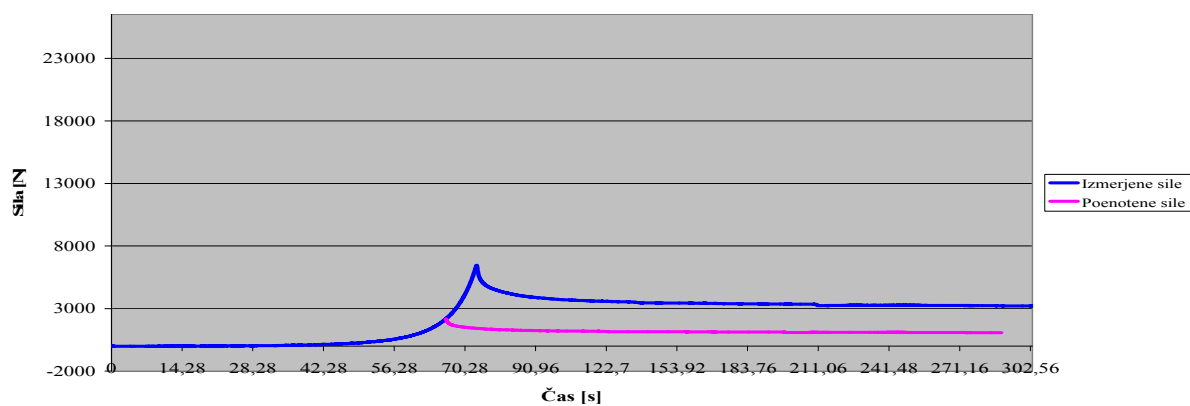
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 70 st. C, 1. meritev



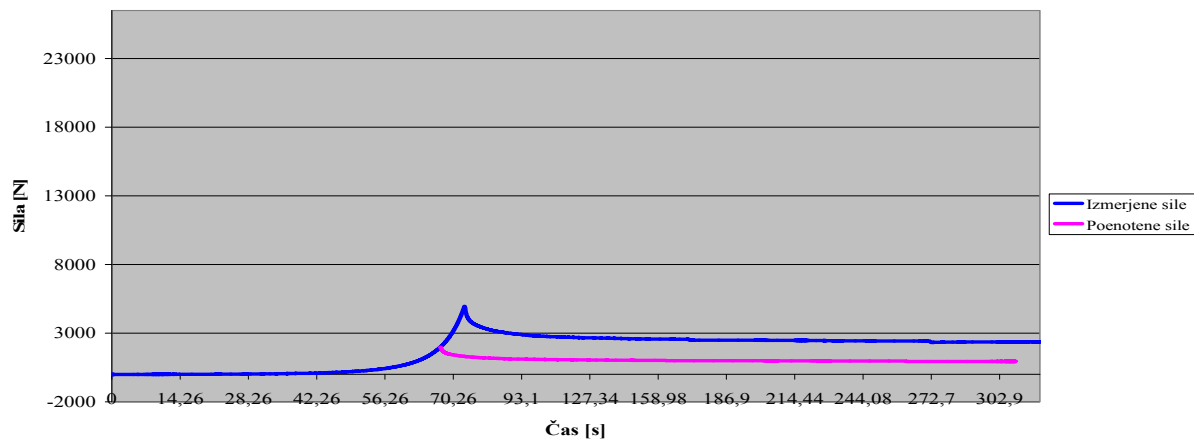
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 70 st. C, 2. meritev



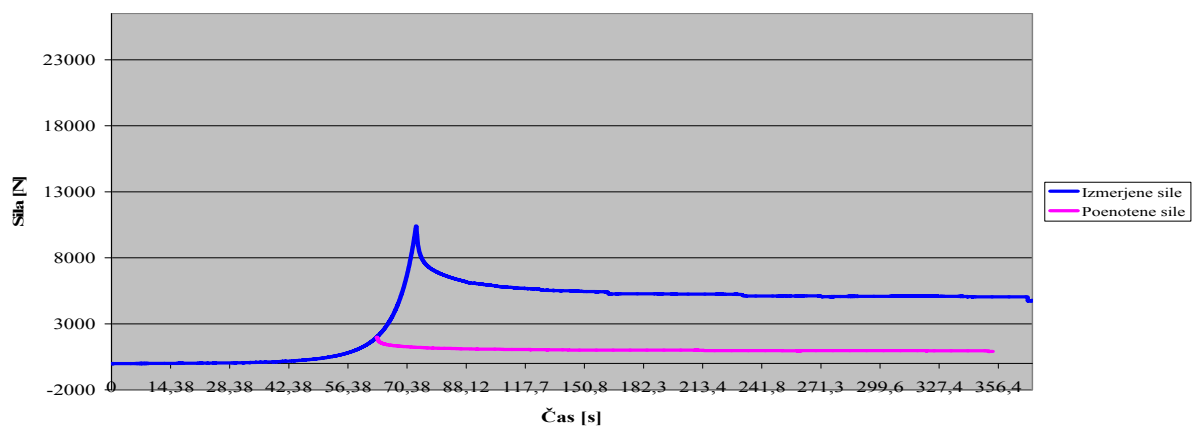
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 70 st. C, 3. meritev



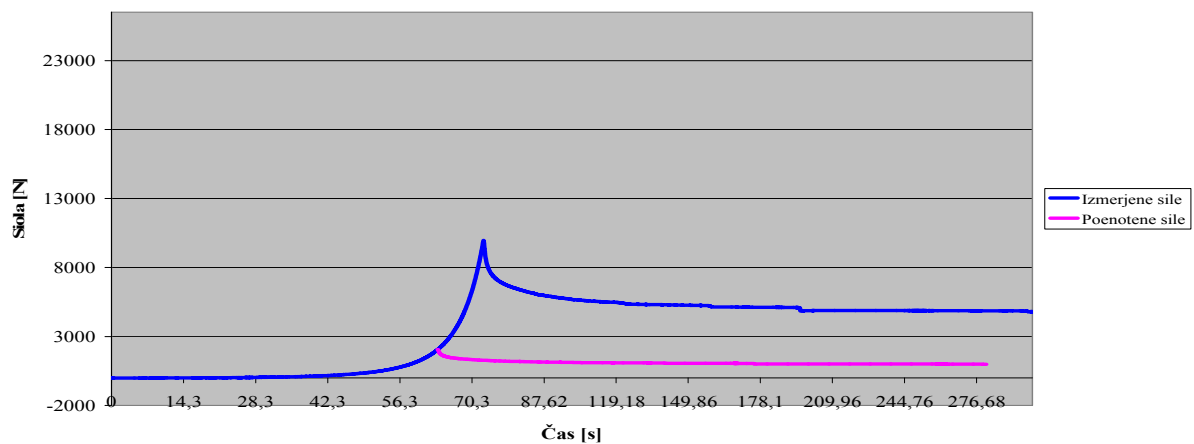
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 80 st. C, 1. meritev



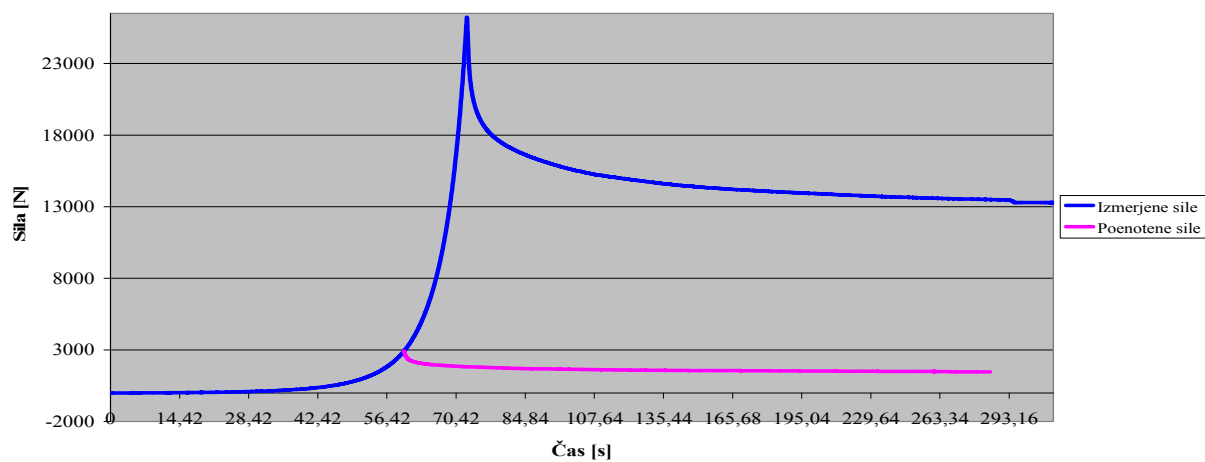
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 80 st. C, 2. meritev



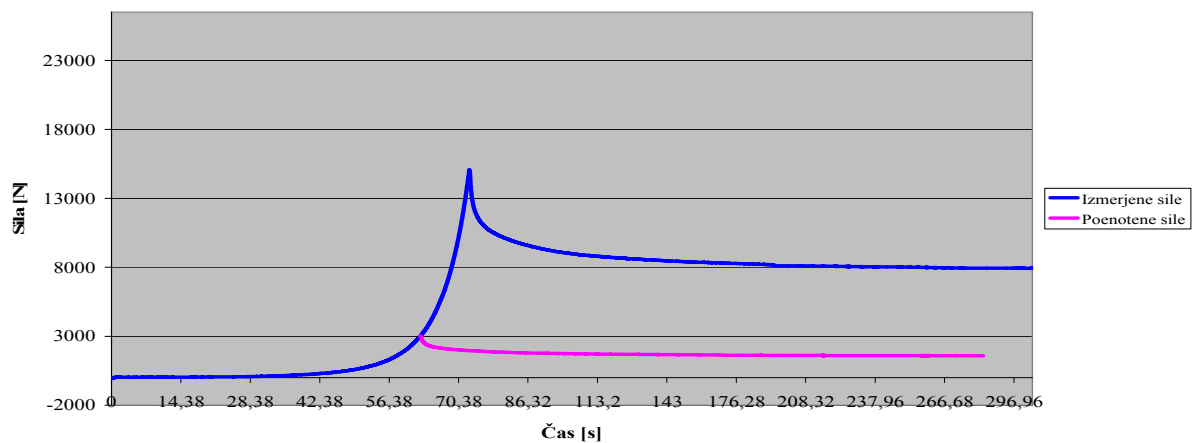
Sile pri vlažnosti 9,8 % in temperaturi 80 st. C, 3. meritev



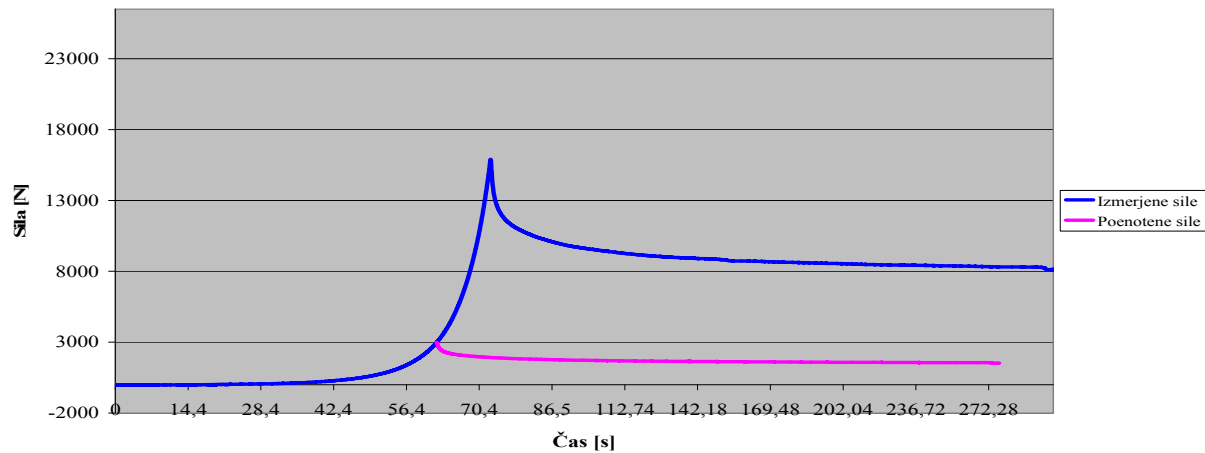
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 50 st. C, 1. meritev



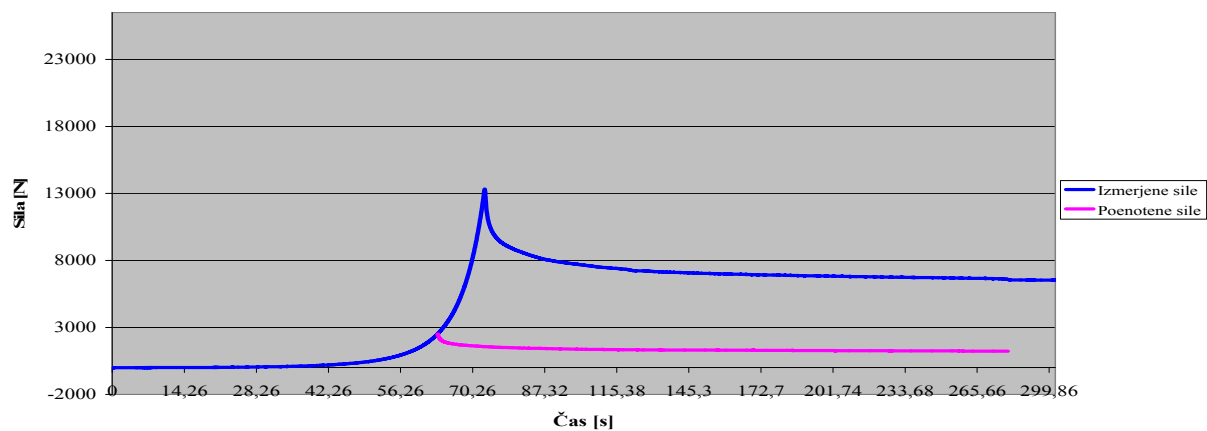
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 50 st. C, 2. meritev



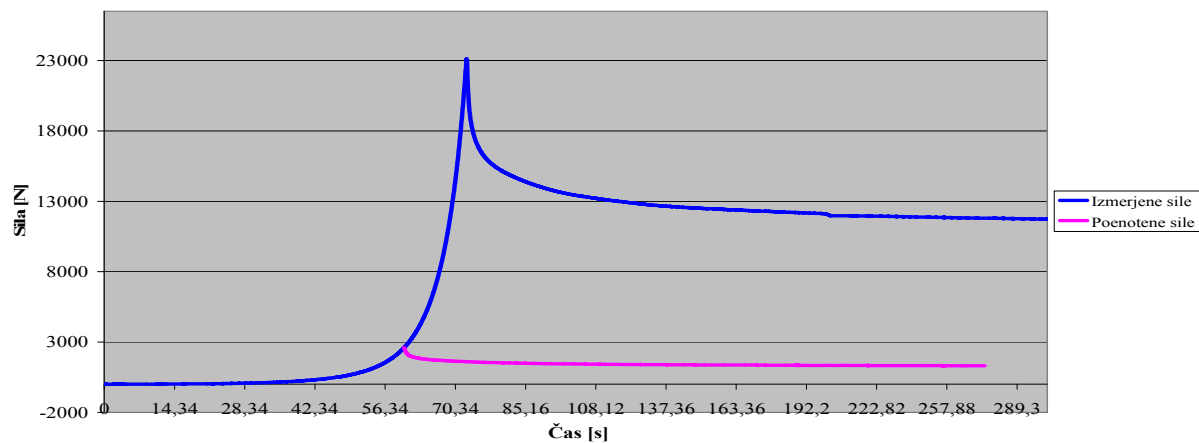
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 50 st. C, 3. meritev



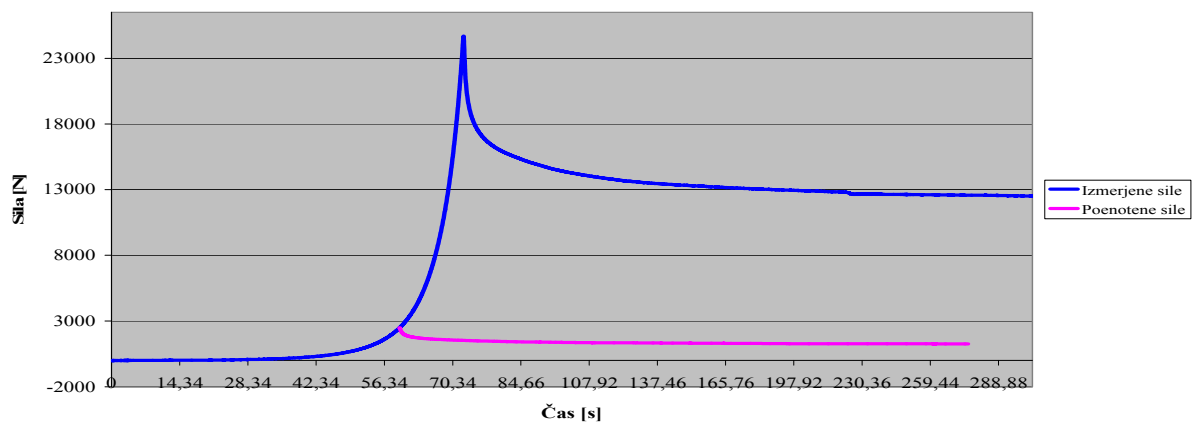
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 60 st. C, 1. meritev



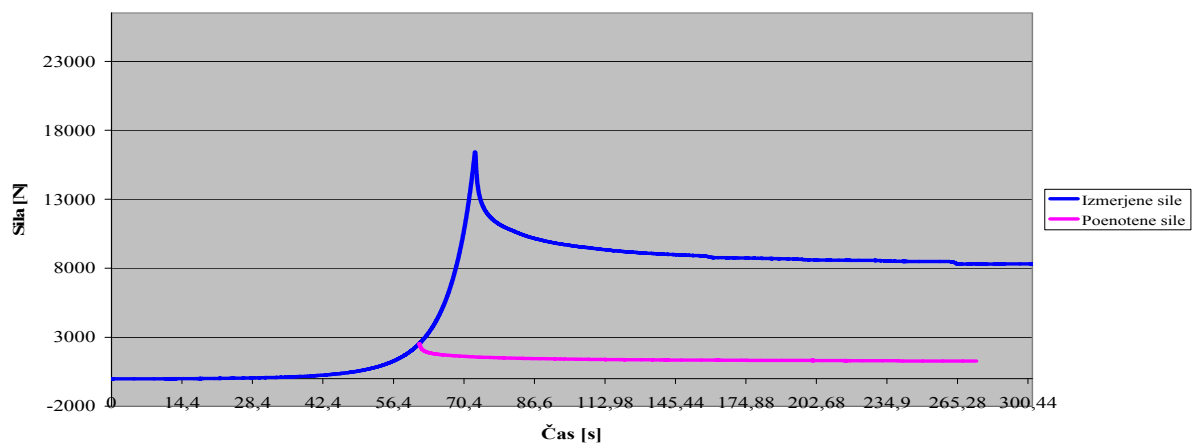
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 60 st. C, 2. meritev



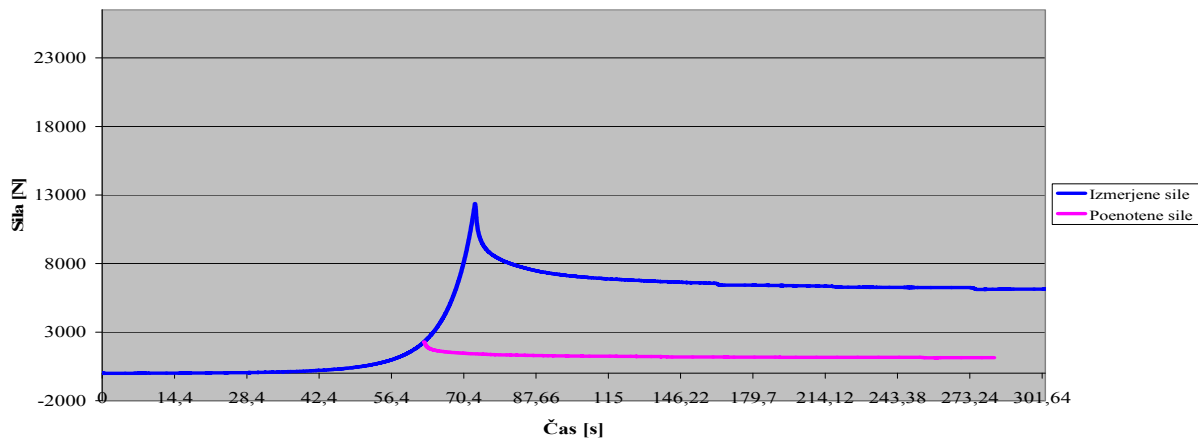
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 60 st. C, 3. meritev



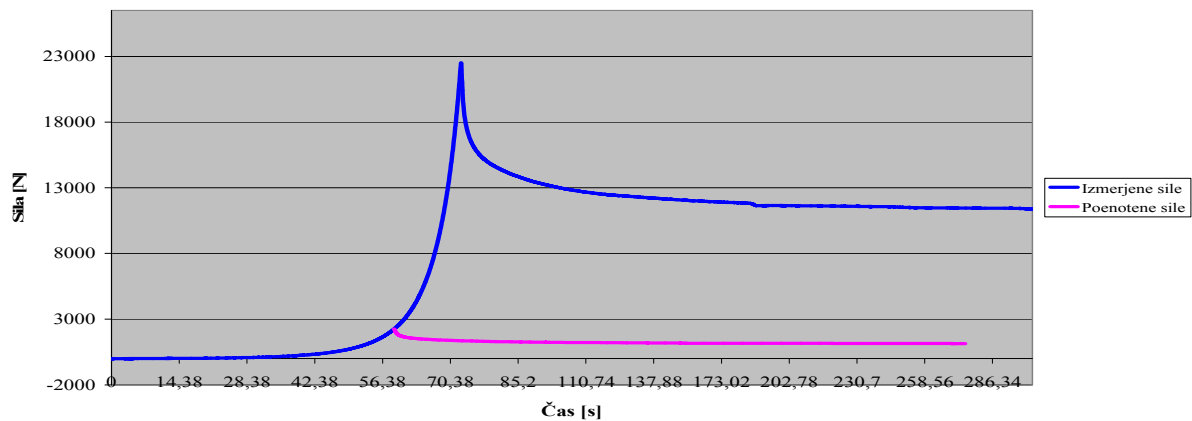
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 70 st. C, 1. meritev



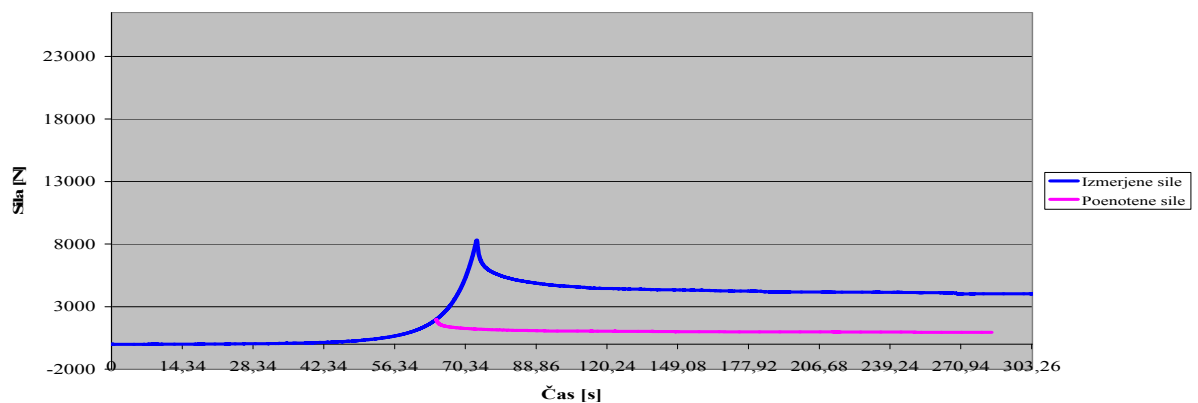
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 70 st. C, 2. meritev



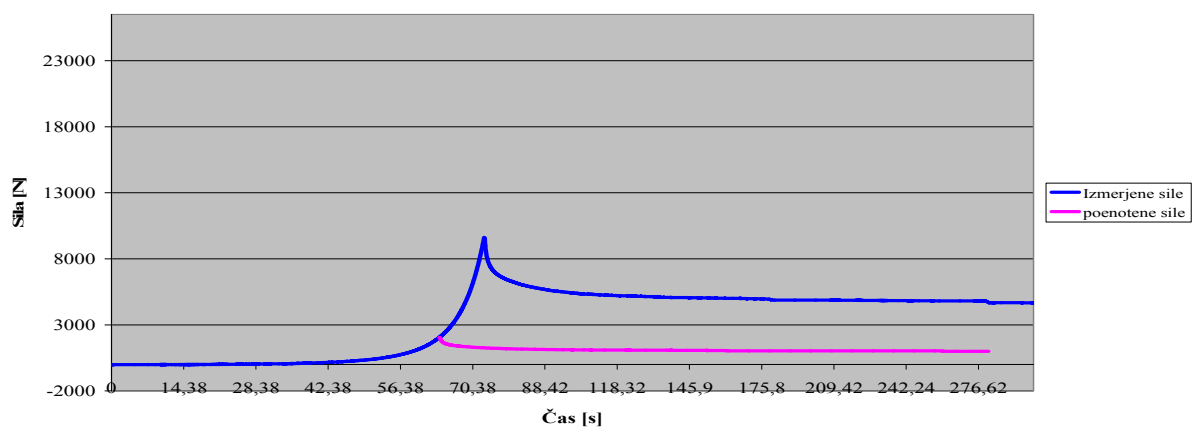
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 70 st. C, 3. meritev



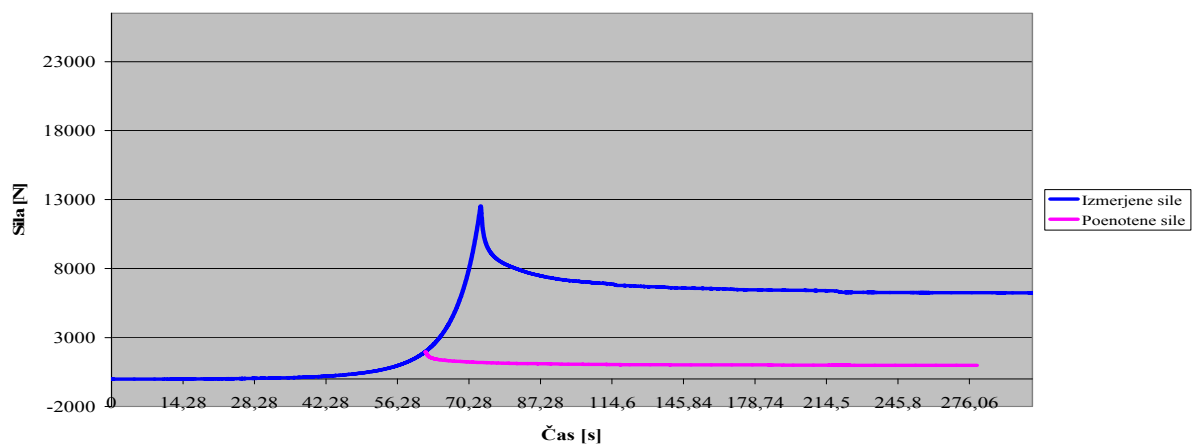
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 80 st. C, 1. meritev



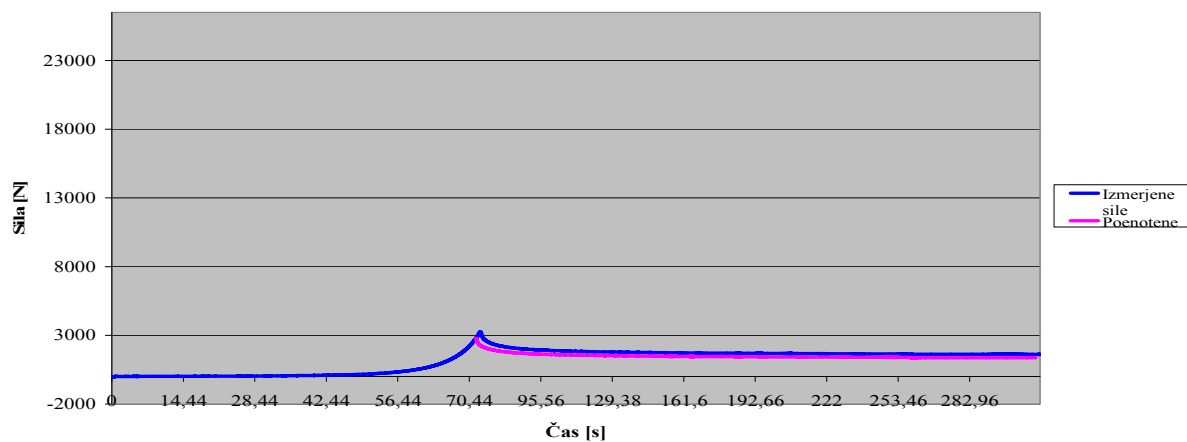
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 80 st. C, 2. meritev



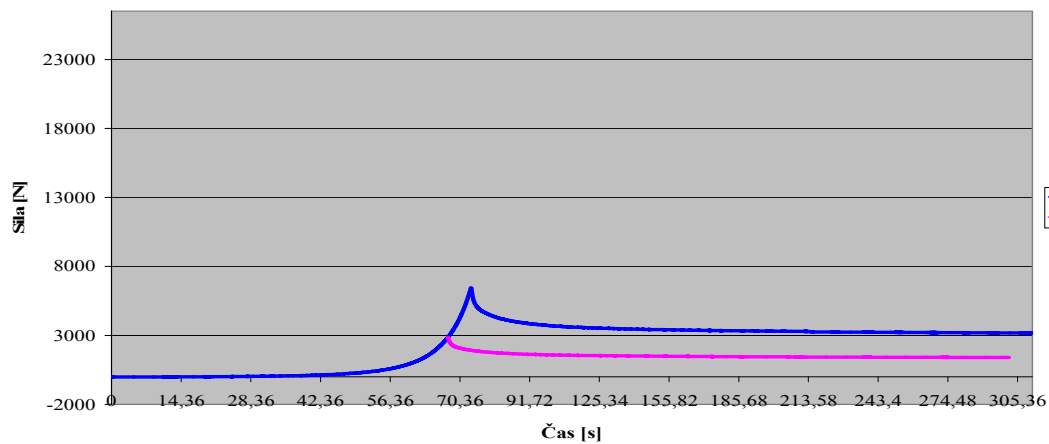
Sile pri vlažnosti 11,8 % in temperaturi 80 st. C, 3. meritev



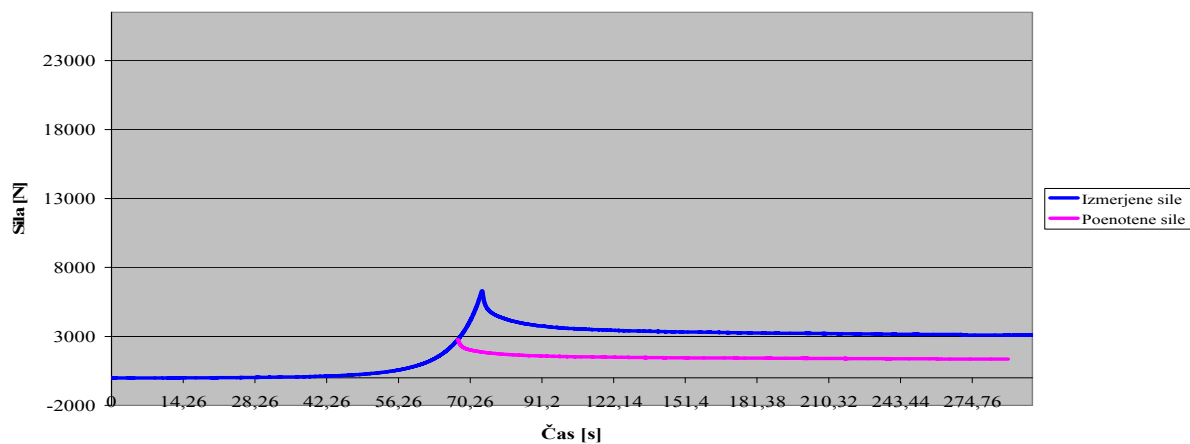
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 50 st. C, 1. meritev



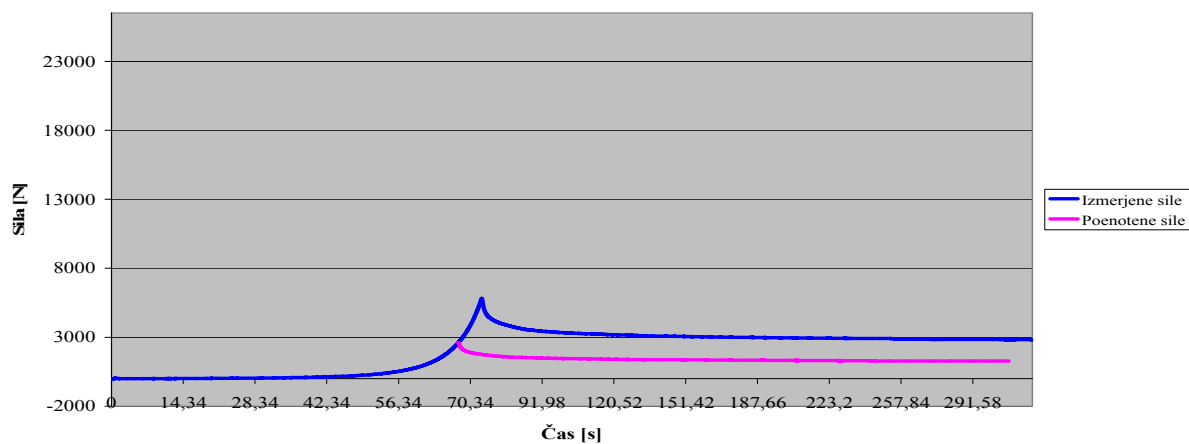
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 50 st. C, 2. meritev



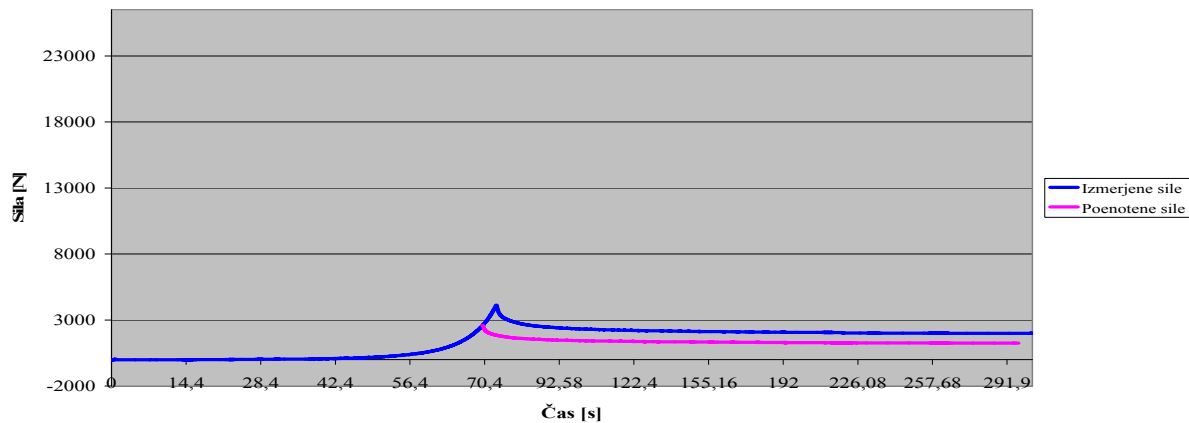
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 50 st. C, 3. meritev



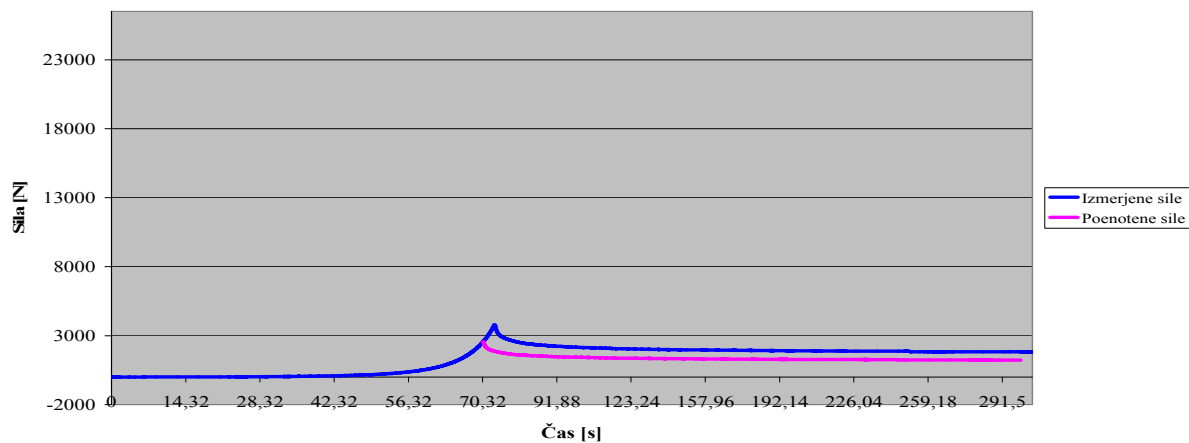
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 60 st. C, 1. meritev



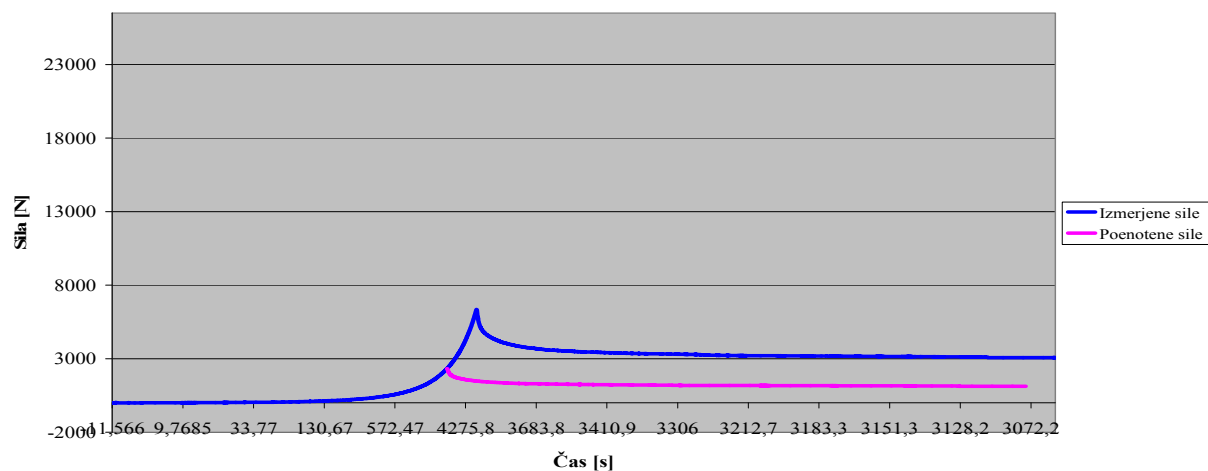
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 60 st. C, 2. meritev



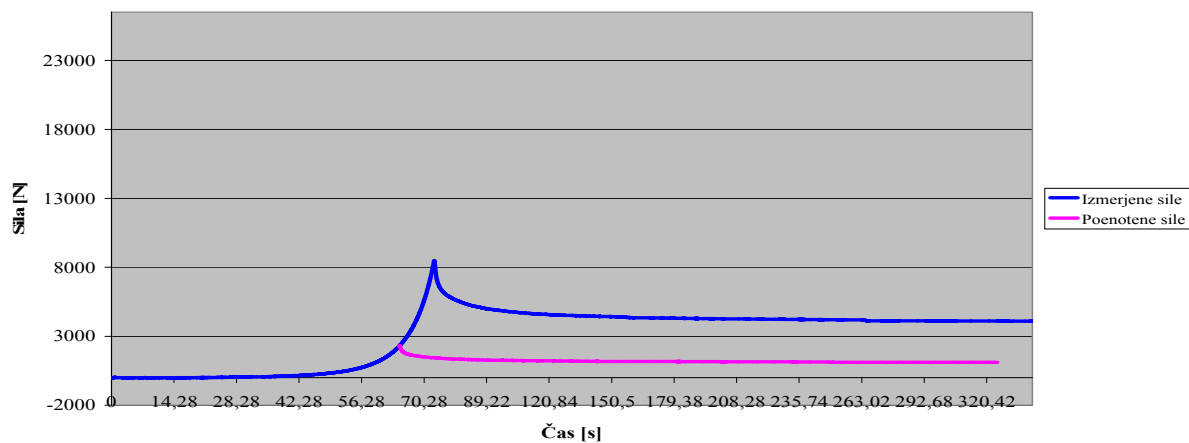
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 60 st. C, 3. meritev



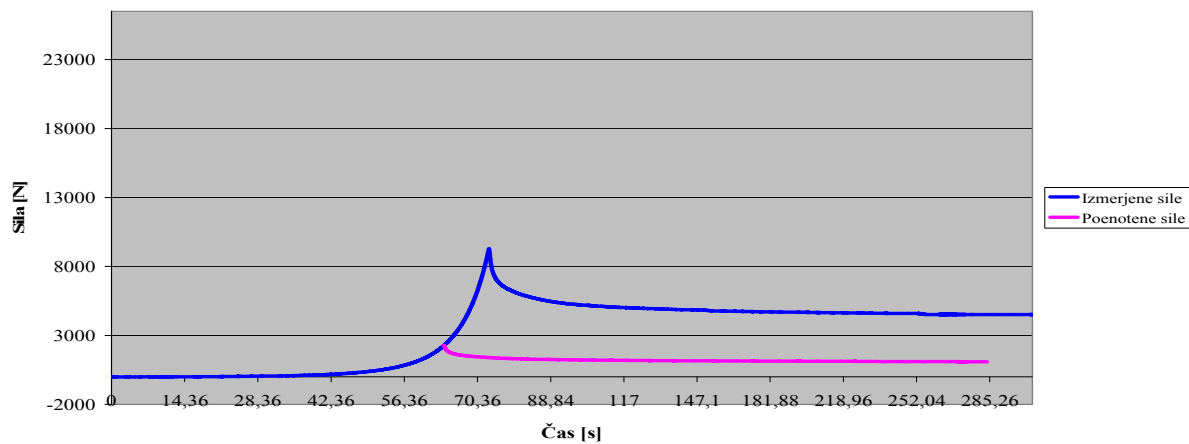
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 70 st. C, 1. meritev



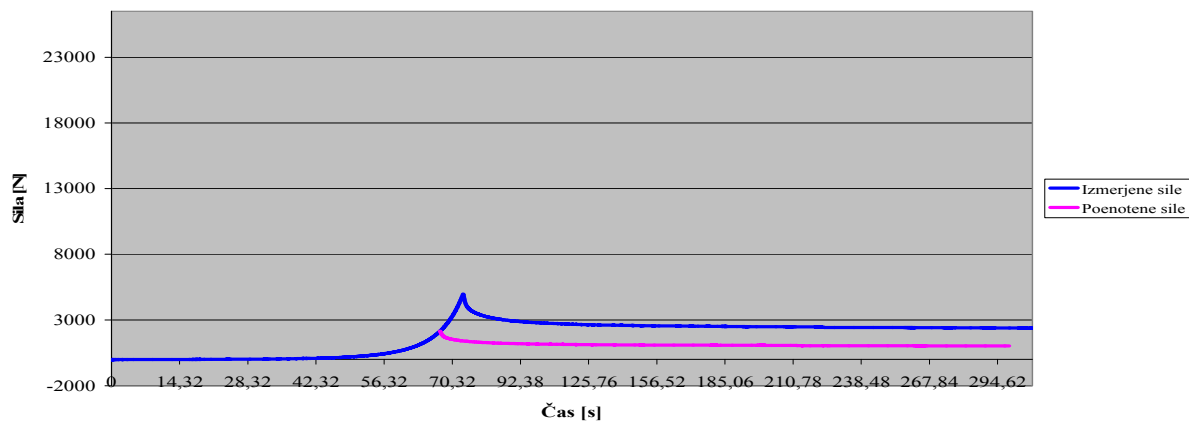
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 70 st. C, 2. meritev



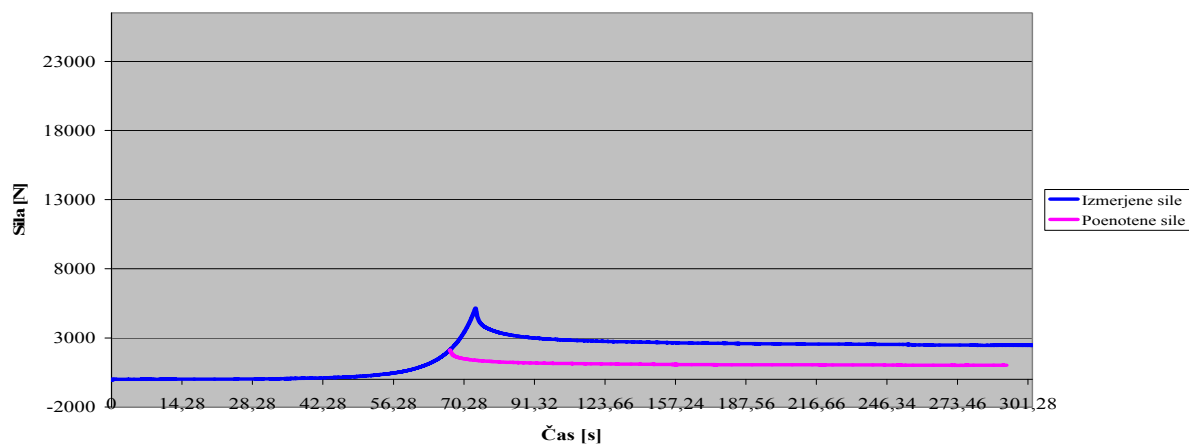
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 70 st. C, 3. meritev



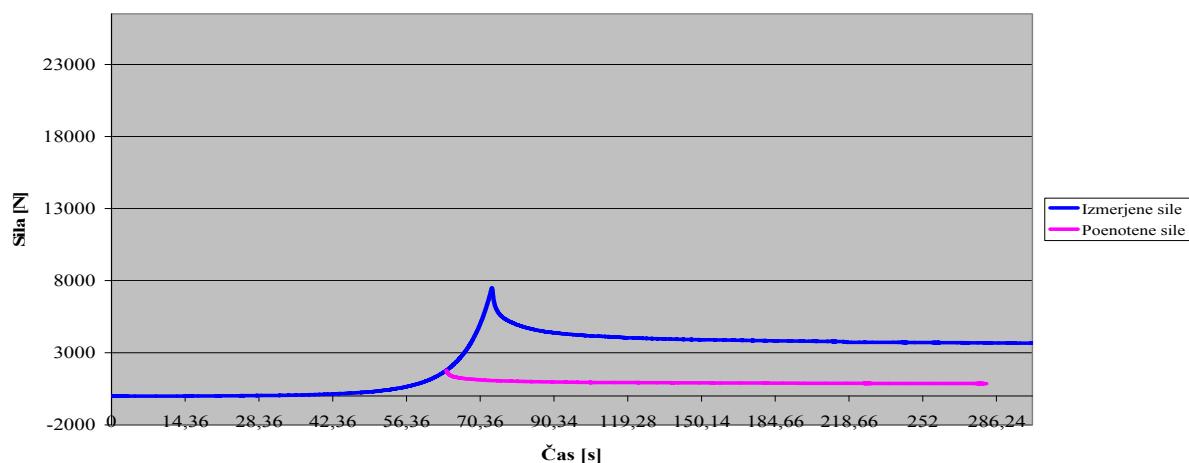
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 80 st. C, 1. meritev



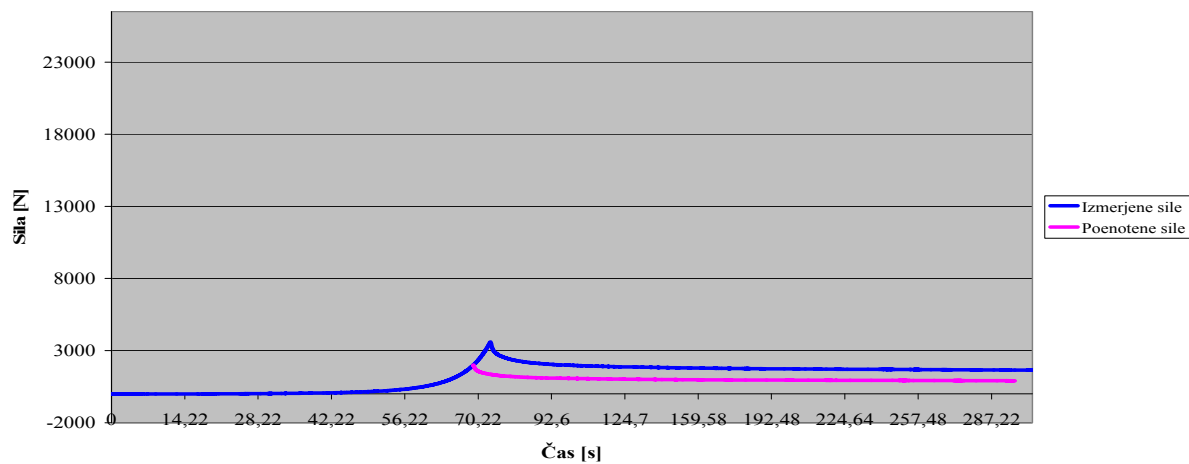
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 80 st. C, 2. meritev



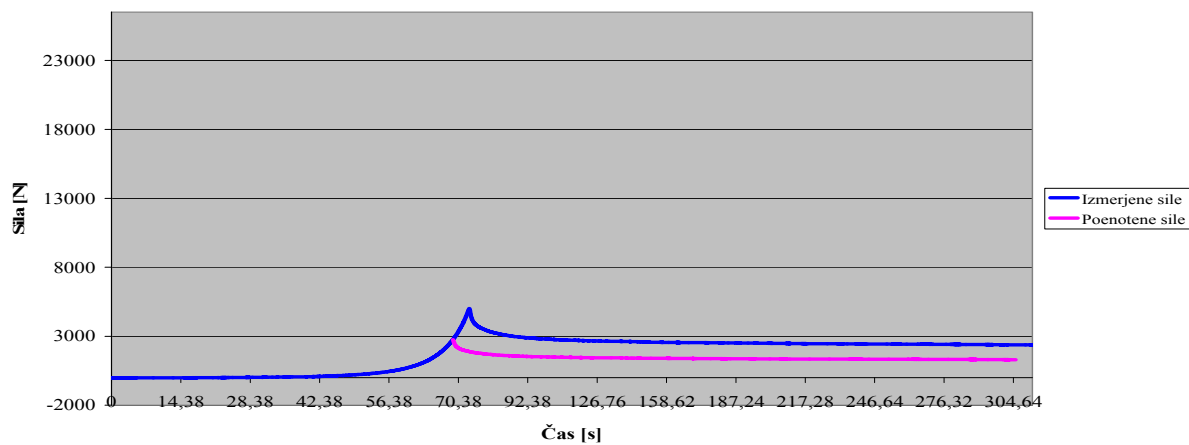
Sile pri vlažnosti 14,8 % in temperaturi 80 st. C, 3. meritev



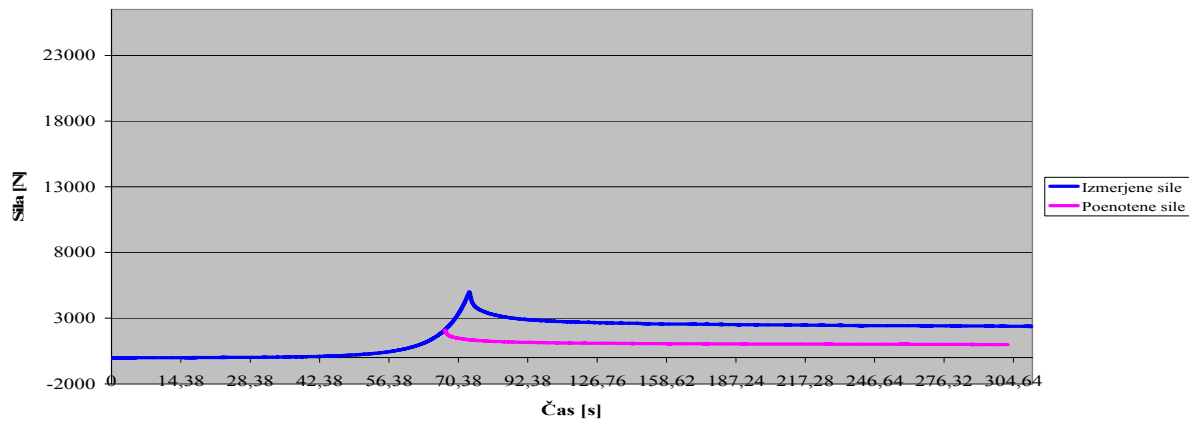
Sile pri vlažnosti 18 % in temperaturi 70 st. C, 1. meritev



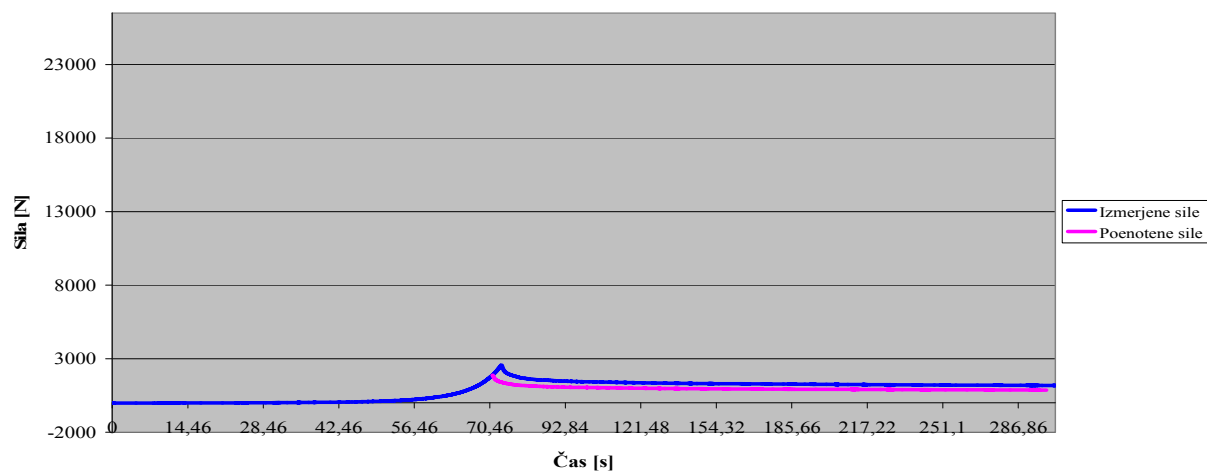
Sile pri vlažnosti 18 % in temperaturi 70 st. C, 2. meritev



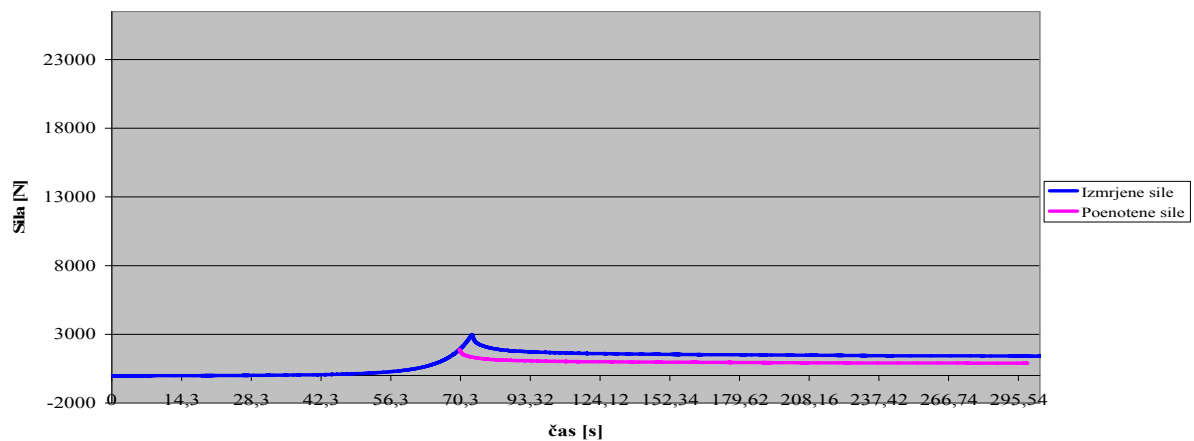
Sile pri vlažnosti 18 % in temperaturi 70 st. C, 3. meritev



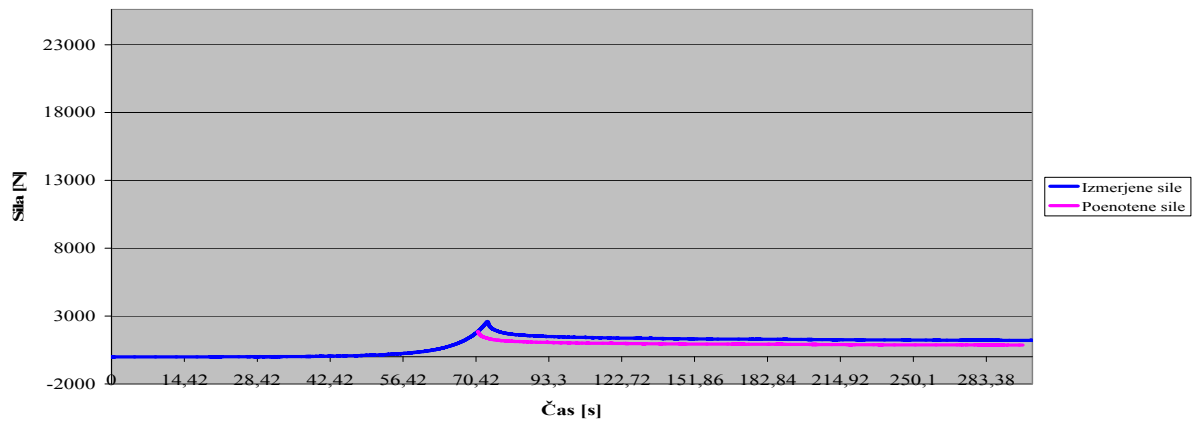
Sile pri vlažnosti 18 % in temperaturi 80 st. C, 1. meritev



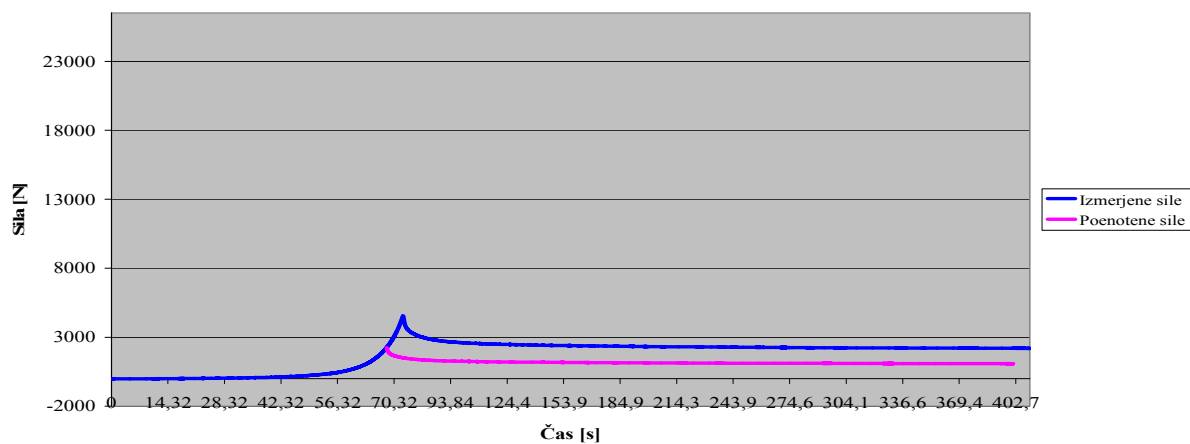
Sile pri vlažnosti 18 % in temperaturi 80 st. C, 2. meritev



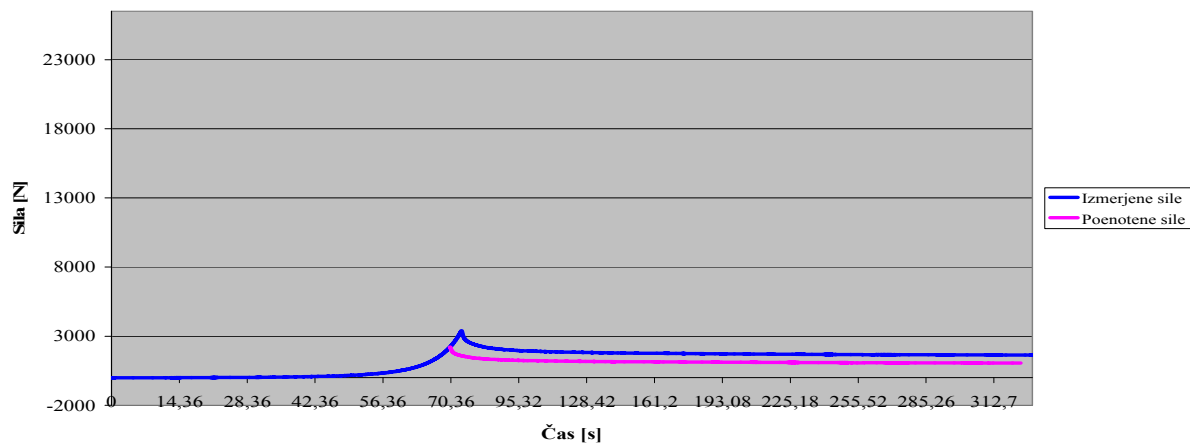
Sile pri vlažnosti 18 % in temperaturi 80 st. C, 3. meritev



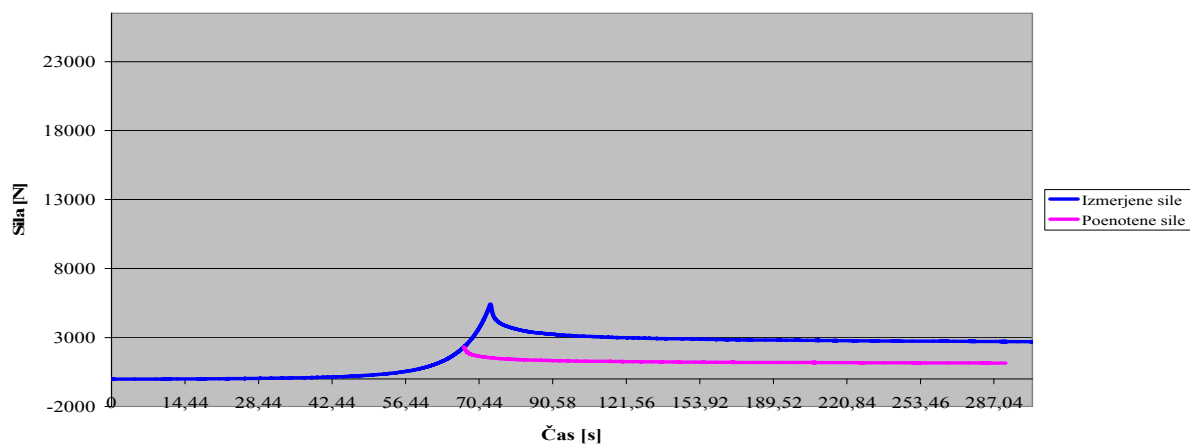
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 50 st. C, 1. meritev



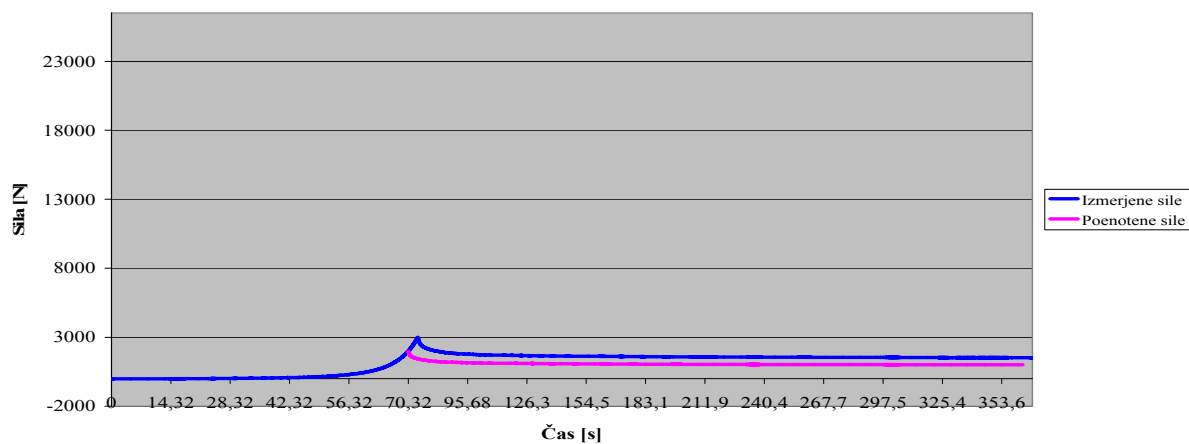
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 50 st. C, 2. meritev



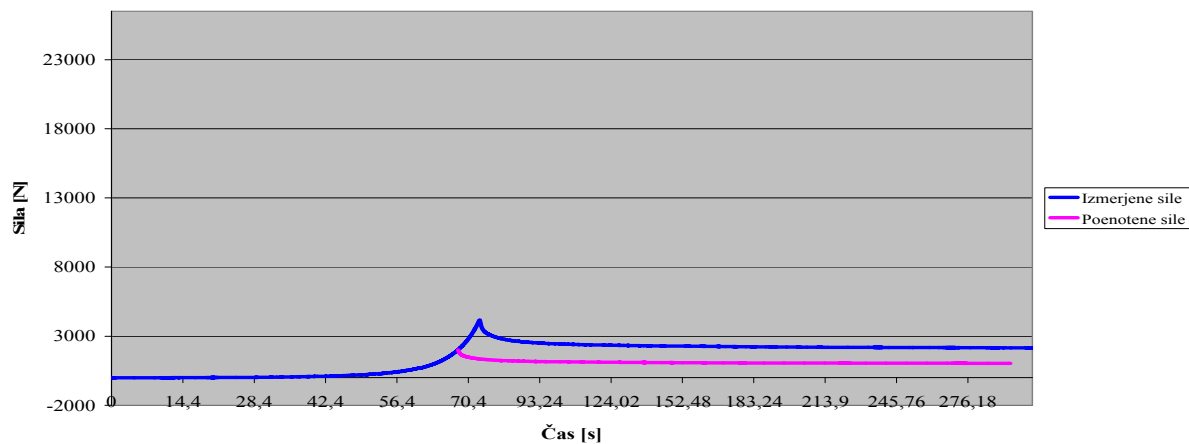
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 50 st. C, 3. meritev



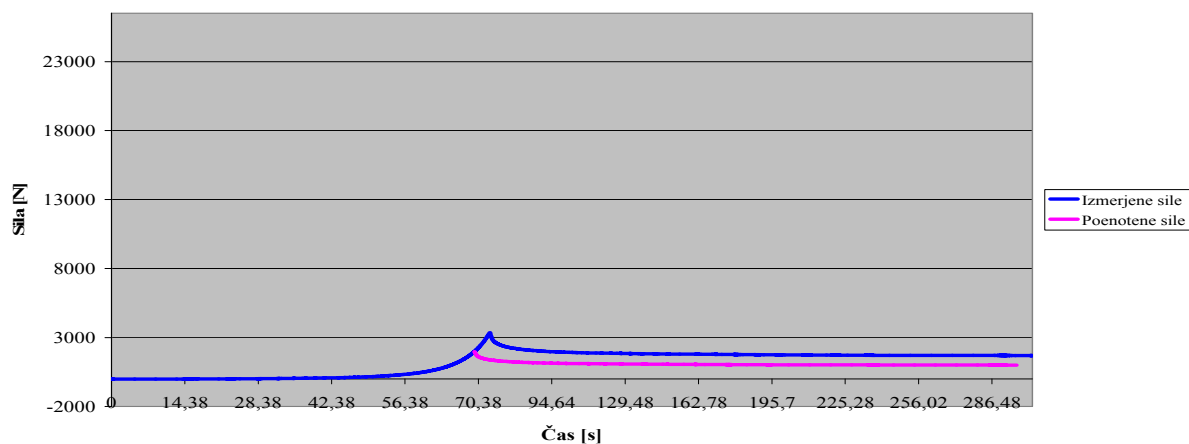
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 60 st. C, 1. meritev



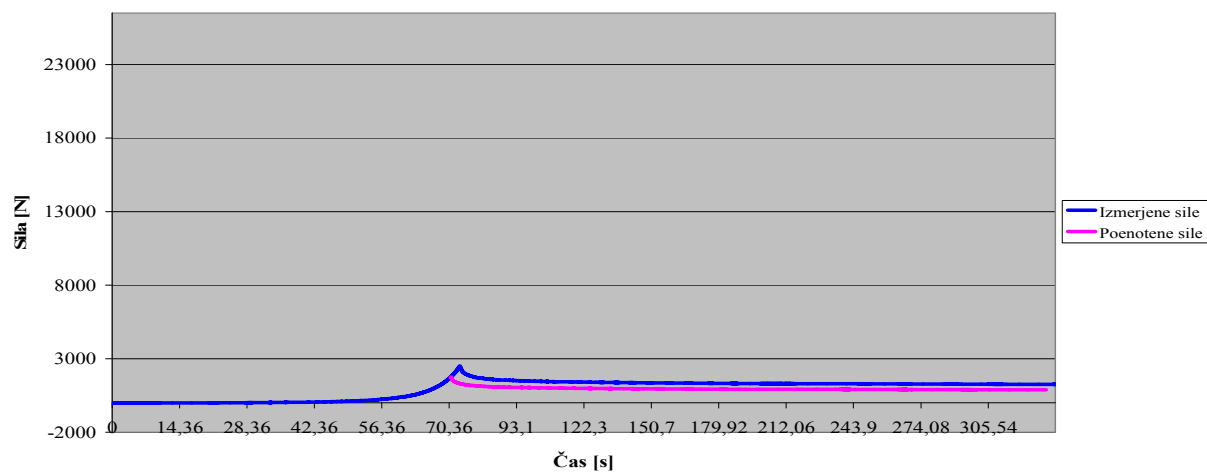
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 60 st. C, 2. meritev



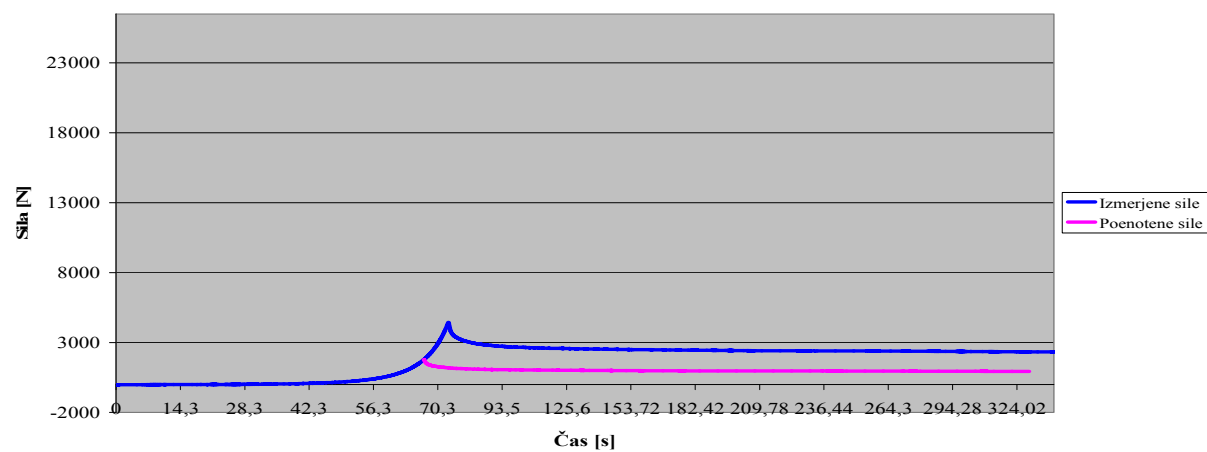
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 60 st. C, 3. meritev



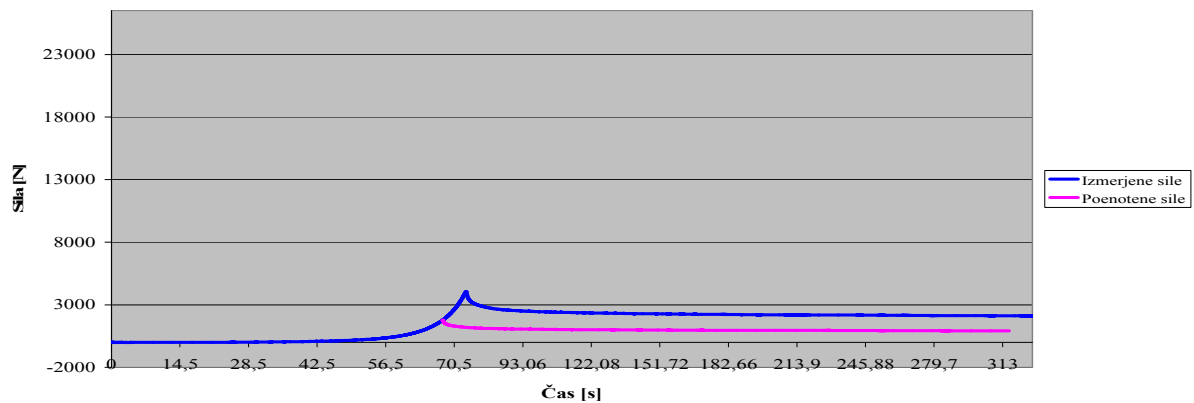
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 70 st. C, 1. meritev



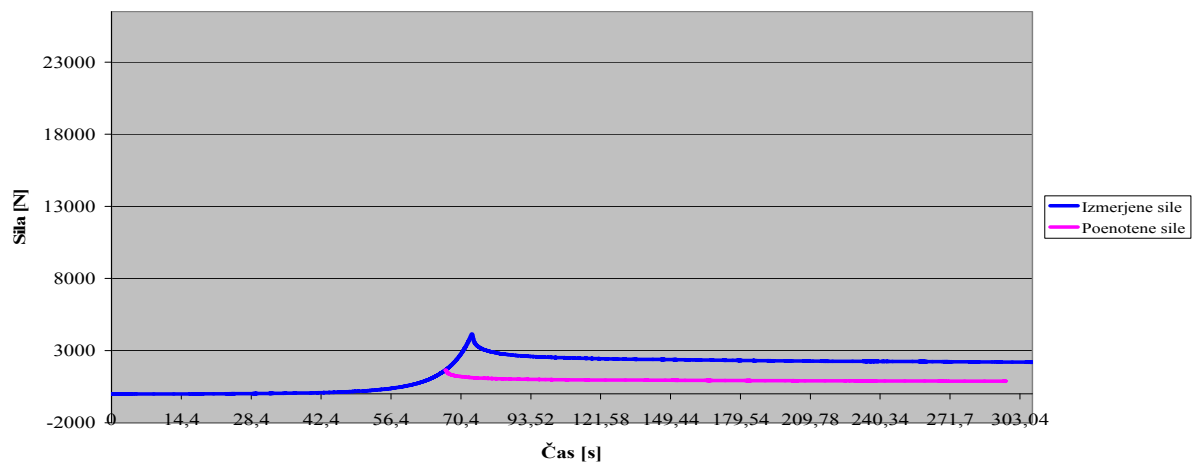
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 70 st. C, 2. meritev



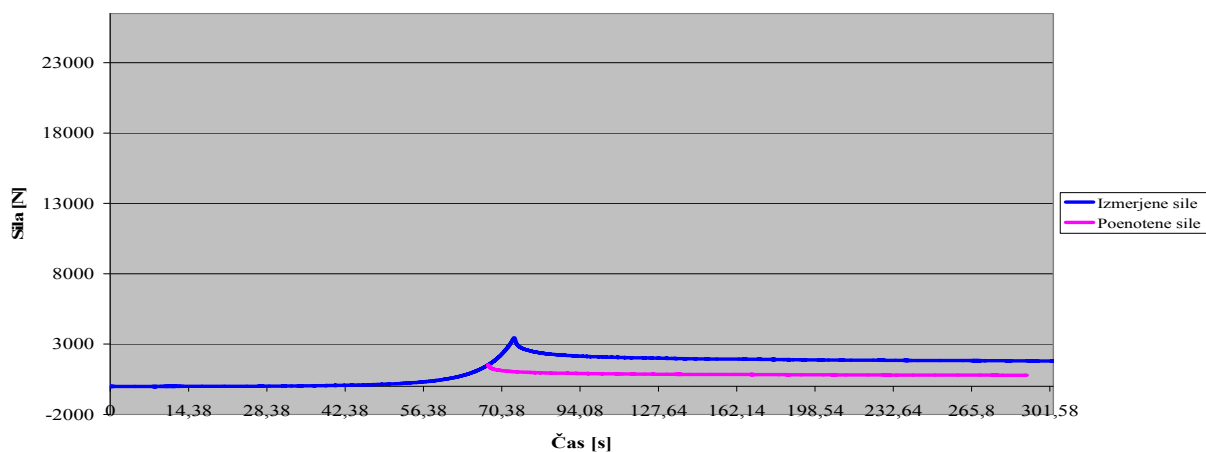
Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 70 st. C, 3. meritev



Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 80 st. C, 1. meritev



Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 80 st. C, 2. meritev



Sile pri vlažnosti 27,4 % in temperaturi 80 st. C, 3. meritev

