

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Matej POTOKAR

**UPORABA MANJ VREDNEGA LESA PRI
OGREVANJU KMEČKE HIŠE Z LESNIMI SEKANCI**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA AGRONOMIJO

Matej POTOKAR

**UPORABA MANJ VREDNEGA LESA PRI OGREVANJU KMEČKE
HIŠE Z LESNIMI SEKANCI**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**USE OF INFERIOR QUALITY WOOD IN HEATING FARM HOUSE
WITH WOOD CHIPS**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2016

*Ne moremo delati velikih stvari,
delamo lahko le majhne stvari z veliko ljubeznijo.*

(sv. Mati Terezija)

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija kmetijstva agronomija. Podatki o uporabi lesa so bili pridobljeni na terenu, analiza ter njihova statistična obdelava pa na Katedri za fitomedicino, kmetijsko tehniko, pašništvo in travništvo Oddelka za agronomijo na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani.

Komisija za dodiplomski študij Oddelka za agronomijo je za mentorja diplomskega dela imenovala prof. dr. Rajka BERNIKA.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Gregor OSTERC

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Član: prof. dr. Rajko BERNIK

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Član: prof. dr. Miha HUMAR

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Datum zagovora:

Podpisani izjavljam, da je diplomsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Matej Potokar

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*81:630*33:620.97(043.2)
KG	Lesni sekanci/kmečka hiša/biomasa/manjvreden les/kurilnost
AV	POTOKAR, Matej
SA	BERNIK, Rajko (mentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo
LI	2016
IN	UPORABA MANJ VREDNEGA LESA PRI OGREVANJU KMEČKE HIŠE Z LESNIMI SEKANCI
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	IX, 35 str., 16 sl., 27 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	V diplomskem delu je predstavljena uporaba manj vrednega lesa pri ogrevanju kmečke hiše z lesnimi sekanci. Na začetku dela so opisani lesna biomasa, lesna goriva in kroženje ogljikovega dioksida v lesu. Nato so opredeljeni dejavniki, ki vplivajo na kurilno vrednost lesa, pri tem je podrobno predstavljena vlažnost lesa. Nadaljevanje vključuje pregled osnov zgorevanja lene biomase in tehnik gorenja. Sledi predstavitev drevesnih vrst, ki so bila uporabljena za izdelavo sekancev. Natančno so opisani sekalnik, kotel, merilnik toplote, s katerimi so bile pridobljene ugotovitve. Rezultati kažejo, da imata drevesna vrsta in vlažnost lesa vpliv na kurilno vrednost lesa. Lesni sekanci hrasta in smreke z nižjo vlažnostjo imajo boljšo kurilno vrednost kot lesni sekanci hrasta in smreke z višjo vlažnostjo. Lesni sekanci gabra imajo najboljšo kurilno vrednost glede na volumen lesnih sekancev med vsemi drevesnimi vrstami, ki so bila vključena v poskus. Med zdravim in trhlím garbovim lesom je višja razlika kot med zdravim in trhlím bukovim lesom, vendar je manj vreden les še vedno uporaben za energetske namene.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn

DC UDC 630*81:630*33:620.97(043.2)

CX wood chips/ farmhouse/ less valuable wood/ calorific value

AU POTOKAR, Matej

AA BERNIK, Rajko (supervisor)

PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Agronomy

PY 2016

TI USE OF INFERIOR QUALITY WOOD IN HEATING FARM HOUSE WITH WOOD CHIPS

DT Graduation Thesis (University studies)

NO IX, 35 p., 16 fig., 27 ref.

LA sl

AL sl/en

AB This thesis presents the use of less valuable wood for heating of a farmhouse with wood chips. At the beginning of my thesis I described the wood biomass, wood fuel and carbon dioxide. I defined the factors influencing the calorific value of the wood and presented wood humidity in detail. I also included a review of the basics of biomass combustion and combustion techniques. Next, I presented tree species which were used to manufacture chips. I described in detail the chipper, furnace and heat meter which I used to obtain my findings. The results show that the tree species and the wood humidity have an effect on the calorific value of the wood. Wood chips of oak and spruce trees with low humidity have a greater calorific value than wood chips of oak and spruce trees with higher humidity. Spruce wood chips have a lower calorific value than oak wood chips. Hornbeam wood chips have the best calorific value based on the volumes of the tree species that were included in the study. There is a higher difference between healthy and decayed hornbeam wood than between healthy and decayed beech wood, but any less valuable wood is still usable for energy purposes.

KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO SLIK	VII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	VIII
SLOVARČEK	IX
1 UVOD	1
1.1 NAMEN NALOGE	2
1.2 DELOVNA HIPOTEZA	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 BIOMASA.....	3
2.1.1 Lesna biomasa.....	3
2.2 LESNA GORIVA	4
2.3 BIOMASA IN OGLJIKOV DIOKSID	5
2.4 VLAŽNOST LESA	9
2.5 OSNOVE ZGOREVANJA LESNE BIOMASE.....	11
2.5.1 Gorenje	11
2.5.2 Pepel.....	13
2.5.3 Energijska vrednost.....	13
2.6 TEHNIKE ZGOREVANJA.....	14
3 MATERIAL IN METODE	15
3.1 SEKANCI.....	15
3.1.1 Določitev vsebnosti vode	16
3.1.2 Ohranjenost lesa	16
3.2 SEKALNIK	16
3.3 KOTEL	17
3.4 MERILNIK TOPLOTE	21
4 REZULTATI.....	23

4.1	PORABA ENERGIJE ZA IZDELAVO SEKANCEV	23
4.2	VPLIV VLAGE NA KURILNOST	24
4.3	VPLIV DREVESNE VRSTE NA KURILNOST	26
4.4	VPLIV OHRANJENOSTI LESA NA KURILNOST	27
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	28
5.1	RAZPRAVA	28
5.2	SKLEPI	31
6	POVZETEK	32
7	VIRI	33
	ZAHVALA	

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Prikaz vprašanj, s katerimi se ukvarja lastnik gozda, ko razmišlja o izdelavi sekancev (Wittkopf, 2005:4).....	5
Slika 2: Kroženje ogljikovega dioksida (Butala in Turk, 1998:2).....	6
Slika 3: Energetska bilanca lesa, glede na njegovo izkoriščenost (Wittkopf, 2005:163).....	8
Slika 4: Dejavniki, ki vplivajo na kurilno vrednost lesa (Krajnc in Kovač, 2003:8).	9
Slika 5: Tri stopnje zgorevanja lesne biomase: segrevanje, sušenje in piroliza (levo), oksidacija plinov (sredina), oksidacija oglja (desno) (Butala in Turk, 1998:12).	11
Slika 6: Shema gorenja lesne biomase (Butala in Turk, 1998:12).	12
Slika 7: Drevesne vrste, ki smo jih uporabili za izdelavo lesnih sekancev.	15
Slika 8: Sekalnik, ki melje les zneposrednodirektno v zalogovnik za sekance.....	17
Slika 9: Skica kotla FRÖLING TURBOMATIC (Fröling, 2016).....	19
Slika 10: Kotel Fröling turbomatic 48.....	20
Slika 11: CF Echo II (Enerkon, 2011).....	22
Slika 12: Porabljen energija za izdelavo sekancev glede na energijo, ki jo pridobimo iz sekancev.	23
Slika 13: Kurilna vrednost lesnih sekancev na m ³ glede na delež vlažnosti lesnih sekancev s standardnim odklonom.	24
Slika 14: Kurilna vrednost lesnih sekancev na kg glede na vlažnost lesnih sekancev s standardnim odklonom.....	25
Slika 15: Kurilne vrednosti lesnih sekancev različnih drevesnih vrst pri vlažnosti lesa 23%.	26
Slika 16: Kurilna vrednost lesnih vrst glede na volumen v primerjavi s kurilno vrednostjo ohranjene bukve z 9 % vlažnostjo.....	27

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Okrajšava	Pomen
u	vlažnost lesa
w	vsebnost vode
m_w	masa svežega lesa
m_0	masa sušilnično suhega lesa
m^3	kubični meter
nm^3	nasuti meter
kg	kilogram
kWh	kilovatna ura
Q	odvedena energija
m_{vode}	masa vode
T_1	vstopna temperatura vode
T_2	izstopna temperatura vode

SLOVARČEK

Atro-tona je merska enota za težo ene tone absolutno suhe lesne mase.

Črni ogljik je izraz za črne saje in je produkt nepopolnega zgorevanja goriv, ki vsebujejo ogljik.

Gostota nasutja je masa deleža trdega goriva deljena s prostornino zabojnika, ki ga lesno gorivo napolni v določenih pogojih. Izraža se v kg/nm^3 .

Kubični meter (m^3) je prostornina lesa brez vmesnih, praznih prostorov (prostornina kocke s stranicami 1 m). Uporablja se kot mera za okrogli les (goli).

Kurilnost (H) je razlika entalpij udeleženih snovi pred in po zgorevanju pri konstantnem tlaku. Enota za kurilnost je MJ/kg.

Lambda sonda je senzor, ki je vgrajen v sodobni kotel na lesne sekance in z zbiranjem podatkov skrbi za optimalno razmerje med gorivom in zrakom.

Sekanci so drobno nasekani kosi lesa, katerih največja dimenzija ne presega 10 cm. Izdelujemo jih s pomočjo sekalnika- stroja, ki melje les. Izdelani so iz drobnejšega, manjvrednega, odpadnega lesa. Kakovost lesnih sekancev je odvisna od vlažnosti in kakovosti vhodnega lesa in tehnologije s katero so proizvedeni.

Vsebnost vode w (%) je delež mase vode v lesu glede na maso vlažnega lesa.

Vlažnost u (%) je delež mase vode v lesu glede na maso sušilnično (absolutno) suhega lesa.

Turbomatic je ime serije kotlov na lesne sekance, proizvajalca Froling.

1 UVOD

Ogrevanje z lesno biomaso je tradicionalen način ogrevanja na slovenskem podeželju (Kranjc in Kovač, 2003). Les se je že tisočletja uporabljal kot osnovni energent za ogrevanje in kuhanje. Naši predniki so vedno uporabljali manjvreden, drobnejši, že uporabljen les za ogrevanje in kuhanje. Izdelovali so butare iz vej, čistili gozd in uporabljali odslužen les. Vrednejše sortimente lesa so lahko uporabili le za izdelavo končnih izdelkov.

Zaradi višjega standarda in nizke cene fosilnih energentov so tudi na podeželju za ogrevanje vse pogostejše uporabljali fosilna goriva. Preprosteje je pritisniti na gumb, kot pripraviti les za kurjavo.

S pojavom sodobnih kotlov in vse dražjih fosilnih goriv, s spodbudami države s subvencioniranjem naprav na obnovljive vire energije, je ponovno postalo aktualno ogrevanje na les. Zaradi vsakodnevnega medijskega bombardiranja o globalnem segrevanju in negativnih posledic zaradi uporabe fosilnih goriv, se je podeželsko prebivalstvo začelo vračati k tradicionalnim oblikam ogrevanja. S tem prispevajo tudi svoj delež k nizkoogljični družbi.

Ker kvaliteten les dostikrat ni prepoznan po svoji vrednosti, se žal množično uporablja za proizvodnjo toplote, pod pretvezo, da je to brezogljična energija. Vrednejše sortimente lesa je smiselno predelati, iz njega narediti končne izdelke. Tako bo ogljik dalj časa ostal vezan v njem. Ko les zakurimo, iz njega poleg toplote dobimo samo še vodo in ogljikov dioksid. Za kurjenje je dovolj dober tudi les slabše kakovosti.

Vse več je površin, ki se zaraščajo (Golob in sod., 1994). Tam rastejo po navadi manj ekonomsko zanimive drevesne in grmovne vrste. Pri ponovni rekultivaciji se ta les lahko uporabi za ogrevanje. S tem dobimo precej poceni energijo in površine, na katerih bomo lahko ponovno pridelovali hrano. Z diplomskim delom želimo dokazati, da je tudi manj vreden les primeren za ogrevanje.

S povečanjem rabe lesne biomase se bo zmanjšala naša odvisnost od uvoza fosilnih goriv. Zmanjšali bomo tudi izpuste toplogrednih plinov in omogočili nastanek novih delovnih mest predvsem na ruralnih, z gozdom bolj poraščenih območjih (Kranjc, 2007).

Na naši kmetiji (kmetija Potokar) imamo od leta 2005 postavljen sodoben kotel na lesne sekance, s katerimi trenutno ogrevamo hišo. Odločili smo se, da pri izdelavi diplomskega dela ugotovimo smiselnost uporabe manj vrednega lesa pri ogrevanju kmečke hiše.

1.1 NAMEN NALOGE

Namen naloge je ugotoviti, katere gozdne sortimente je vredno kuriti v sodobnih kotlih na lesne sekance. V realnih razmerah želimo ugotoviti, kako vlaga lesa vpliva na proizvodnjo energije, kako je kurilnost odvisna od drevesne vrste in da je tudi trhel les še vedno smiselno in gospodarno spraviti iz gozda ter iz njega narediti sekance. Ugotoviti želimo porabo energije, ki jo porabimo za spravilo lesa iz gozda in izdelavo sekancev.

1.2 DELOVNA HIPOTEZA

Manj vreden les je smiselno spraviti iz gozda in ga uporabiti za kurjavo kot lesne sekance. Vlaga in drevesna vrsta imata vpliv na kurilnost lesnih sekancev. Poraba energije iz fosilnih goriv za izdelavo lesnih sekancev bo majhna.

2 PREGLED OBJAV

2.1 BIOMASA

Biomasa je vsa organska snov. Energetika obravnava biomaso kot organsko snov, ki jo lahko uporabimo kot vir energije (Elementary ..., 2016).

Biomasa je oblika shranjene sončne energije in je na voljo v številnih različnih oblikah: les in lesni ostanki, ostanki iz kmetijstva, zelne rastline, ki so uporabne za proizvodnjo energije, ostanki pri proizvodnji industrijskih rastlin, sortirani odpadki iz gospodinjstev, odpadne gošče oziroma usedline ter organska frakcija mestnih komunalnih odpadkov in odpadne vode živilske industrije. Biomasa je obnovljiv vir energije (Biomass heating, 2009).

V skupino lesne biomase uvrščamo (Pogačnik in Kranjc, 2000):

- manj kvaliteten les iz gozdov,
- les iz površin v zaraščanju,
- les iz kmetijskih in urbanih površin,
- lesne ostanke primarne in sekundarne predelave lesa in
- odslužen (neonesnažen) les.

Energija iz lesa je proizvedena v sodobnih kotlih v lokalnem okolju, obnovljiva, ogljično nevtralna, trajnostna. Lahko je zanesljiv vir toplote, elektrike in bio goriv (Wood ..., 2009).

2.1.1 Lesna biomasa

Lesna biomasa je nakopičena masa, nad in pod zemljo, korenine, les, lubje, listje živih in mrtvih lesnatih grmov in dreves.

Viri lesne biomase uporabne v energetske namene so (Kranjc in Kovač 2003):

- manj kvaliteten les iz gozdov: redni posek (manj kvalitetni sortimenti), sečni ostanki (vejevina in vrhači, vendar ne tanjši od 5 cm premera), redčenja (drobni sortimenti), premene, sanitarne sečnje,
- les s kmetijskih in urbanih površin (krčitve grmišč, obnove sadovnjakov in vinogradov, vzdrževanje parkov in zelenic, čiščenje pašnikov),
- lesni ostanki primarne in sekundarne predelave lesa: primarna predelava lesa (krajniki, žamanje, očelki, žaganje), sekundarna predelava lesa (lesni prah, skoblanci), lubje in

- odslužen (neonesnažen) les (lesna embalaža, odpaden gradbeni les, pohištvo, odpadki na komunalnih odlagališčih).

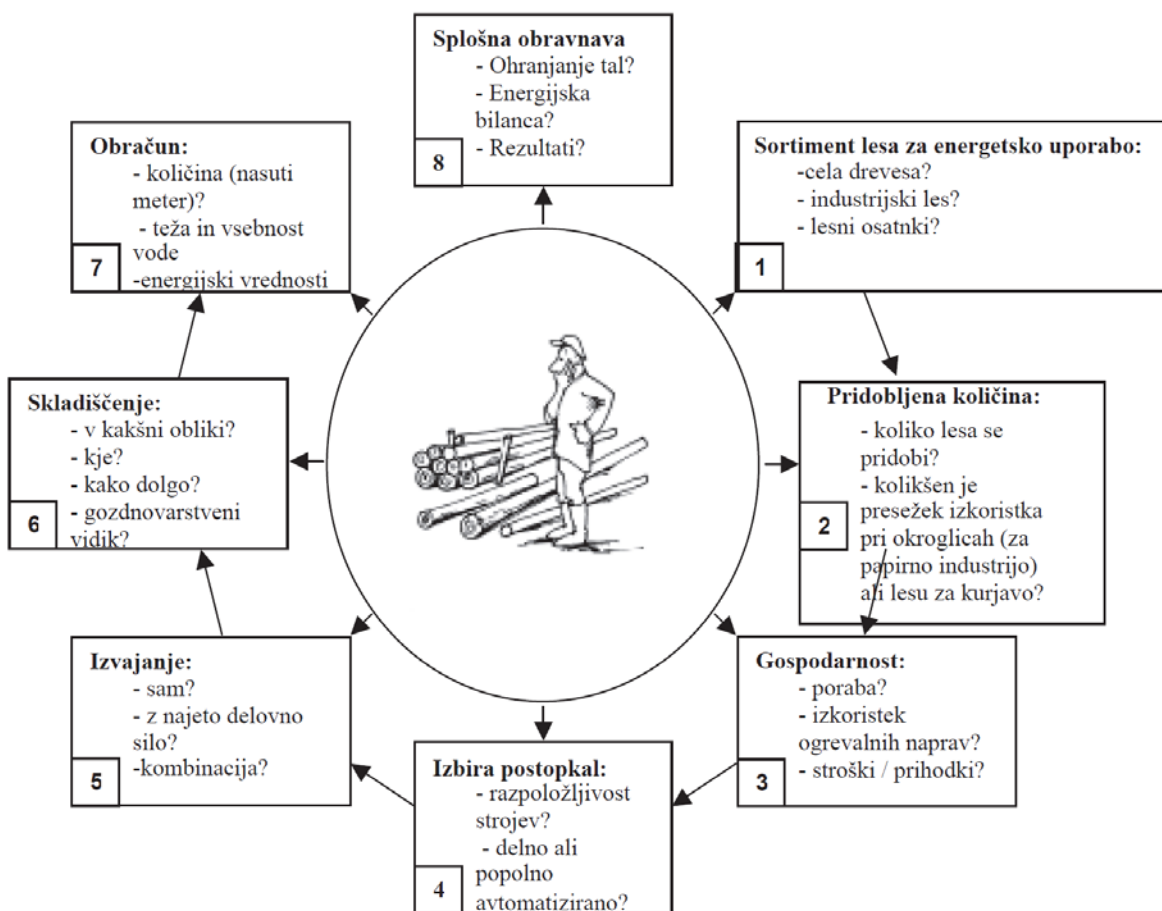
Kurilna vrednost lesne biomase je v primerjavi s kurilnim oljem ali zemeljskim plinom (oba približno 10 kWh na liter oziroma kubični meter) občutno manjša, vendar je ogrevanje z njo, stroškovno ugodnejše (Primc, 2011).

Pomembne so tudi druge prednosti lesa. Les je edini energetski vir, ki ga enostavno lahko pridobimo v naši neposredni bližini. Do njega lahko pridemo tudi v izrednih razmerh, kot so vojne, naravne katastrofe. Za lastnike gozdov predstavlja dodaten vir zaslužka, še posebej na odročnih, hribovitih delih Slovenije. Njegova uporaba je varna, ekološke katastrofe so izključene (razlitje, eksplozije). Slabosti ogrevanja z lesom so črni ogljik, delci PM10, pri nepopolnem gorenju ogljikov oksid (Biomasa: Prednosti ...2016).

2.2 LESNA GORIVA

Definicije lesnih goriv skladno z evropsko tehniško specifikacijo (SIST-TS CEN/TS 14588, 2004) (Kranjc in sod., 2009):

1. Drva: les, ki je razžagan in po potrebi cepljen z namenom energetske izrabe v napravah, kot so kotli, kamini ali kotli za centralno ogrevanje individualnih hiš oziroma stanovanj. Drva imajo praviloma določeno dolžino od 150 do 1000 mm.
2. Polena: energetski les, nasekan z ostrimi sekalnimi ali cepilnimi napravami, pri čemer ima večina gradiva dolžino 150 do 500 mm.
3. Cepanice: energetski les, razcepljen in razrezan večinoma na dolžino 500 mm ali več.
4. Okroglice: energetski les, razrezan večinoma na dolžino 500 mm ali več.
5. Lesni sekanci: nasekana lesna biomasa v obliki koščkov z določeno velikostjo delcev, ki jih izdelujejo z mehansko obdelavo z ostrim orodjem, kot so noži. Lesni sekanci so nepravilne pravokotne oblike in značilne dolžine od 5 do 50 mm ter z majhno debelino v primerjavi z drugimi dimenzijami.
6. Grobi lesni sekanci: les, nasekan z ostrimi sekalnimi napravami, pri čemer je dolžina večine delcev bistveno daljša kot pri lesnih sekancih, oblika pa je bolj robata. Značilna dolžina grobih lesnih sekancev znaša od 50 do 150 mm.
7. Grobi lesni drobir: energetski les, v obliki koščkov različnih velikosti in oblik, ki se proizvajajo z lomljenjem in drobljenjem s topim orodjem, kot so valji ali kladiva



Slika 1: Prikaz vprašanj, s katerimi se ukvarja lastnik gozda, ko razmišlja o izdelavi sekancev (Wittkopf, 2005:4).

2.3 BIOMASA IN OGLJIKOV DIOKSID

Les je nakopičena sončna energija, nastala s fotosinezo. Fotosinteza je biokemijski proces, ko se ob pomoči klorofila pod vplivom sončne svetlobe iz vode (H_2O) in ogljikovega dioksida (CO_2) tvorita glukoza ($C_6H_{12}O_6$) in kisik (O_2).

Fotosintezo ponazarja naslednji kemijski zapis:



Sončna energija se shranjuje v obliki organskih ogljikovih spojin v rastlinah. Nasproten proces poteka pri razkrajanju ali gorenju. CO_2 , ki se sprošča pri gorenju biomase, se veže v nove rastline. Zaključen krog CO_2 pri gorenju biomase ne prispeva k porastu CO_2 v atmosferi, zato pravimo, da je uporaba biomase glede toplogrednih plinov emisijsko nevtralna, dokler je poraba enaka prirastu. Uporaba lesne biomase za energetske namen naj ima prednost pred naravnim razkrajanjem (trohnenjem). Pri energetski uporabi pridobimo

ekvivalenten delež energije, to pa pomeni manjšo rabo fosilnih goriv. Biomaso lahko uporabljamo kot material ali kot gorivo. Uporaba biomase v energetske namene naj ne bo prednostno, saj če jo uporabimo kot surovino za končne izdelke, se CO_2 sprosti, ko izdelek zavržemo in ga uporabimo v energetski namen. Tako se CO_2 sprosti v naravo mnogo kasneje (Butala in Turk, 1998).

Les je sestavljen iz: 40–50 % celuloze, 20–30 % lignina in 20–30 % sestavin, kot so ogljikovi hidrati, maščobe, čreslovina in minerali.

Absolutno suha lesna masa pa ima v povprečju naslednji kemijski sestav: 51 % ogljika (C), 42 % kisika (O), 6 % vodika (H), 1 % dušika (N) in mineralov. Tudi les ob nepravilnem gorenju ni okolju popolnoma neškodljivo kurivo, vendar lahko emisije z ustrezno tehnologijo zmanjšamo. Plini, ki se sproščajo pri izgorevanju lesne biomase, so del naravnega kroženja elementov v naravi (ogljik, dušik, itd.) in niso breme za okolje, kot je to pri rabi fosilnih goriv (slika 2) (Kranjc in Kovač, 2003).



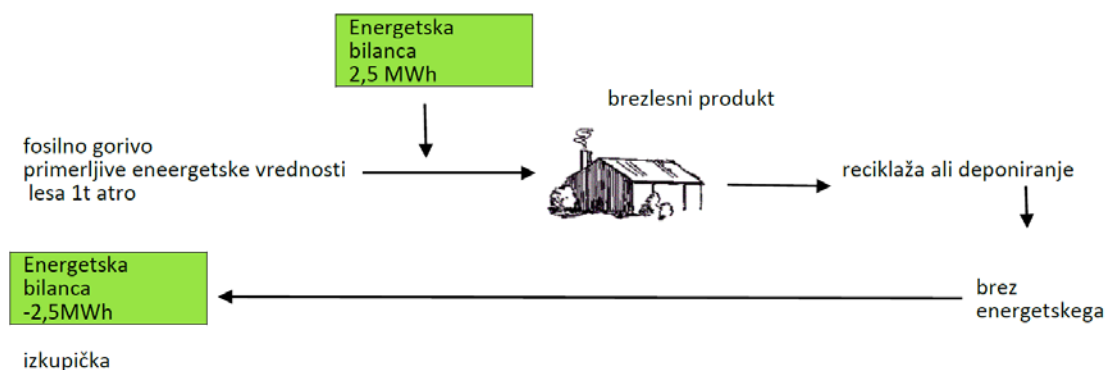
Slika 2: Kroženje ogljikovega dioksida (Butala in Turk, 1998:2)

V primeru, da les uporabimo kot surovino za izdelavo lesnih izdelkov, se ogljik ne sprosti v atmosfero. Ogljik je daljši čas vezan oziroma "uskladiščen" v lesu, vse dokler izrabljeni lesni izdelki niso odvrženi na odpad ali porabljeni za pridobivanje energije (Lipušček in Tišler, 2003).

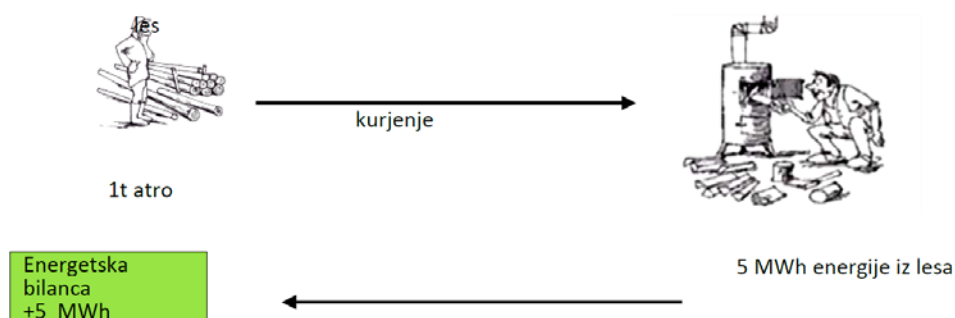
Ko je les odvržen, lahko razpade, in če lesna biomasa biološko razpade v 100 % aerobnih razmerah, se iz nje sprosti enak delež ogljikovega dioksida, kot se ga je vezalo med procesom fotosinteze (Börjesson in Gustavsson, 2000). Vendar kot navajata Börjesson in Gustavsson (2000), biomasa v naravnem okolju ne razpada v 100 % aerobnih razmerah,

ampak razpad poteka tudi v anaerobnih razmerah, v katerih se namesto ogljikovega dioksida tvori metan, ki ima z vidika toplogrednih plinov devetkrat večji potencial od ogljikovega dioksida, če ju primerjamo na volumski osnovi, oz. enaindvajsetkrat večji potencial, če ju primerjamo na osnovi mase. Kot navajata Börjesson in Gustavsson (2000) je s podatkov švedske agencije za zaščito okolja razvidno, da biomasa ki razpade v biološkem procesu tvori 60 % metana in 40 % ogljikovega dioksida. V primeru, da je lesna biomasa uporabljena kot surovina za pridobivanje energije, se v popolnem procesu izgorevanja tvorijo emisije ogljikovega dioksida, vodne pare ter pepel, v katerem so minerali. V realnem procesu gorenja pa se pojavljajo tudi emisije ogljikovega oksida, neizgorelih ogljikovodikov, dušikovi oksidi, dim in saje, katerih delež je različen glede na klimatske razmere in konstrukcijske lastnosti kotla (slika 3) (Ndiema in sod., 1998).

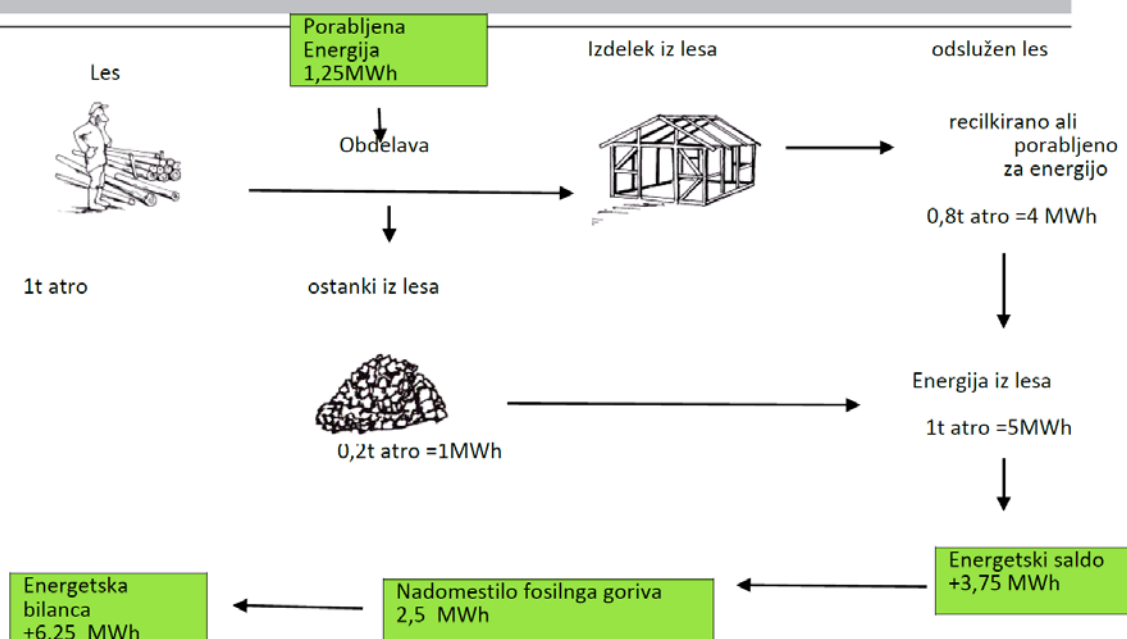
PRIMER BREZ LESA



PRIMER IZRABE LESA ZA KURJAVO

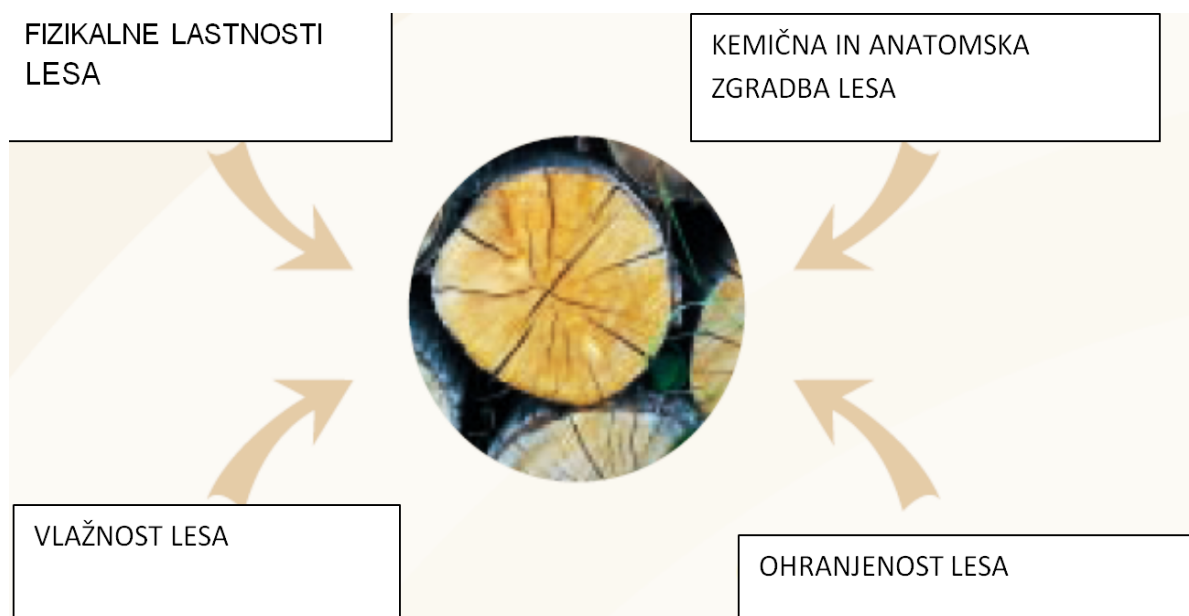


PRIMER IZRABE LESA KOT MATERJAL IN NJEGOVA SEKUNDARNA ENERGETSKA IZRABA



Slika 3: Energetska bilanca lesa, glede na njegovo izkoriščenost (Wittkopf, 2005:163).

Lastnosti kuriva vplivajo na učinkovitost sistema za pridobivanje energije. Predvsem nas zanima, koliko toplote dobimo iz določene enote (mase, volumna) lesa z znano vsebnostjo vode. To lastnost imenujemo kurilna vrednost lesa (kWh/m³). Dejavniki, ki vplivajo na kurilno vrednost lesa so vlažnost in ohranjenost lesa, fizikalne lastnosti lesa in kemična ter anatomsko zgradbo lesa (slika 4).



Slika 4: Dejavniki, ki vplivajo na kurilno vrednost lesa (Kranjc in Kovač, 2003:8).

2.4 VLAŽNOST LESA

Les, kot naravni material, je higroskopičen. Hitrost in smer oddajanja vlage je odvisna od relativne temperature in vlažnosti zraka, higroskopske zgodovine ter količine vode v lesu. Vlažnost lesa vpliva na kurilno vrednost lesa. Za kilogram izparele vode se med gorenjem porabi 0,68 kWh energije (Kranjc in Piškur, 2011). Vsebnost vode v lesu pomeni razmerje med maso vode in skupno maso lesa in vode. Vlažnost lesa pa je razmerje med maso vode in maso popolno suhega lesa (Kranjc in Kovač 2003).

Vodo v lesu opredeljujemo z vlažnostjo, ki je izražena kot delež mase vode glede na maso lesa v absolutno suhem stanju (u) oziroma kot delež mase vode glede na maso vlažnega lesa (w). Delež je pogosto izražen v odstotkih (Kranjc in sod., 2009).

Vlažnost u (%)

Delež mase vode v lesu gleda na maso sušilnično (absolutno) suhega lesa.

$$u = \frac{m_{1V} - m_0}{m_0} * 100 \quad \dots (2)$$

Vsebnost vode w (%)

Delež mase vode v lesu gleda na maso vlažnega lesa. To mero najpogosteje uporabljamo pri trženju lesnega goriva.

$$w = \frac{m_{1V} - m_0}{m_{1V}} \quad \dots (3)$$

m_w = masa svežega lesa (kot dobljeno)

m_0 = masa sušilnično suhega lesa

Pretvorbene formule

Za izračun u iz w in obratno uporabljamo naslednji dve formuli:

$$u = \frac{100 * w}{100 - w} \quad \text{in} \quad w = \frac{100 * u}{100 + u} \quad \dots (4)$$

Glede na vsebnost vode v lesu ločimo (Kranjc in Kovač 2003):

- svež les (takoj po poseku), ki ima vlažnost nad 40 %,
- gozdno suh les (približno pol leta po poseku), ki ima vlažnost med 20 in 40 %,
- zračno suh les (daljše sušenje na zračnih skladiščih) vlažnost lesa je do 15 % in
- tehnično suh les (les sušen v sušilnici), z vlažnostjo lesa med 6 in 12 %.

2.5 OSNOVE ZGOREVANJA LESNE BIOMASE

2.5.1 Gorenje

Gorenje je oksidacijski proces, med gorljivo snovjo in kisikom, pri katerem se sprošča toplota. Da snov gori, je razvidno iz plamena. Gorenje je nepovratna kemijska reakcija. Sproščena kemična notranja energija goriv se sproti prenaša na molekule, kot njihova kinetična energija, poveča se kalorični del notranje energije in temperatura telesa. Dobimo vir toplote. Burna reakcija s kisikom lahko pripelje do eksplozije. V nekaterih izjemnih primerih lahko gorenje poteka tudi brez kisika. Proces je dokončen, ko v produktih kemičnih reakcij ni več spojin sposobnih za nadaljnjo transformacijo.

Če je količina kisika zadostna je gorenje popolno. To je mogoče le ob prisotnosti zadostne količine kisika in zadostnem času trajanja ugodnih razmer za gorenje. Za popolno zgorevanje je značilen prozoren dim, ki postane bel, ko se iz njega izloči vodna para. O nepopolnem gorenju govorimo takrat, ko oksidacijski proces ne poteče v popolnosti. Za nepopolno zgorevanje je lahko več vzrokov, kot so premajhna vsebnost kisika, slabo mešanje, intenzivno hlajenje plamena itd. Najbolj značilen pokazatelj nepopolnega zgorevanja je karakterističen, sajast črn dim in produkti nepopolne oksidacije.

Pri procesu zgorevanja se izmenjujejo atomi v posameznih molekulah. Nastanejo nove molekule, vendar tako, da ostane število atomov istih snovi na začetku, med procesom in na koncu enako, kar pomeni, da izračuni procesa gorenja potekajo na osnovi ohranitve mase. Med procesom se snovi preobražajo preko niza medprocesov, kemičnih reakcij, ki so povratne, vzporedne, verižne. Sprošča se kemično vezana notranja energija goriva, ki se pojavi kot kalorična notranja energija produktov zgorevanja (Oman in Senegačnik, 2004).

Gorenje lesa poteka v treh stopnjah (slika 5) (Dolenšek in sod., 1999).

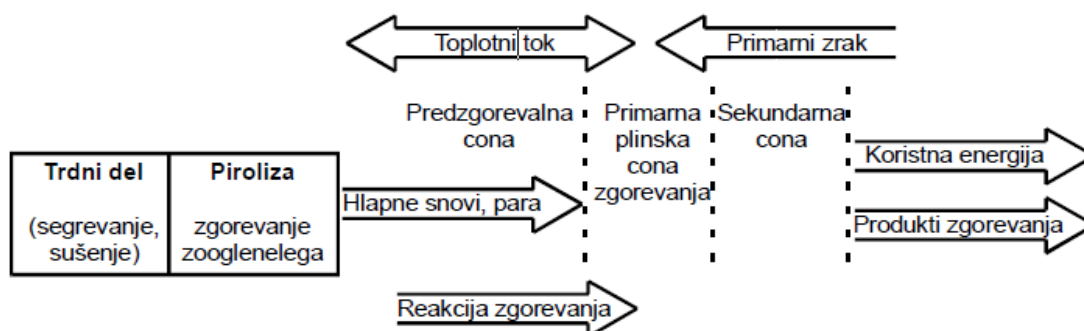


Slika 5: Tri stopnje zgorevanja lesne biomase: segrevanje, sušenje in piroliza (levo), oksidacija plinov (sredina), oksidacija oglja (desno) (Butala in Turk, 1998:12).

Prva stopnja gorenja je segrevanje do temperature 100 °C, ko se gorljiva snov segreva in suši. Trajanje in poraba energije pri tej stopnji sta odvisni od pripravljenosti gorljive snovi na gorenje (debelina, vlažnost). V primeru, da se v dimnih plinih pojavi preveč vlage, če kurimo preveč vlažen les, postane dim težak in gost ter ga vleče proti tlom. Ta vlaga je škodljiva za kotel, saj kondenzira na stenah hladnega dimnika in ga poškoduje.

Druga stopnja je, ko temperatura doseže 100 °C in več in se les prične uplinjati ter termično razpadati (piroliza). V nadaljevanju procesa gorenja razpadejo trdni elementi, kot sta celuloza in lignin, v plinasto stanje. Pri tej stopnji gorenja potekata dva procesa, in sicer termični razpad lesa (piroliza), ki je endotermični proces in porablja energijo, med zgorevanjem se energija sprošča in ga imenujmo eksotermični proces. Endotermični in eksotermični proces vzporedno med drugo stopnjo gorenja potekata istočasno. Pri termičnem razpadu se sproščajo tudi nekatere agresivne snovi, kot je ocetna kislina, ki se posebno pri začetni stopnji gorenja in v primeru dušenega procesa, ko je zmanjšana toplotna moč kotla, odlaga na stene kotla ali dimnika v obliki saj. Razpadanje lesa označujemo kot primarno zgorevanje. Pri stopnji sekundarnega zgorevanja moramo prisilno dovajati zrak v področje dogorevanja. Tako pri dovolj visokih temperaturah prihaja do popolnega zgorevanja in do sproščanja največje možne količine toplote.

Tretja stopnja – oksidacija oglja – pri tej stopnji gorenja so temperature med 400 °C in 1300 °C. Pri temperaturi 400 °C reagirajo lesni plini z zračnim kisikom. Pri tej stopnji gorenja opazimo plamen ali oksidacijo. Pri oksidaciji lahko dosežemo temperaturo 1300 °C, oglje se uplini in zgori pri temperaturi višji od 600 °C. Les pri dovolj visoki temperaturi in zadostni količini kisika popolnoma zgori, za njim ostanejo le negorljivi mineralni ostanki, ki jim rečemo pepel. Pepel pri kurjenju na klasična polena ne preseže 1 % izhodiščne mase drv (slika 6) (Dolenšek in sod. 1999).



Slika 6: Shema gorenja lesne biomase (Butala in Turk, 1998:12).

2.5.2 Pepel

Pepel so negorljivi ostanki lesa. To so mineralne snovi, ki jih je vseboval les, so nepopolno zgorelo lesno oglje. Količina pepela je odvisna od drevesne vrste, kakovosti lesa, iz katerih delov drevesa je bil les (veje, vrhači) in kako popolno je bilo gorenje. V čistem lesnem pepelu prevladujejo kalcij, kalij, magnezij, fosfor, silicij, natrij in majhen delež železa ter druge kovine. Lesni pepel lahko uporabimo kot naravno gnojilo, saj so minerali, ki jih vsebuje rastlina, potrebne za rast. Kot gnojilo ga lahko uporabljamo le, če smo pri ogrevanju uporabili neonesnažen les (Ravnik, 2008).

2.5.3 Energijska vrednost

Energijska vrednost goriva izraža količino energije, ki se sprosti med popolnim izgorevanjem enote mase goriva. Večji kot je delež vode v lesu, manjša je energijska vrednost lesa, ker se del energije lesa porabi za izhlapevanje vode. Za izhlapevanje kilograma vode se porabi 2,44 MJ energije (Kranjc in sod., 2009).

Kurilnost (H) je razlika entalpij udeleženih snovi pred zgorevanjem in po zgorevanju pri stalnem tlaku. Točne vrednosti kurilnosti za goriva dobimo z merjenjem v kalorimetru, približne vrednosti lahko izračunamo (Puhar in Stropnik, 2002):

$$H_i = 33,9m_c + 121,4\left(m_{H_2} - \frac{m_{O_2}}{8}\right) + 10,5m_s - 2,5m_{H_2O} \quad [MJ/kg] \quad \dots (5)$$

H_i = kurilnost

Ker les vsebuje tudi vodo imamo naslednje energijske vrednosti:

Kurilnost (H_i) (prej spodnja kurilna vrednost – net calorific value (NCV)): je tista količina toplote, ki jo dobimo z zgorevanjem goriva, če dimne pline ohlajamo samo do temperature rosišča vodne pare, ki je v dimnih plinih. Voda, ki se sprošča, se šteje kot para, kar pomeni, da smo odšteli toplotno energijo, nujno za spremembo vode v paro (latentna toplota uparjanja vode pri 25 °C).

Zgorevalna toplota (H_s) (prej zgornja kurilna vrednost – gross calorific value): je tista količina toplote, ki se sprosti pri gorenju, vključno s toploto vodne pare v dimnih plinih (latentna toplota). V produktih izgorevanja se voda šteje kot tekočina. Kadar ni posebej opredeljeno, je “energijska vrednost” mišljena kot kurilnost oziroma neto energijska vrednost (NCV). Gostota energije izraža razmerje med vsebnostjo energije goriva in prostornino, ki jo zavzame gorivo (Kranjc in sod., 2009).

2.6 TEHNIKE ZGOREVANJA

Zgorevanje na klasični rešetki je najstarejši način kurjenja biomase. Tehnologija kurjenja lesne biomase na rešetki je še vedno aktualna:

- pri hišnih (individualnih) napravah (do 500 kW),
- pri manjših industrijskih napravah (do 60 MW) in
- pri uporabi zelene biomase.

Klasične hišne naprave delimo glede na način odgorevanja na naprave z zgornjim in spodnjim odgorevanjem. Pri zgornjem odgorevanju goriva gori le zgornji del v kurišču. Kurilne naprave so opremljene z dovodom primarnega zraka skozi rešetko, sekundarni zrak pa se dovaja v zgorevalno komoro v območje plinifikacije. Pri napravah s spodnjim odgorevanjem zgoreva hkrati le del goriva, dokončno zgorevanje pa poteka v posebni komori. V obeh primerih se kot gorivo uporabljajo polena. Nalaganje goriva je ročno.

Specialne kurilne naprave za uporabo lesne biomase s prezračevanim kuriščem (imenujejo se tudi kurilne naprave z obrnjenim pretokom) omogočajo popolno zgorevanje in so okolju neškodljive. Zalogovnik se polni ročno z vrha s poleni. Ventilator dovaja v kurišče svež (primarni) zrak. V zgornjem delu kurišča se les osuši, sledi faza uplinjanja lesa in prvega nastanka plamena, ko se vnamejo lahko gorljive snovi. Namesto rešetke imajo te naprave keramično ploščo. Skozi ploščo se vrtinčijo produkti zgorevanja v sekundarno komoro, kjer se mešajo s sekundarnim zrakom. V sekundarni komori poteka proces glavnega zgorevanja pri temperaturah do 1100 °C, pri čemer zgorijo tudi težko gorljive substance goriva. Produkti zgorevanja zapuščajo komoro skozi odprtino v keramični plošči, kjer se proces zgorevanja konča. Plamen je modre barve in spominja na zgorevanje plinastih goriv. Nalaganje goriva enakomerne velikosti (sekanci, briketi, peleti, žagovina, lesni prah) je mogoče avtomatizirati. Pomembno je enakomerno doziranje goriva, sicer prihaja do nepopolnega zgorevanja, kar povzroča povečanje emisijskih vrednosti. Avtomatizirane naprave za kurjenje lesne biomase gradimo od nekaj deset kW toplotne moči pa do več deset MW (Butala in Turk, 1998).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 SEKANCI

Za izdelavo sekancev smo uporabili les:

- bukve (*Fagus sylvatica*),
- smreke (*Picea abies*),
- gabra (*Carpines betules*),
- hrasta (*Quercus robur*),
- leske (*Corylus avellana*),
- topola (*Populus alba*) (slika 7).



(1) Bukev, (2) topola, (3) hrast, (4) gaber, (5) smreka in (6) leska (foto:Potokar).

Slika 7: Drevesne vrste, ki smo jih uporabili za izdelavo lesnih sekancev.

Les smo posekali in ga iz gozda spravili pod streho meseca marca 2009. Pustili smo ga, da se je sušil do novembra 2009. Iz vsake drevesne vrste smo naredili 3 m³ sekancev in jih stehali. Vzeli smo tudi vzorec za določitev vsebnosti vode.

3.1.1 Določitev vsebnosti vode

Vsebnost vode smo določili tako, da smo vzeli vzorec 2 kg sekancev in ga sušili v sušilniku do konstantne mase pri 105 ° C. Nato smo stekali vzorec in iz razlike izračunali delež vode.

3.1.2 Ohranjenost lesa

Vpliv trhlости lesa na njegovo kurilno vrednost smo določali pri bukvi in gabru. Popolno ohranjen les je bil posekan in puščen v okroglicah pod streho, kjer se je posušil. Delno trhel les je bil že eno leto posekan in je ležal na gozdnih tleh. Še bolj trhel les je bil posekan pred tremi leti in puščen v gozdu.

3.2 SEKALNIK

Sekalnik je stroj, s katerim okrogel les ali lesne ostanke in odslužen les predelamo v sekance. Lahko ga poganja lasten motor ali pa je gnan preko kardanske gredi s traktorjem (slika 8).

Glede na velikost ločimo (Čebul in Krajnc, 2011):

- lahki sekalniki: (zmogljivost je 5 nm³/h oziroma 20 t/dan, premer odprtine za dovajanje obdelovancev je 20 × 20 cm, kot priključek za 3-točkovni priklop na traktor ali z lastnim podvozjem. Poganja jih lastni motor ali traktor. Za pogon potrebujejo od 20 do 30 kW moči.),
- srednji sekalniki: (zmogljivost je 50 nm³/h oziroma 60 t/dan, premer odprtine za dovajanje obdelovancev je 30 × 30 cm, kot priključek za 3-točkovni priklop na traktor ali z lastnim podvozjem. Pogaja jih lastni motor ali traktor. Za pogon potrebujejo od 50 do 110 kW moči.),
- veliki sekalniki: (zmogljivost je 5 nm³/h oziroma 20 t/dan, premer odprtine za dovajanje obdelovancev je 20 × 20 cm, z lastnim podvozjem ali nameščeni na tovrnjaku. Pogaja jih lastni motor. Za pogon je potrebna večja moč od 150 kW.).



Slika 8: Sekalnik, ki melje les neposredno (direktno) v zalogovnik za sekance

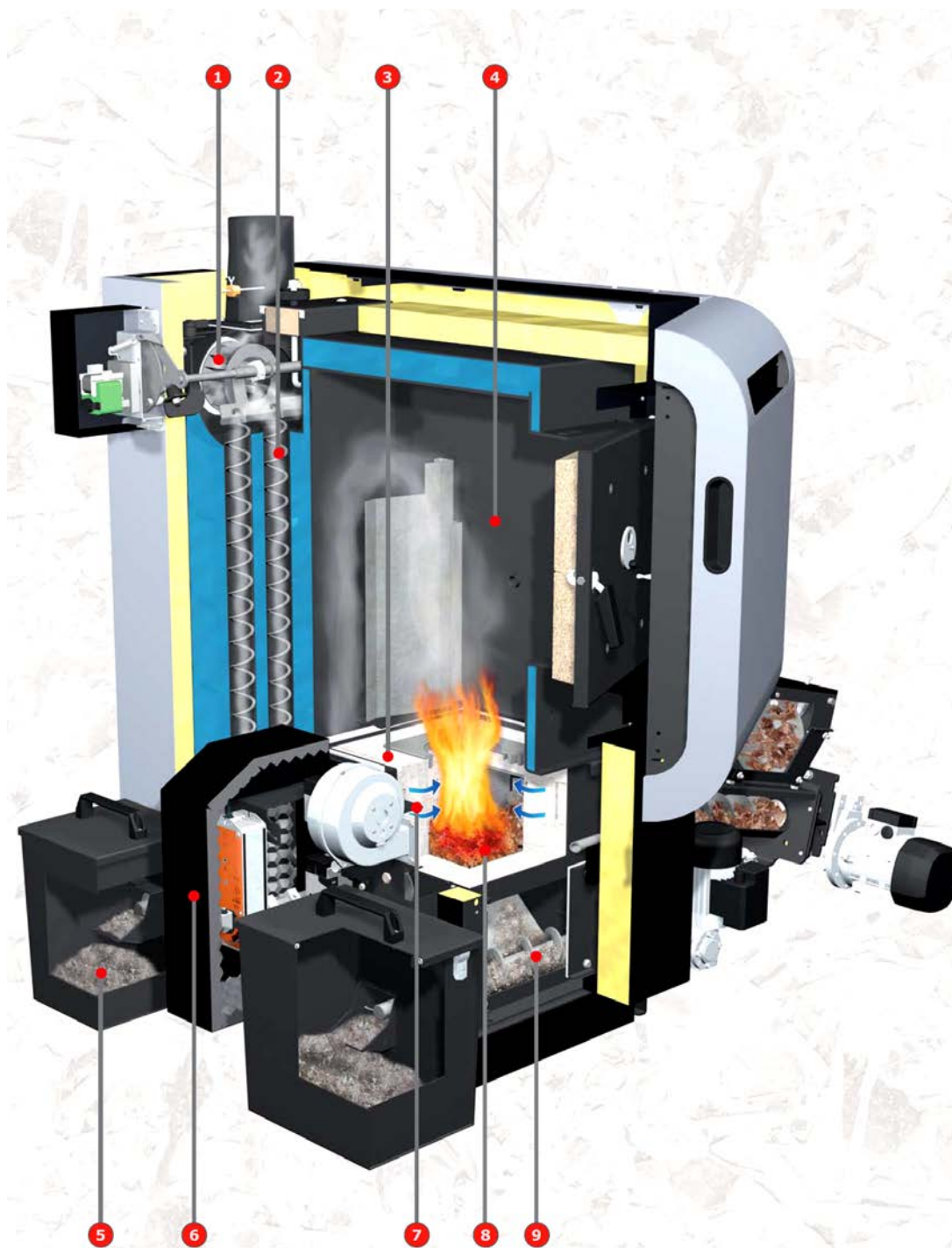
Za izdelavo sekancev smo uporabil sekalnik TS 30 proizvajalca Bider Bojan s. p., ki ga je poganjal traktor STEYR 9094. Bobenski sekalnik TS 30 je nošeni traktorski priključek, ki ima inovativno spiralno porazdeljene nože in zato potrebuje manjšo pogonsko moč. 8 nožev je po valju razporejenih tako, da je vsakokrat le en v sekalni legi. Sekalnik ima pregrajeno zračno turbino, ki preko cevi pošilja sekano lesno maso na skladišča ali prikolico .

Po podatkih proizvajalca za pogon sekalnika zadošča že traktor 44 kW (60 KM). Sekalnik ima vstopno za dovajanje lesa odprtino 30×30 cm. Dovajalni sistem, ki les poda do bobna z noži poganja hidromotor preko verižnice. Zmogljivost sekalnika je 10-15 m³ nasutih sekancev (Bider ..., 2014).

3.3 KOTEL

Iz skladišča se lesni sekanci s pomočjo zbirne naprave ter dovajalnega polžastega transportnega sistema dovajajo v kotel. Dovajalni sistem je narejen tako, da ima presipno loputo, ki preprečuje povratno gorenje v smeri skladišča za sekance. Če pa bi vseeno prišlo do povratnega ognja, je sistem opremljen z gasilnim sistemom na vodo, ki bi ogenj pogasil. Z sprotnim dodajanjem goriva in nadzorovanim vpihavanjem zraka se vseskozi zagotovi odličen izkoristek. Sodobni sistemi delujejo z elektronsko regulacijo, ki nadzoruje tako zgorevanje kakor tudi razdelitev toplote. Samodejni postopek vžiga goriva, samodejno čiščenje toplotnega izmenjevalca in samodejno odpepeljevanje je pri večini kotlov del standardne opreme.

Kotel je sestavljena iz dveh delov. V prvem delu poteka uplinjanje trdih goriv, v drugem pa popolno izgorevanje. Lesni plin, ki nastane pri uplinjanju lesa vstopi v gorilno komoro, kjer se nadzorovano meša z zunanjim ogretim zrakom, se vrtinči in dolgo zadržuje v komori in v največji možni meri zgori. S pomočjo lambde sondese zniža nivo škodljivih snovi v dimnih plinih in poveča izkoristek lesnih goriv. Lambda regulacija skrbi za krmiljenje vrtilne hitrosti ventilatorja in motornih loput za vpihovanje zgorevalnega primarnega in sekundarnega zraka. Priporočljivo razmerje za lesne ostanke je 1,3–1,8 (Puhar in Stropnik, 2002). Parametre o zgorevanju zbira sonda, da bi se ti parametri najbolj približali teoretičnim vrednostim, pa skrbi regulacija. V kombinaciji s senzorji zračnega pretoka se uravnava moč gorenja. Razlike v kvaliteti kuriva (vrsta lesa, vlažnost, izračun potrebe goriva itd.) so tako samodejno zaznane in nastavitve prilagojene. Nadzor gorenja z lambda sondo prispeva k popolnejšemu izgorevanju sekancev oz. drugih goriv, s tem se zmanjša poraba goriv in v zrak se spusti bistveno manjšo količino okolju škodljivih emisij. Lambda sonda zagotavlja le nujno potrebno količino kisika za proces izgorevanja in s tem povečuje izkoristek kotla. Poznamo tudi enostavnejše regulacije, ki krmilijo ventilator s pomočjo sonde za tipanje temperature dimnih plinov. Lopute za primarni in sekundarni zrak pa se vodijo ročno. Regulacija dovajanja zraka skrbi za nizke vrednosti emisij, ki so že tako v mejah normale. Izkoristki kotlov so nekje od 85 do 95 %. Na to odločilno vplivata kvaliteta in vlažnost goriva. Sodobni sistemi ogrevanja z lesno biomaso običajno ogrevajo vodo v zalogovnikih tople ogrevalne vode. Ti zalogovniki so namenjeni temu, da kotel deluje s polno močjo in se ne vklaplja takrat, ko so potrebe po toploti majhne. Takrat odjemalec dobi energijo iz hranilnika tople vode (sliki 9 in 10) (Urh in Kocjan, 2011).



(1) sesalni ventilator za dimnik, (2) cevni izmenjevalnik toplote s spiralnimi čistilniki, (3) s šamotom obloženo kurišče z usmerjeno odprtino za goreče pline, (4) izgorevalni prostor, (5) samodejni odstranjevalec pepela iz toplotnega izmenjevalca, (6) zvočna izolacija, (7) primarna in sekundarna regulacija zraka, (8) avtomatska kurilna rešetka s funkcijo vibriranja in prekucanja, (9) samodejni odstranjevalec pepela iz kurišča

Slika 9: Skica kotla FRÖLING TURBOMATIC (Fröling ..., 2016)



Slika 10: Kotel Fröling turbomatic 48

Za poskus smo uporabili kotel na sekance Turbomatic 48, proizvajalca Fröling, ki je kotel za kurjenje lesnih sekancev, (z dodatkom rešetke je možno kuriti tudi s poleni), z imensko močjo 48 kW. Naprava v celoti omogoča samodejno kurjenje in izpolnjuje zahteve predpisov o emisijah škodljivih snovi v dimu. Izkoristek energije je več kot 90 %. Sekanci se v kotel iz skladišča dovajajo z dvodelnim polžastim transporterjem. Da ne pride do povratnega ognja, je med polžastima transporterjema presipna loputa. Vžig sekancev poteka s pomočjo vdihovalnika toplega zraka. Dovajanje zraka v kurišče uravnava lambda sonda. Čiščenje cevnih toplotnih izmenjevalcev samodejno s pomočjo spiralastih čistilnikov. Odpepeljevanje poteka s pomočjo polža za odvajanje pepela v posodo, ki je poleg kotla. Poleg kotla je v kurilnici nameščen akumulator toplote z vgrajenim zalogovnikom sanitarne vode.

3.4 MERILNIK TOPLOTE

Merilnik toplotne energije, (včasih ga imenujemo tudi kalorimeter ali toplotni števec), je merilna naprava namenjena za meritev porabljene toplotne energije v stavbah ali posameznih stanovanjih. Merilnik toplotne energije izračuna količino oddane energije na osnovi razlike temperature dotoka in odtoka vode in pretokom vode. Prikaže jo v fizikalnih enotah (kWh, MWh). Toplotni števec sestavlja elektronska računska enota, dve temperaturni tipali za merjenje temperature ogrevane vode v dovodu in povratku ter merilnika pretoka (Nemec, 2011).

$$Q = m_{\text{vode}}(T_2 - T_1) \quad \dots (6)$$

Q = odvedena energija

m_{vode} = masa vode

T_1 = vstopna temperatura vode

T_2 = iztopna temperatura vode

Uporabljajo se kot glavne merilnike v toplotnih postajah, kjer merijo predano toploto objektu in na osnovi tako izmerjenih količin dobavitelj toplote izda tudi račun za dobavljeno toploto (Malovrh in sod., 1998).

Poznamo dve vrsti merilnikov: mehanske z merilniki pretoka – vodomernimi števci in ultrazvočne merilnike. Prednost mehanskih je nižja cena, ultrazvočnih pa nimajo gibljivih delov in so manj občutljivi na vpliv nečistoč v ogrevalnem sistemu.

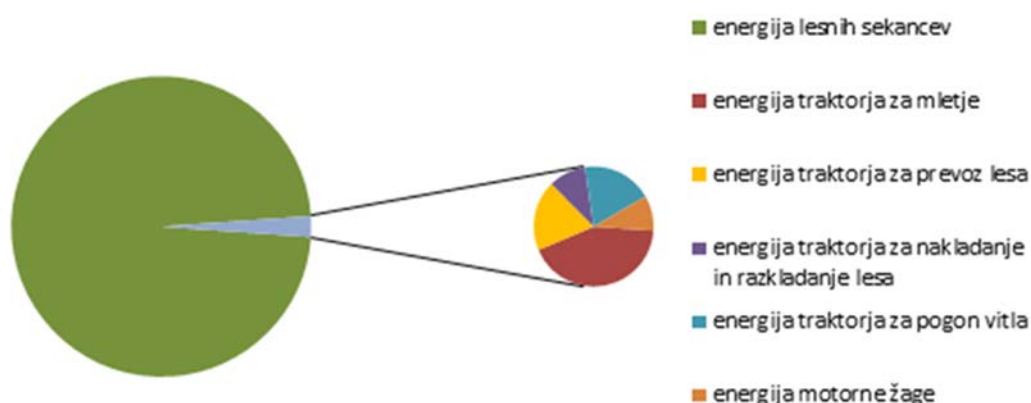
Toploto smo merili z ultrazvočnim števcem CF Echo II proizvajalca Allmess. CF Echo II je merilnik toplotne energije nove generacije ultrazvočnih števcov Itron-Allmess. Elektronska obdelava podatkov omogoča visoko točnost v celotnem delovnem območju in ustreza dinamičnemu območju razreda C. Pretok je lahko merjen od Q_p 0,6 do Q_p 15 m³/h (DN 15 do DN 50) z zanesljivo in stabilno točnostjo. Ker ima veliko različnih dimenzijskih priključkov za posamezen nazivni pretok (Q_p), je CF Echo II zelo prilagodljiv pri uporabi. Za enostavno montažo so oblikovali in izdelali hidravlična ohišja. Pregledan in certificiran je v skladu s pravilnikom o merilnih instrumentih (MID) (slika 11) (Enerkon, 2011).



Slika 11: CF Echo II (Enerkon, 2011)

4 REZULTATI

4.1 PORABA ENERGIJE ZA IZDELAVO SEKANCEV



Slika 12: Porabljena energija za izdelavo sekancev glede na energijo, ki jo pridobimo iz sekancev

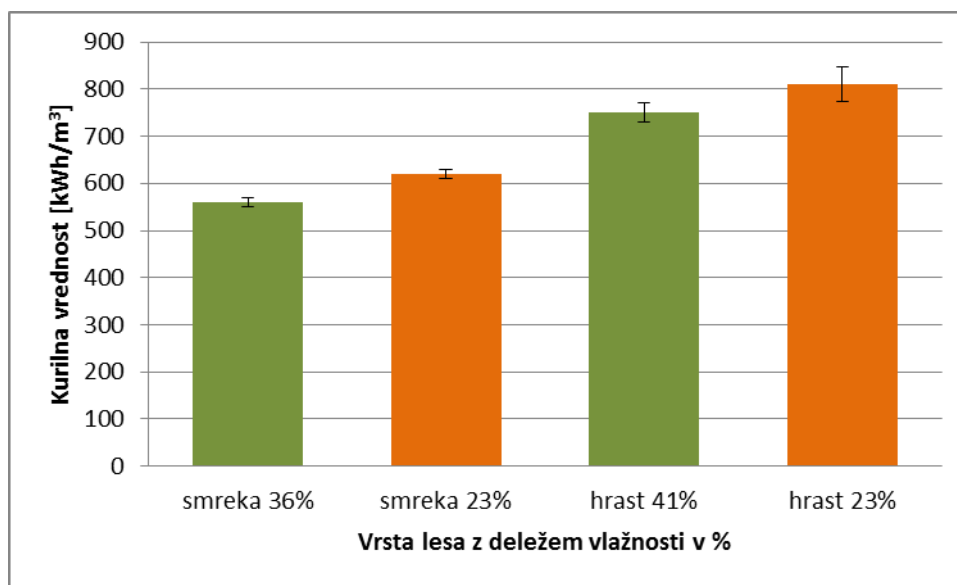
Na sliki 12 je viden delež energije, ki se porabi pri pridobivanju lesa iz gozda do izdelave lesnih sekancev.

Porabo goriva smo spremljali dalj časa v okviru projekta Intelligent Energy Europe Efficient 20, ki ga je Kmetijski inštitut izvajal tudi na kmetiji Potokar. Ker so stroški goriva v kmetijstvu precej visoki, je bil cilj projekta zmanjšati porabo goriva. Gorivo smo merili tako, da smo pred vsakim delom natočili poln rezervoar goriva, po končanem delu dotočili in izmerili, koliko goriva smo porabili za opravljeno delo. S pravilno nastavljenimi, redno servisiranimi, dobro vzdrževanimi in pravilno upravljanimi stroji, je poraba goriva relativno nizka.

Motorna žaga Stihl 290 je porabila 10 L bencina, ki ima energijsko vrednost 87,68 kWh. Traktor Lamborghini 600 DT je za pogon vitla Krpan 5 EH porabil 18 l plinskega olja, kar je 175,95 kWh energije. Za nakladanje lesa v gozdu in razkladanje z gozdarsko prikolico z dvigalom Palm 840 smo porabili 2 uri in med tem porabili 8 l plinskega goriva. Za izdelavo sekancev smo uporabili sekalnik Bider TS30, ki ga je poganjal traktor Steyr 9094. Pogonski traktor je imel vrtilno hitrost na priključni gredi 540 min^{-1} . Vrtilna hitrost motorja je bila 2100 min^{-1} . V tem času smo porabili 40 l plinskega olja. 0,94 % energije lesa je bila potrebna za mletje celega lesa. S to energijo smo naredili sekance, katerih kurilna vrednost

je 41750 kWh. Energija goriva, ki smo ga porabili za spravilo lesa iz gozda in izdelavo sekancev je 2,2 % energije, ki jo pridobimo iz sekancev.

4.2 VPLIV VLAGE NA KURILNOST



Slika 13: Kurilna vrednost lesnih sekancev na m³ glede na delež vlažnosti lesnih sekancev s standardnim odklonom.

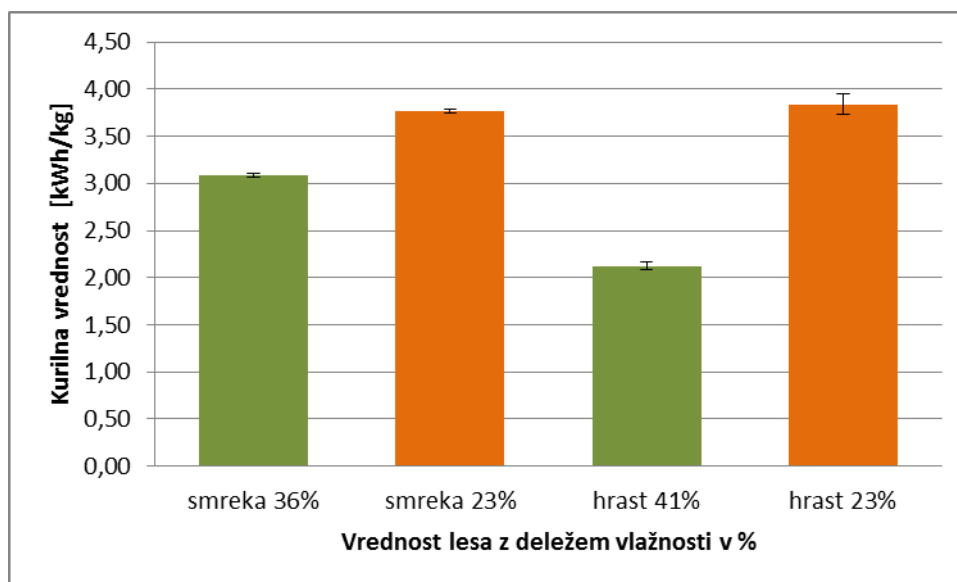
V lesu poznamo prosto (ni vezana na lesno snov) in vezano vodo (v celičnih stenah). Proces sušenja lesa se začne takoj, ko je les posekan. Najprej izhlapeva prosta voda, s tem lesu pada le masa. Ko izhlapi vsa prosta voda (v povprečju ima les takrat 30 % vlažnost) začne izhlapevati vezana voda. Pri tem postane les higroskopski in začne spreminjati volumen in dimenzijo (Lesna biomasa ..., 2015).

Na kurilno vrednost najbolj vpliva vlažnost lesa oziroma vsebnost vode. Med gorenjem, (prva faza) voda izhlapeva, za to je potrebna energija. Za izhlapevanje 1 kg vode se porabi 0,68 kWh energije. Bolj vlažen kot je les, več energije se porabi za izhlapevanje vode, manj je uporabne energije, ki jo uporabimo za ogrevanje.

Vsaki 10 % vode zmanjša kurilno vrednost lesa za 12 % (Kranjc in Kopše, 2005). Če kurimo gozdno suh les, porabimo 1/4 energije, uskladiščene v lesu, za izhlapevanje vode.

Na sliki 13 je prikazana razlika kurilne vrednosti glede na vlažnost lesnih sekancev pri smreki in hrastu. Kurilna vrednost 1 m³ lesnih sekancev smreke z manjšim vlažnim

deležem (razlika je 13 %) je večja za 60 kWh. Kurilna vrednost 1 m³ lesnih sekancev hrasta z manjšim vlažnim deležem (razlika je 18 %) je večja za 45 kWh.

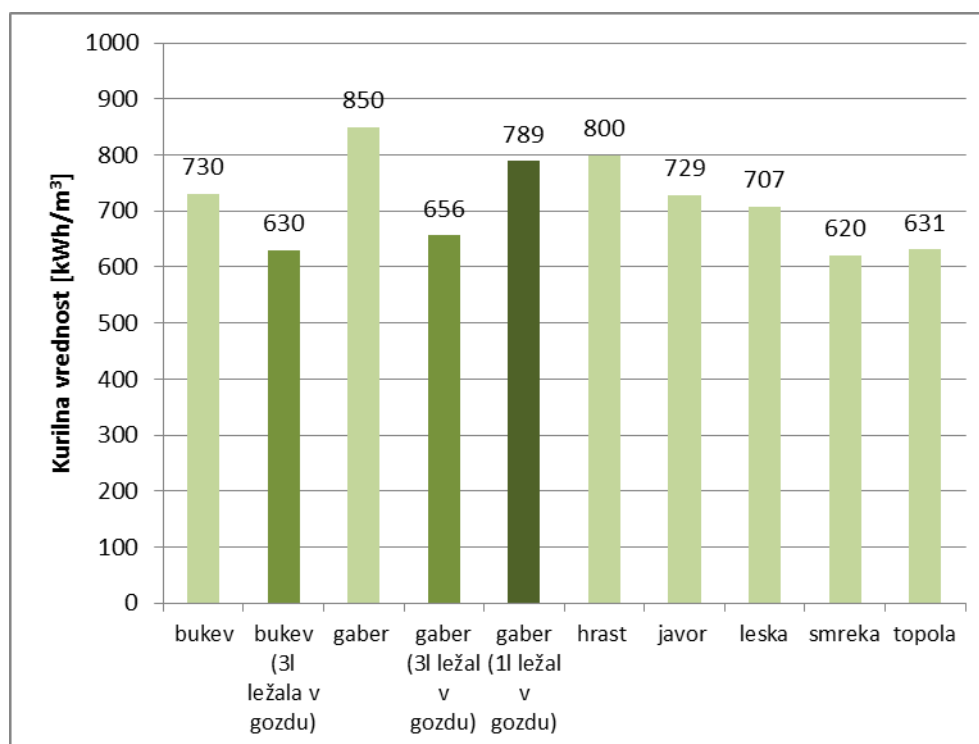


Slika 14: Kurilna vrednost lesnih sekancev na kg glede na vlažnost lesnih sekancev s standardnim odklonom.

Drevesna vrsta ima vpliv na kurilno vrednost lesa. Iglavci vsebujejo smole, ki povečujejo njihovo kurilno vrednost. Delež lignina je pri iglavcih večji kot pri listavcih. Ker je kurilna vrednost lignina višja od celuloze, je posledično kurilna vrednost hrasta manjša od smreke (Fengel in Wegener, 1989).

Na sliki 14 je prikazana razlika kurilne vrednosti glede na maso lesnih sekancev pri smreki in hrastu. Kurilna vrednost 1 kg lesnih sekancev smreke z manjšim vlažnim deležem (razlika je 13 %) je večja za 0,65 kWh. Kurilna vrednost 1 m³ lesnih sekancev hrasta z manjšim vlažnim deležem (razlika je 18 %) je večja za 1,69 kWh.

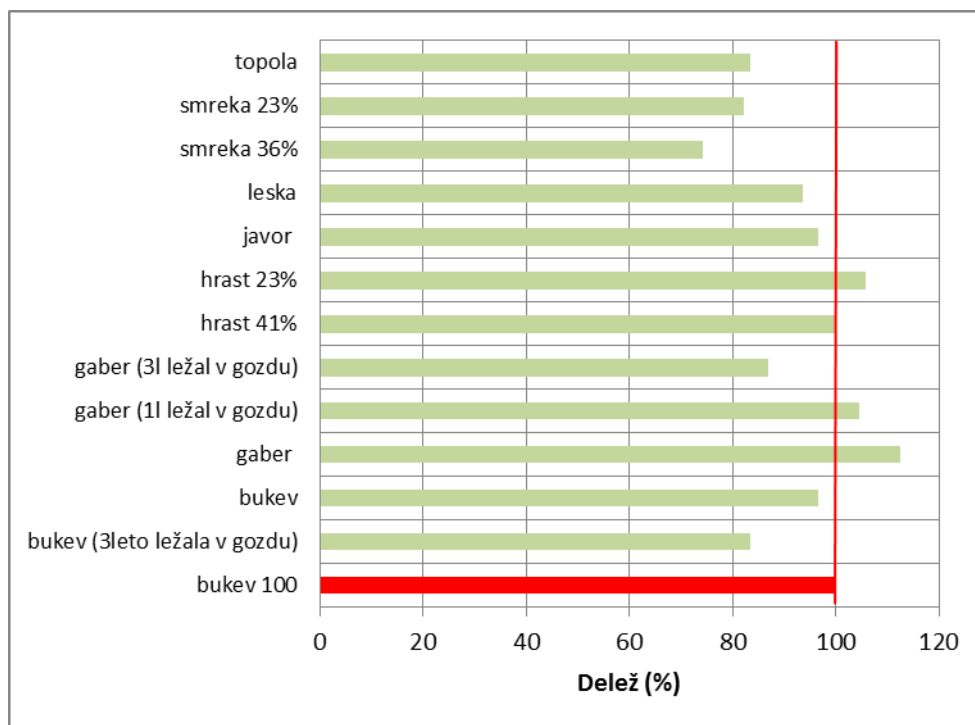
4.3 VPLIV DREVESNE VRSTE NA KURILNOST



Slika 15: Kurilne vrednosti lesnih sekancev različnih drevesnih vrst pri vlažnosti lesa 23%.

Slika 15 prikazuje kurilne vrednosti lesnih sekancev različnih drevesnih vrst pri vlažnosti lesa 23 % glede na volumen. Najslabšo kurilno vrednost ima smreka, in sicer 620 kWh/m^3 pri gostoti nasutja 165 kg/m^3 . Največjo kurilno vredno ima gaber, in sicer 850 kWh/m^3 pri gostoti nasutja 200 kg/m^3 . Razlika med najvišjo in najnižjo kurilno vrednostjo je 230 kWh/m^3 . Kurilni vrednosti lesnih sekancev glede na volumen bukve, ki je tri leta ležala v gozdu in javorja sta primerljivi, prav tako pa kurilne vrednosti lesnih sekancev bukve in topole.

4.4 VPLIV OHRANJENOSTI LESA NA KURILNOST



Slika 16: Kurilna vrednost lesnih vrst glede na volumen v primerjavi s kurilno vrednostjo ohranjene bukke z 9 % vlažnostjo.

Bukev velja kot najboljši les za kurjavo, zato smo ostale drevesne vrste primerjali z sušilnično suho (9 % vlažnostjo) bukvijo.

Na sliki 16 je prikazana relativna kurilna vrednost vseh lesnih vrst, s katerimi smo izvajali poskus. S slike vidimo vpliv ohranjenosti lesa na kurilno vrednost. Bolj ohranjen les ima višjo kurilno vrednost. Gaber z najslabšo ohranjenostjo ima 25,62 % nižjo kurilno vrednost kot popolnoma ohranjen les bukke.

Kurilna vrednost smreke s 23 % vlažnostjo je manjša za 17,95 % kurilne vrednosti sušilnično suhe bukke, topola z enako vlažnostjo pa je 16,52% manjša od kurilne vrednosti sušilnično suhe bukke. Lesni sekanci javorja s 23 % vlažnostjo imajo le 3,5% manjšo kurilno vrednost v primerjavi s sušilnično suho bukvijo.

Leska, ki raste ob robovih travnikov in pašnikov, ima 93,5 % kurilne vrednosti sušilnično suhe bukke.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

Z diplomskim delom smo ugotavljali učinkovitost manj vrednega lesa za ogrevanje kmečke hiše z lesnimi sekanci. V realnih razmerah smo želeli ugotoviti vpliv vlage lesa na proizvodnjo energije, odvisnost kurilnosti od drevesne vrste in dokazati, da je še vedno smiselno in gospodarno spraviti iz gozda trhel les ter iz njega narediti lesne sekance. Kot manj vreden les smo uporabili les leske, topole, vrhače in drobnejši sortiment: smreke, gabra, javorja, hrasta in bukve. Drobne vejice so se izkazale kot moteče, saj so prišle skozi sekalnik predolge in niso tekoče padale skozi presipnik na kotlu.

Za spravilo lesa smo uporabili stroje, ki so bili na voljo na kmetiji. Način dela je energetskega nezahteven. Je delovno intenziven in nevaren. Pri sečnji in spravilu lesa se povprečno smrtno ponesreči 10 ljudi (med letom 1998 in 2014) (Beguš 2015).

Poraba energije za spravilo lesa iz gozda in pripravo lesnih sekancev z mehanizacijo, ki smo jo uporabili, je 2,2 % energije sekancev. To je majhen delež energije sekancev. Da smo dosegli tako nizko porabo energije goriva, smo ustrezno pripravili stroje na delo. Veriga motorne žage mora biti redno brušena, prav tako noži na sekalniku. Pri pogonu hidravlične črpalke gozdarskega dvigala smo uporabili večjo vrtilno hitrost priključne gredi, tako imenovano eco, ki pri nižji vrtilni hitrosti motorjev doseže 540 min^{-1} na priključni gredi. Pri prevozu smo izbirali taka prestavna razmerja, da vrtilna hitrost motorja ni presegla 2000 min^{-1} , s tem je bila poraba goriva bistveno nižja, kot če bi bila vrtilna hitrost maksimalna.

Vlaga pomembno vpliva na kurilno vrednost lesa (Kranjec in sod., 2009). Hrast z vlažnostjo 41 % ima 1,69 kWh/kg manjšo kurilno vrednost kot hrast z vlažnostjo 23 %. Smreka z vlažnostjo 36 % ima za 0,65 kWh/kg manjšo kurilno vrednost kot smreka z 23 %. Vsakih 10 % vode zmanjša kurilno vrednost lesa za 12 % (Kranjc in Kopše, 2005). Kurilna vrednost lesa se zmanjša, ker se mora les v kurilni komori najprej posušiti in potrebuje energijo za sušenje. Ko je les suh, zagori in odda energijo v kotel. Za dober izkoristek lesa je boljši les s čim manjšo vlago. V naših rezultatih je bila razlika v kurilni vrednosti manjša pri smreki, in sicer za 15,6 % kurilne vrednosti pri 10 % večji vlažnosti. Razlika pri hrastu je bila 22,2 % kurilne vrednosti za vsakih 10 % večjo vlažnostjo. Smreka vpije manj vlage iz okolice, ker vsebuje smole in olja, ki ji tudi povečajo kurilno vrednost. Les, ki ga uporabljamo za izdelavo sekancev je potrebno pravočasno pripraviti, da se ustrezno posuši. S tem pridobimo na kvaliteti sekancev in energetske vrednosti lesa. Suhi sekanci so manj podvrženi razpadanju v skladišču. Tako se zmanjšajo izgube v času skladiščenja in iz sekancev pridobimo več toplote.

Drevesna vrsta ima vpliv na kurilno vrednost lesa, ker se razlikujejo med seboj po gostoti lesa in sestavi lesa. Razlika med drevesnimi vrstami je v vsebnosti in delno tudi v vsebnosti smol (Kranjec in sod., 2009). Med najboljšo kurilno vrednostjo glede na volumen, ki jo doseže gaber, in najslabšo, ki jo ima smreka, je 38,4 % razlike. Razlika kurilne vrednosti glede na maso med najboljšim rezultatom, ki jo doseže smreka, in najslabšim javorjem, je 32,2 % kurilne vrednosti. Smreka ima glede na volumen najslabšo kurilno vrednost, glede na maso pa najboljšo. Razlike v kurilni vrednosti glede na maso so manjše kot v primerjavi na volumen zaradi različne gostote drevesnih vrst. Po tem lahko sklepamo, da se strankam oziroma kupcem bolj splača kupovati lesne sekance glede na maso in ne glede na volumen, saj ne glede na drevesno vrsto dobimo približno enako energijo, čeprav zato potrebujemo večje skladišče.

Za primerjavo kurilnih vrednosti smo kot standard vzeli sušilnično suhe bukove sekance, ki so nastali kot odpadki pri lesni proizvodnji. Glede na naše rezultate lahko povzamemo, da ima ohranjen les gabra in hrasta boljše kurilno vrednost od bukve, medtem ko sta leska in javor primerljiva s kurilno vrednostjo bukve. Na kmetijah je potrebno za ohranjanje kmetijskih površin in preprečevanja zaraščanja odstranjevati grmičevje in drobnejše gozdne sortimente. Na območjih, kjer raste leska, jo lahko uporabimo za ogrevanje. Tako ima kmetija za ogrevanje hiše dostop do kvalitetnega, energetskega bogatega lesa za kurjavo.

Ohranjenost lesa bistveno vpliva na kurilno vrednost lesnih sekancev (trhel les ima namreč manjšo gostoto in s tem tudi nižjo kurilno vrednost) (Kranjc in Kopše, 2005). Kot primer trhlečega lesa smo vzeli gaber in bukev ter ju primerjali z zdravim lesom. Razlika med zdravim gabrovim lesom in najbolj trhljim je 26,5 % kurilne vrednosti. Razlika med zdravim bukovim lesom in trhljim je 16,67 % kurilne vrednosti. Iz rezultatov lahko povzamemo, da je še vedno smiselno pospraviti iz gozda slabše ohranjen les in ga uporabiti za izdelavo lesnih sekancev. Paziti moramo na spore gliv, ki so škodljive za zdravje, in da jih ne zanesemo v hišo. Imeti moramo le večje skladišče za skladiščenje sekancev. Ogrevanje kmečke hiše z uporabo manj vrednega lesa je smiselno, saj vrednejše asortimente lesa lahko prodamo ali predelamo v končne izdelke. To je lahko dodaten vir prihodkov na kmečkem gospodarstvu.

Ko za ogrevanje namesto fosilnih goriv uporabimo manj vreden les, lesne ostanke ali že uporabljen les, pripomoremo k manjšem izpustom toplogrednih plinov. Iz lesa, ki popolno zgori v sodobnih kotlih, pridobimo poleg toplote samo osnovne gradnike lesa, ki se s pomočjo fotosinteze vgradijo v novo biomaso. Kot je razvidno iz slike 3, z uporabo lesa kot surovino za izdelavo končnih izdelkov, prihranimo 8,75 MWh primerljive energije iz fosilnih goriv.

Ker so kotli na lesne sekance avtomatizirane, so idealne za ogrevanje kmečke hiše, saj je na kmetijah vse manj časa in delovnih moči za kurjenje. Tako se kmečka družina lahko bolj posveti ostalemu delu na kmetiji. Kmetije, ki so dovolj blizu naselja, lahko prodajajo

toploto okoliškim zgradbam. Za izdelavo lesnih sekancev potrebujemo sekalnik. Nabava sekalnika za mletje lesa samo za eno kmečko hišo ni ekonomsko upravičeno. Smiselno je najeti nekoga, ki ima sekalnik velikih kapacitet in bo sekance za eno kurilno sezono naredil hitro in brez fizičnih naporov. Gozdarski inštitut ima bazo vseh lastnikov sekalnikov, tako si vsak najlažje najde primeren sekalnik v neposredni bližini.

5.2 SKLEPI

- V sodobnih kotlih na lesne sekance je smiselno kuriti tudi maj vreden les.
- Vlaga odločujoče vpliva na kurilno vrednost lesa; za dober izkoristek je potrebno uporabljati čim bolj naravno suh les.
- Les za izdelavo sekancev je treba pravočasno pripraviti, da se posuši, s tem pridobimo na kvaliteti sekancev in imamo boljše gorivo.
- Kurilnost je odvisna tudi od drevesne vrste. Najboljšo kurilno vrednost ima gaber.
- Grmovne drevesne vrste, kot je leska, so kvaliteten vir lesnih goriv.
- Trhljen les je še vedno uporaben za energetske namene.
- Slabše ohranjen les je smiselno pospraviti iz gozda in ga uporabiti za izdelavo lesnih sekancev.
- Sekance je smiselno kupovati glede na maso.
- Z uporabo slabšega lesa za ogrevanje dober les lahko prodamo oziroma ga uporabimo kot surovino za proizvodnjo izdelkov.
- Z uporabo sodobnih kotlov na lesne sekance ostane na kmečkem gospodarstvu več časa, saj kurjenje poteka avtomatsko.
- Poraba energije iz fosilnih goriv se zmanjša.

6 POVZETEK

Z diplomsko nalogo smo analizirali, kakšen in kateri les je vredno kuriti v sodobnih kotlih na lesne sekance. V realnih razmerah smo želeli ugotoviti, kako vlaga lesa vpliva na proizvodnjo energije, kako je kurilnost odvisna od drevesne vrste in da je tudi trhel les še vedno smiselno in gospodarno spraviti iz gozda ter iz njega narediti sekance.

V prvem delu diplomskega dela opredeljujemo biomaso. Znotraj tega namenimo pozornost lesni biomasi, lesnemu gorivu in ogljikovemu oksidu. Glede na dejavnike, ki vplivajo na kurilno vrednost lesa, podrobneje predstavimo vlažnost lesa. Obravnavamo osnove zgorevanja lesne biomase, kot so gorenje, ostanki pri zgorevanju lesa in energijska vrednot goriva, in tehnike zgorevanja.

Drugi del diplomskega dela vključuje predstavitev drevesnih vrst, ki smo jih uporabili za izdelavo sekancev, sekalnik (TS 30 Bider Bojan s.p.), kotel (Froling Turbomatic) in merilnik toplote (CF Echo II). Poudarimo pomembnost določitve vsebnosti vode v lesu in ohranjenost lesa. Ugotavljali smo, kakšen in kateri les je vredno kuriti v sodobnih kotlih na lesne sekance, kako vlaga lesa vpliva na proizvodnjo energije, kako je kurilnost odvisna od drevesne vrste in ali se tudi iz trhel lesa izplača narediti sekance za ogrevanje kmečke hiše.

Rezultati kažejo, da imata drevesna vrsta in vlažnost lesa vpliv na kurilno vrednost lesnih sekancev. Vlaga odločujoče vpliva na kurilno vrednost lesnih sekancev, zato je za dober izkoristek potrebno uporabljati čim bolj suh les. Lesni sekanci hrasta in smreke z nižjo vlažnostjo imajo boljše kurilno vrednost kot lesni sekanci hrasta in smreke z višjo vlažnostjo, vendar imajo lesni sekanci smreke manjšo kurilno vrednost kot lesni sekanci hrasta. Razlika kurilne vrednosti pri različni vlažnosti pa je manjša pri smreki kot pri hrastu. Ugotovili smo, da ima najboljšo kurilno vrednost glede na volumen med vsemi drevesnimi vrstami, ki smo jih vključili v analizo, gaber, najslabšo pa smreka. Iz rezultatov smo tudi ugotovili, da je kurilna vrednost sekancev leske primerljiva s kurilno vrednostjo sekancev bukve. Pri ohranjanju kmetijskih površin se srečamo ravno z lesko in kmetije v svoji bližini energetsko bogat vir lesa za ogrevanje kmečke hiše ter drugih gospodarskih objektov. Izkazalo se je, da je med zdravim in trhlím gabrovim lesom višja razlika kot med zdravim in trhlím bukovim lesom, vendar je vsak trhel les še vedno uporaben za energetske namene. Ugotovili smo, da je kurilna vrednost glede na maso med drevesnimi vrstami primerljiva, kar pomeni, da je bolj smiselno za stranke oziroma kupce kupovati lesne sekance glede na maso in ne glede na volumen.

Poraba energije pri pripravi in izdelavi sekancev je v našem primeru znašala 2,2 % energije sekancev. To smo dosegli s pomočjo pravilno nastavljenih in upravljanih strojev.

VIRI

- Beguš J. 2015. Analiza nezgod v gozdu med nepoklicnimi delavci, s poudarkom na analizi nezgod pri sanaciji žledoloma. Ujma 29: 195-206
- Bider, Sekalniki lesa
http://www.bider.si/prospekti/Sekalniki_lesa.pdf (3. 9. 2014)
- Biomasa: Prednosti pred uporabo fosilnih goriv. 2016
<http://www.enerles.si/sl/biomasa> (15. 5. 2016)
- Biomass heating: A practical guide for potential use. 2009.London. Carbon trust: 94 str.
[http://www.forestry.gov.uk/pdf/eng-yh-carbontrust-biomass-09.pdf/\\$FILE/eng-yh-carbontrust-biomass-09.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/eng-yh-carbontrust-biomass-09.pdf/$FILE/eng-yh-carbontrust-biomass-09.pdf) (26. 6. 2016)
- Börjesson P. Gustavsson L. 2000. Greenhouses gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. Energy Policy, 28, 9: 575–588
- Butala V., Turk J. 1998. Lesna biomasa – neizkoriščen domači vir energije. Ljubljana, Femopet, Slovenija: 24.str.
- Čebul T., Krajnc N. 2011. Proizvodnja lesnih sekancev v Sloveniji. EGES, 5: 64–66
- Dolenšek M., Golob A., Medved M., Pogačnik N., Šumenjak M. 1999. Kmetovalčev priročnik: Energija iz lesne biomase. Slovenj Gradec, Kmetijska založba Slovenj Gradec: 28 str.
- Elementary energy infobook. 2016. Manassas. The NEED Project. 44 str
<http://issuu.com/theneedproject/docs/elementaryenergyinfobook> (3. 5. 2016)
- Enerkon
http://www.enerkon.si/skupina_produkta/echo-ii/ (14. 9. 2011)
- Fengel D., Wegener G. 1989. Wood, chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, de Gruyter,: 613 str.
- Fröling. Planing documents, Turbomac.
http://www.bghn.co.uk/docs/files/Woodchip%20and%20pellet/TMc_technical_planning_09_02_11.pdf (20. 6. 2016)
- Golob S., Hrustel-Majcen M., Cunder T. 1994. Raba zemljišč v zaraščanju v Sloveniji. V: Kako izboljšati posestno strukturo v Sloveniji. Zbornik IX. tradicionalnega posveta kmetijsko svetovalne službe, Bled, 21.–22. nov. 1994. Ljubljana, Republiška uprava za pospeševanje kmetijstva: 89–98.
- Krajnc N., Kovač Š. 2003. Lesna biomasa okolju prijazen obnovljiv vir energije, Slovenska Bistrica, Občina Slovenska Bistrica: 23 str.

- Kranjc N. 2007. Lastniki gozdov in prodaja toplote iz lesa. Ljubljana, Silva Slovenica: 15 str.
- Krajnc N., Piškur M., Klun J., Premrl T., Piškur B., Robek R., Mihelič M., Sinjur I. 2009. Lesna goriva: drva in lesni sekanci: proizvodnja, standardi kakovosti in trgovanje. Ljubljana, Silva Slovenica: 81 str.
- Kranjc N., Kopše I. 2005. Les - domač, obnovljiv in okolju prijazen vir energije. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije, Agencija za učinkovite rabo in obnovljive vire energije, Gozdarski inštitut Slovenije: 23 str.
- Lipušček I., Tišler V. 2003. Les - skladišče ogljika. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 71: 71–89
- Lesna biomasa, Zavod za gozdove Slovenije, 2015.
http://www.zgs.si/slo/delovna_podrocja/lesna_biomasa/index.html (16. 7. 2016)
- Malovrh M., Praznik M., Šijanec-Zavrl M. 1998. Sistemi regulacije ter merjenje in obračun toplote v večstanovanjskih zgradbah. Ljubljana, Gradbeni inštitut ZRMK: 30 str.
- Nemec J. 2011. Merjenje notranje energije hranilnika toplote s hibridnim mikrokontrolerjem. Diplomsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektroniko, računalništvo in informatiko: 64 str.
- Ndiema C. K. W. Mpendazoe F. M. in Williams A. 1998. Emission of pollutants from a biomass stove. Energy conversion and management, 39, 13: 1357–1367
- Primc B. 2011. Star vir energije v novi preobleki. Delo in dom, 19, 44: 32–35
- Pogčnik N., Kranjc R. 2000. Potenciali lesne biomase uporabne v energetske namene. Gozdarski vestnik, 58, 7–8: 330–332
- Puhar J., Stropnik J. 2002. Krautov strojniški priročnik. Ljubljana, Littera picta: 818 str.
- Ravnik M. 2008. Zakonski okviri pri uporabi lesa kot vira energije. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 32 str.
- Urh A., Kocjan A. 2011. Lambda sonda. Seminarska naloga pri predmetu Merilni pretvorniki. Ljubljana, Laboratorij za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko (LRTME): 6 str.
http://lrtme.fe.unilj.si/lrtme/slo/UNIVSS/meri_pret/seminar%202011/Ana_Urh&Andrej_Kocjan_seminar.pdf (20. 5. 2016)
- Wittkopf S. 2005. Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forestbetriebe in Bayern. [Supply chains for thermal utilization by forest companies in Bavaria]. Dissertation an der technischen universität München, Fakultät wissenschaftszentrum weihenstephan für ernährung, landnutzung und umwelt: , 163 str.

Wood Energy from Farm Forest: A basic guide. 2009. Teagasc forestry developement unit.
3. ed.
http://www.teagasc.ie/forestry/docs/advice/Teagasc_wood_energy_guide_edition3.pdf
(3.9.2014)

ZAHVALA

Hvala, prof. dr. Rajk Bernik, za nasvete in pomoč pri izdelavi diplomskega dela.

Hvala, prof. dr. Miha Humar, za prijaznost, strokovne nasvete in mnenja, s katerimi sem izboljšal svoje delo, in hvala, prof. dr. Gregor Osterc, predsednik komisije za oceno in zagovor, za pregled dela.

Hvala, mami in ati, brat Gašper, sestre Mija, Ana in Tonka ter dedi, za podporo, razumevanje, pomoč in potrpežljivost preko celotnega študija in pri dolgoletnem lesnem projektu. Babi in Nejc, to delo posvečam v spomin na vaju.

Hvala, sošolci, prijatelji, za razumevanje, spodbude in podporo preko študija.

Hvala vsem, ki ste me spodbujali, mi stali ob strani in kakor koli pomagali pri nastanku tega dela.