

**VISOKA ŠOLA ZA VARSTVO OKOLJA**

**DIPLOMSKO DELO**

**OPTIMIZACIJA FIZIKALNIH POSTOPKOV PREDPRIPRAVE  
LESNE BIOMASE**

**SIMONA ŠEKORANJA**

**VELENJE, 2015**



**VISOKA ŠOLA ZA VARSTVO OKOLJA**

DIPLOMSKO DELO

**OPTIMIZACIJA FIZIKALNIH POSTOPKOV PREDPRIPRAVE  
LESNE BIOMASE**

SIMONA ŠEKORANJA

Varstvo okolja in ekotehnologije (VS)

Mentorica: viš. pred. dr. Nataša Kovačič

VELENJE, 2015



Priloga 2: Sklep o diplomskem delu



Številka: 726-2/2013-2

Datum in kraj: 6. 5. 2013, Velenje

Na podlagi Diplomskega reda

izdajam

**SKLEP O DIPLOMSKEM DELU**

Študent-ka VŠVO

**Simona Šekoranja**

lahko izdela diplomsko delo pri predmetu: Človek in okolje

Mentor-ica: pred. dr. Nataša Kovačič

Somentor-ica: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

Naslov diplomskega dela v slovenskem jeziku: Optimizacija fizikalnih postopkov predpriprave lesne biomase

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku: Optimization of physical preparation procedures of woody biomass

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z Navodili za izdelavo diplomskega dela.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat v roku 3 delovnih dni.



Dekan  
doc. dr. Boštjan Pokorny



## Izjava o avtorstvu

Podpisani/a **Simona Šekoranja**, z vpisno številko **34100049**,

študent/ka dodiplomskega / podiplomskega (obkrožite) študijskega programa Varstvo okolja in ekotehnologije,

sem avtor/ica diplomskega dela z naslovom

**OPTIMIZACIJA FIZIKALNIH POSTOPKOV PREDPRIPRAVE LESNE BIOMASE**

ki sem ga izdelal/a pod mentorstvom **Nataše Kovačič** in

somentorstvom \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo moje avtorsko delo, torej rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela;
- da oddano delo ni bilo predloženo za pridobitev drugih strokovnih nazivov v Sloveniji ali tujini;
- da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oz. citirana v skladu z navodili VŠVO;
- da so vsa dela in mnenja drugih avtorjev navedena v seznamu virov, ki je sestavni element predloženega dela in je zapisan v skladu z navodili VŠVO;
- se zavedam, da je plagiatorstvo kaznivo dejanje;
- se zavedam posledic, ki jih dokazano plagiatorstvo lahko predstavlja za predloženo delo in moj status na VŠVO;
- je diplomsko delo jezikovno korektno in da je delo lektoriral/a **Alenka Cizel**;
- da dovoljujem objavo diplomskega dela v elektronski obliki na spletni strani VŠVO;
- da sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela identični.

V Velenju, dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

podpis avtorja/ice





## ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici viš. pred. dr. Nataši Kovačič, ki mi je bila s svojim znanjem in napotki pri izdelavi diplomskega dela v veliko pomoč.

Prav tako gre zahvala tudi Špeli Kisovec, ki me je v času študija spodbujala in mi svetovala ter pustila lepe spomine na študijske dni.

Zahvaljujem se tudi vsem drugim, ki so me vzpodbujali pri izdelavi diplomskega dela in verjeli vame, pa jih nisem posebej omenila.

Simona Šekoranja



## **IZVLEČEK:**

Diplomsko delo se navezuje na optimizacijo fizikalnih postopkov predpriprave lesne biomase za namene raziskovanja nadaljnjih biorafinerijskih postopkov. Ugotavljali smo, ali lahko z optimizacijo fizikalnih postopkov pridobimo delce lesne biomase velikosti  $< 1,0$  mm in ali je zaradi majhnosti sekancev odstranjevanje vlage iz lesne biomase hitrejše. Uporabljali smo lesno biomaso vrbe in topola kot hitrorastoči drevesni vrsti. Lesni biomasi smo pred začetkom optimizacije odstranili listje in že odmrle dele. Pri raziskovanju smo uporabili mlin za mletje lesne biomase ter dva različna sušilnika – liofilizator in zračni sušilnik. S tem smo želeli ugotoviti, kateri način sušenja je najbolj optimalen za nadaljnjo pripravo lesne biomase in s katerim načinom sušenja se iz mase pobere največ vlage. Glede na različne vrste uporabljenih strojev smo nato želeli ugotoviti, kateri način predpriprave se najbolj cenovno izplača.

*Ključne besede: biorafinerija, predpriprava lesne biomase, hitrorastoče drevesne vrste*

## **ABSTRACT:**

The thesis is related to the optimization of the technological processes of pretreatment of the wooden biomass for the purpose of exploring further biorefinery procedures. We want to determine whether the optimization of technological processes obtain particles of wood biomass size  $< 1.0$  mm, or due to the small size of chip removal of moisture from wood biomass is faster. We used biomass of willow and poplar as a fast growing tree species. We removed leaves and other unnecessary parts from biomass before the start of the optimization. During the research we used the mill for grinding. We were using lyophilisator and air dryer for drying raw biomass. Thus, we wanted to determine which method of drying is the most optimal for the further elaboration of biomass and the way in which the drying of mass picks up more moisture. According to the different kinds of used machines we wanted to determine which method is the cheapest.

*Key words: biorefinery, pretreatment of wood biomass, fast-growing tree species*



## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1	Namen diplomskega dela .....	1
1.2	Cilji raziskave.....	2
1.3	Zastavljene hipoteze .....	2
<b>2</b>	<b>BIOMASA</b> .....	<b>3</b>
2.1	Lesna biomasa .....	3
2.2	Zgradba lesa.....	4
2.2.1	Makroskopska zgradba lesa .....	4
2.2.2	Mikroskopska zgradba lesa .....	4
2.2.3	Kemijska zgradba lesa.....	4
2.2.3.1	Celuloza .....	5
2.2.3.2	Hemiceluloze .....	5
2.2.3.3	Lignin .....	6
2.2.3.4	Ostale snovi .....	7
2.3	Hitrorastoče drevesne vrste .....	7
2.3.1	Vrbe.....	7
2.3.2	Topoli .....	8
<b>3</b>	<b>BIORAFINERIJA</b> .....	<b>9</b>
3.1	Kratek pregled zgodovine biorafinerij.....	9
3.2	Vrste biorafinerij.....	10
3.2.1	Biorafinerija faze I .....	10
3.2.2	Biorafinerija faze II .....	10
3.2.3	Biorafinerija faze III .....	11
<b>4</b>	<b>FIZIKALNI POSTOPKI OBDELAVE LESNE BIOMASE</b> .....	<b>12</b>
4.1	Tehnike sušenja lesa .....	12
4.1.1	Liofilizacija .....	13
4.1.2	Konvencionalno sušenje lesa .....	14
4.1.3	Sušenje lesa na prostem .....	14
4.2	Mehanska obdelava lesa .....	15
<b>5</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL</b> .....	<b>15</b>
5.1	Metode raziskovanja.....	15
5.2	Vrsta vzorcev.....	16
5.3	Priprava vzorcev.....	16
5.3.1	Postopek priprave zamrznjenih vzorcev.....	18
5.3.2	Postopek priprave zračno sušenih vzorcev.....	18

5.3.3	Postopek priprave vzorcev iz hladilnika .....	18
5.4	Raziskovalna oprema .....	19
a)	Rezalni mlin SM 300 Retsch .....	19
b)	Liofilizator DW 3 .....	20
c)	Zračni sušilnik .....	22
d)	Ostala oprema.....	22
<b>6</b>	<b>REZULTATI.....</b>	<b>24</b>
6.1	Zračno sušeni vzorci.....	24
6.1.1	Vzorci pred sušenjem .....	24
6.1.2	Vzorci po sušenju .....	25
6.1.3	Delež vode.....	25
6.1.4	Vzorci po drugem mletju .....	25
6.2	Zamrznjeni vzorci.....	26
6.2.1	Vzorci pred sušenjem .....	26
6.2.2	Vzorci po sušenju .....	27
6.2.3	Delež vode.....	27
6.2.4	Vzorci po drugem mletju .....	27
6.3	Vzorci iz hladilnika .....	28
6.3.1	Vzorci pred sušenjem .....	29
6.3.2	Vzorci po sušenju .....	29
6.3.3	Delež vode.....	30
6.3.4	Vzorci po drugem mletju .....	30
<b>7</b>	<b>RAZPRAVA S SKLEPI.....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>VIRI IN LITERATURA .....</b>	<b>33</b>
	<b>PRILOGE .....</b>	<b>36</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Prerez debla tise (Foto: Medmrežje 1, 2014).....	4
Slika 2: Celulozna vlakna (Foto: Medmrežje 2, 2014) .....	5
Slika 3: Struktura celuloze (Foto: Van, 2010) .....	5
Slika 4: Struktura ksilana (komponenta hemiceluloz) (Foto: Carbohydrates, 2014).....	6
Slika 5: Lignin (Foto: Medmrežje 3, 2014).....	6
Slika 6: Kemijska struktura monomerov v ligninu: kumaril alkohol, koniferil alkohol in siringil alkohol (Foto: LignoWorks, 2014) .....	6
Slika 7: Nasad SRC vrste <i>Salix tora</i> (Foto: SalixEnergi, 2014).....	8
Slika 8: <i>Populus AF 2</i> (Foto: Energie pflantzen, 2014).....	9
Slika 9: Poenostavljena shema diagrama koncepta biorafinerije dvojne platforme (Foto: Clark in Deswarte, 2008, str. 13).....	12
Slika 10: Del liofilizatorja (Foto: Šekoranja, 2013) .....	14
Slika 11: Sušenje na prostem (Foto: Šekoranja, 2013) .....	15
Slika 12: Lesna biomasa – potrebna čiščenja (Foto: Šekoranja, 2013). .....	16
Slika 13: Vrba po prvem mletju (Foto: Šekoranja, 2013 .....	17
Slika 14: Mlin SM 300 Retsch (Foto: Šekoranja, 2013) .....	19
Slika 15: Liofilizator (Foto: Šekoranja, 2013).....	21
Slika 16: Vzorci v liofilizatorju (Foto: Šekoranja, 2013).....	21
Slika 17: Vzorci v sušilniku (Foto: Šekoranja, 2013).....	22
Slika 18: Vzorci lesne biomase v vedrih (Foto: Šekoranja, 2013).....	23
Slika 19: Tehtanje vzorca (Foto: Šekoranja, 2013).....	23
Slika 20: Mlin po mletju vzorca vrbe 1 (Foto: Šekoranja, 2013).....	28

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Označbe vzorcev po drevesnih vrstah.....	18
Tabela 2: Mase zračno sušenih vzorcev pred sušenjem. ....	24
Tabela 3: Mase zračno sušenih vzorcev po sušenju. ....	25
Tabela 4: Učinkovito odstranjena voda iz zračno sušenih vzorcev, izražena v %. ....	25
Tabela 5: Mase zračno sušenih vzorcev po drugem mletju. ....	26
Tabela 6: Mase zmrznjenih vzorcev pred sušenjem. ....	26
Tabela 7: Mase zmrznjenih vzorcev po sušenju. ....	27
Tabela 8: Učinkovito odstranjena voda iz zmrznjenih vzorcev, izražena v %. ....	27
Tabela 9: Mase zmrznjenih vzorcev po drugem mletju. ....	28
Tabela 10: Mase vzorcev iz hladilnika pred sušenjem. ....	29
Tabela 11: Mase vzorcev iz hladilnika po sušenju. ....	29
Tabela 12: Učinkovito odstranjena voda iz vzorcev iz hladilnika, izražena v %. ....	30
Tabela 13: Mase vzorcev iz hladilnika po drugem mletju. ....	30



## KAZALO PRILOG

Priloga 1: Spremljevalni list vzorca.....	36
---	----



## 1 UVOD

Pojem biomasa oz. biogorivo označuje vse bioenergijske vire, tudi iz tehnološko-pretvorbenih procesov in končnih produktov. Med biomaso uvrščamo bioodpadke (mednje sodijo gozdni in kmetijski odpadki (trdni in tekoči)), energetske rastline, ki jih pridelujemo izključno v energetske namene, pa tudi komunalni odpadki. K lesni biomasu uvrščamo gozdne ostanke, ostanke pri industrijski predelavi lesa in kemično neobdelan les (Butala, 1998, str. 1). Biomasa sodi med obnovljive vire energije.

Les je edina naravno obnovljiva surovina, ki jo imamo v Sloveniji v relativnem izobilju (Humar, 2014). V Sloveniji je les narodno bogastvo, saj je kar 56 % ozemlja poraščena z gozdovi. V Sloveniji je 80 občin, ki imajo več kot 50 % gozdnatost. Kar 21 občin ima več kot 70 % gozda (Lesna biomasa, 2014). Ti podatki nas uvrščajo na sam vrh evropskih držav po gozdnatosti. V Evropi imata večji površinski delež gozdov le Finska in Švedska. Navkljub veliki gozdnatosti le-te ne znamo pravilno izkoriščati. Letni prirastek je okoli 8 milijonov kubičnih metrov lesa, od tega uporabimo samo dobro polovico. Veliko količino našega lesa prodamo za majhne zneske drugim državam (Kralj, 2011).

Zaradi večjega deleža lesne biomase ima Slovenija potencial za razvoj naprednih in sodobnih tehnologij. Obstaja veliko metod za pretvorbo biomase v različne oblike energije. Ena izmed teh je biorafinerija, ki je v številnih državah že dolgo preverjen proces pridobivanja trajnostne energije, razvitejša je predvsem v skandinavskih državah. Biorafinerija je proces, ki temelji na intenzivni pretvorbi različnih biomas v namene proizvodnje energije, goriv in kemikalij z dodano vrednostjo (Biorefineries, 2014). Biorafinerije se razlikujejo v osnovni surovini, iz katere kasneje pridobimo različne zelene produkte.

Glede na to, da je Slovenija pretežno gozdnata dežela, bi bilo možno pridobivanje kemikalij z dodano vrednostjo, biogoriv in energije iz biomase tudi pri nas. Tako bi lahko smotrnejše izkoristili veliko zapuščenih in zaraščajočih se površin in preprečili propadanje lesa. Trenutno se v Sloveniji največ lesne biomase porabi za ogrevanje gradbenih objektov in gospodinjstev.

### 1.1 Namen diplomskega dela

V diplomski nalogi smo se osredotočili na predpripravo lesne biomase za namene nadaljnjih biorafinerijskih postopkov, med katerimi je izbrana hitra piroliza. Les je pred hitro pirolizo potrebno fizikalno obdelati (sekanje, mletje, sušenje, drobljenje), saj le primerna priprava vhodne lesne biomase vpliva na učinkovitost ekstrakcije kemikalij iz lesa. V diplomskem delu smo predstavili lastnosti in uporabo lesne biomase, hitrorastoče drevesne vrste, vrste obdelave biomase. Predstavili smo tudi koncept biorafinerije, katere osnovna surovina je lesna biomasa. Pri tej vrsti biorafinerije je namreč optimizacija fizikalnih postopkov predpriprave lesne biomase ključnega pomena za nadaljnjo obdelavo lesne biomase.

## 1.2 Cilji raziskave

Cilji diplomskega dela so:

1. opredeliti hitrorastoče drevesne vrste;
2. definirati sestavo lesne biomase;
3. izvesti optimizacijo fizikalne predpriprave lesne biomase (sekanje, mletje, sušenje in drobljenje lesne biomase);
4. priprava lesnih sekancev, s katerimi bomo pridobili boljši kemijsko-energetski izkoristek.

## 1.3 Zastavljene hipoteze

Pri izdelavi diplomske naloge smo si zastavili naslednje hipoteze:

1. Z optimizacijo fizikalnih (mehanskih) postopkov bom pridobila delce lesne biomase z velikostjo  $< 1,0$  mm.
2. Zaradi majhnosti delcev ( $< 1,0$  mm) je odstranjevanje vlage iz lesne biomase hitrejše.
3. Velikost delcev značilno vpliva na izkoristek ekstrakcije vodotopnih komponent lesne biomase.

## 2 BIOMASA

Biomasa, ki jo lahko potencialno uporabimo v industrijske in energetske namene, predstavlja vso organsko snov torej biomaso sestavljajo celotne mase rastlin, živali in gliv. Tekom človeške zgodovine se je uporabljala predvsem za zadovoljevanje potrebe po energiji in toploti, dandanes se njena uporaba že navezuje na proizvodnjo goriv, energije in ostalih potrebnih snovi za življenje. Biomasa je naravni produkt shranjevanja sončne energije v obliki kemične energije. Rastline uporabljajo klorofil v svojih listih kot katalizator in velike količine sončne energije za pretvorbo atmosferskega ogljikovega dioksida in vode v kompleksne molekule glukoze in fruktoze. Rastline tvorijo iz glukoze in fruktoze bolj kompleksne organske spojine, kot so saharoza, škrob in druge kompleksne organske molekule z visoko vsebnostjo kemične energije. Biomasa se šteje za obnovljivi vir energije. Rastline in poljščine rastejo v primerjavi s človeškim življenjem zelo hitro. Tudi fosilna goriva (premog in nafta) so produkti iz rastlin in živali. Vendar pa je čas, ki je potreben za pripravo ali regeneracijo fosilnih goriv, več milijonov let. Zaradi tega fosilna goriva prištevamo med neobnovljivi vir energije (Michaelides, 2012).

Z obnovljivostjo poskrbimo za trajnostno in dolgoročno rabo. Ima tako pozitivne (zmanjšamo emisije toplogrednih plinov, zmanjšamo emisije NO<sub>x</sub> in SO<sub>x</sub>) kot negativne vplive na okolje (npr. pri izgorevanju je možna tvorba policikličnih aromatskih ogljikovodikov) (Demirbas, 2012, str. 80).

### 2.1 Lesna biomasa

K lesni biomasi uvrščamo gozdne ostanke, ostanke pri industrijski predelavi lesa in kemično neobdelan les. Med gozdne ostanke sodijo vejevje, krošnje, debla majhnih premerov ter manj kakovosten les, ki ni primeren za nadaljnjo industrijsko predelavo. Pri industrijski obdelavi lesa nastajajo ostanki primarne in sekundarne predelave (žaganje, krajniki, lubje, prah ...). Med preostali kemično neobdelan les uvrščamo produkte kmetijske dejavnosti v sadovnjakih in vinogradih ter že uporabljen les in njegove izdelke. Lesno biomaso lahko predelujemo, obdelujemo in uporabljamo na različne načine (Zavod za gozdove Slovenije, 2014).

Les lahko kot gorivo oblikujemo v polena (razžagani in razcepljeni kosi lesa), cepanice (okrogli les slabše kakovosti, dolžine do 1 m), okroglice (1 m dolgi kosi okroglega lesa, drobnejša oblika), sekance (kosi sesekanega lesa, veliki do 10 cm), pelete (stiskanci, narejeni iz čistega lesa), brikete (večji stiskanci, narejeni s stiskanjem lubja, suhega lesnega prahu, žaganja, oblancev ter drugih neonesnaženih lesnih ostankov) in lesne ostanke (neonesnaženi ostanki primarne in sekundarne predelave lesa) (Zavod za gozdove Slovenije, 2014).

## 2.2 Zgradba lesa

Gostota lesa je odvisna od drevesne vrste (listavci imajo večjo gostoto kot iglavci), časa sečnje (gostota narašča z vsebnostjo vode), dela drevesa in starosti lesa. Gostota lesa vpliva na sušenje, kurilno vrednost in proces zgorevanja (les z večjo gostoto zgoreva počasneje). Voda v lesu je nevezana (ni vezana na lesno snov) in vezana (v celičnih stenah). Za identificiranje lesa se uporabljajo mikroskopske in makroskopske karakteristike (Zavod za gozdove Slovenije, 2014).

### 2.2.1 Makroskopska zgradba lesa

Makroskopska zgradba lesa je tista, ki jo lahko vidimo s prostim očesom. Zaradi celic, ki sestavljajo les, lahko s prostim očesom vidimo različne linije. Linije lesa se razlikujejo glede na prerez debla. Prečni prerez dobimo, če prerežemo deblo pravokotno na drevesno os. Radialni prerez nastane, ko prerežemo deblo vzdolžno po sredini. Tangencialni prerez dobimo, če deblo prerežemo vzdolžno, vendar ne po sredini (Leban, 2014).



Slika 1: Prerez debla tise (Foto: Medmrežje 1, 2014)

### 2.2.2 Mikroskopska zgradba lesa

Mikroskopska zgradba lesa je tista, ki jo vidimo pod mikroskopom. Na prerezu dobro vidimo, da je les zgrajen iz lesnih vlaken, ki jih sestavljajo celice, osnovni deli lesa. Živa celica sestoji iz membrane ali celične stene ter vsebine ali protoplazme. Ko celica odmre, ostanejo samo celične stene in praznine, imenovane lumen, ki so napolnjene z vodo ali zrakom (Leban, 2014).

### 2.2.3 Kemijska zgradba lesa

Kemijsko se sloji celične stene razlikujejo po vsebnosti lignina, hemiceluloz in celuloze. Deleži so naslednji (Zavod za gozdove Slovenije, 2014):

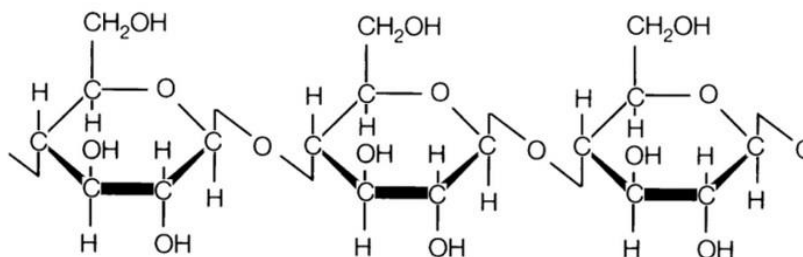
- celuloza (40–50 %),
- hemiceluloze (24–33 %),
- lignin (20–35 %),
- spremljajoče snovi (škrob, sladkor, smola, čreslovina, barvila, strupi, 3–4 %).

### 2.2.3.1 Celuloza

Celuloza je glavna sestavina lesa in glavna strukturna komponenta vseh rastlinskih celičnih sten. Sestavljena je iz molekul glukoze, ki so medsebojno povezane z glikozidnimi vezmi. Les vsebuje približno 45 % celuloze. Celuloza je netopna v vodi in večini organskih topil. V močnih kislinah se raztopi. Celuloza je izhodna snov za pridobivanje papirja, pomembna je tudi v tekstilni industriji, kjer se uporablja v obliki bombaža, lanu, iz nje pa pridobivajo tudi umetno svilo (Fengel in Wegener, 1989). Celulozo je prvič izoliral francoski kemik Anselme Payen leta 1834. Med študijem različnih vrst lesa je Payen uspel pridobiti snov, za katero je vedel, da ni bil škrob (glukoza ali sladkor v svoji shranjeni obliki). Snov je kljub temu še vedno lahko razdelil na osnovne enote glukoze. Odkrito snov je poimenoval "celuloza", ker jo je pridobil iz celične stene rastlin (Science Clarified, 2014).



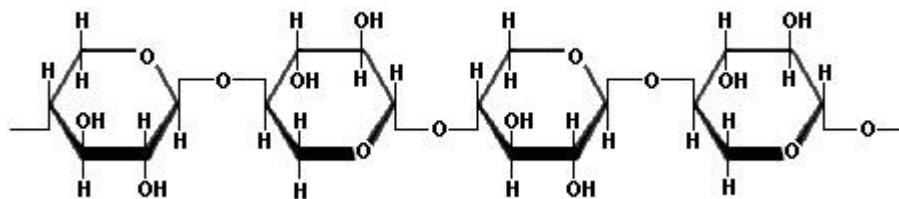
Slika 2: Celulozna vlakna (Foto: Medmrežje 2, 2014)



Slika 3: Struktura celuloze (Foto: Van, 2010)

### 2.2.3.2 Hemiceluloze

Hemiceluloze so tesno povezane s celulozo v celični steni. Kot celuloza tudi hemiceluloze spadajo med ogljikove hidrate. Hemiceluloze predstavljajo 25–30 % lesne mase. Molekularne vezi so krajše kot pri celulozi, imajo stranske skupine, ki so razvejane. Listavci vsebujejo več hemiceluloze kot iglavci, sestava sladkorjev se razlikuje glede na vrsto drevesa. Hemiceluloze se od celuloze razlikujejo po tem, da imajo v stranskih verigah sladkorje, sladkorne kisline in acetilne estre. Določeni deli hemiceluloz so vodotopni in zato topljivi v vodi. Kemijska struktura hemiceluloz je sestavljena iz dolgih verig entoz, heksoz in uronskih kislin (Fengel in Wegener, 1989).



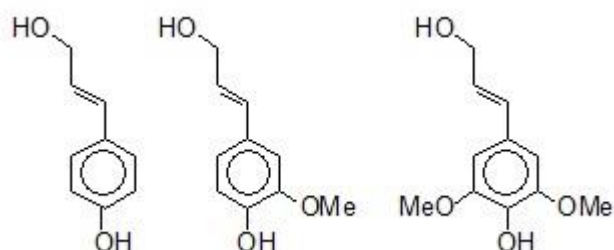
Slika 4: Struktura ksilana (komponenta hemiceluloz) (Foto: Carbohydrates, 2014)

### 2.2.3.3 Lignin

Lignin je tretja komponenta lesa. Molekule pri ligninu so zgrajene drugače kot pri polisaharidih, sestavljene so iz aromatičnega sistema, ki je sestavljen iz fenilpropanskih podenot, ki so med seboj povezane z estrskimi vezmi in C–C vezmi. Njegova kemijska struktura je zelo zapletena. Tako kot celulozo je tudi lignin prvi odkril francoski kemik Payen. Njegovo strukturo je opisal kot bogato z ogljikom. V iglavcih najdemo več lignina kot v listavcih. Med ligninom v listavcih in ligninom v iglavcih najdemo strukturne razlike. Z morfološkega stališča je lignin amorfna sestavina, locirana v spojinah srednje lamele (srednja lamela povezuje celice med seboj) (Fengel in Wegener, 1989).



Slika 5: Lignin (Foto: Medmrežje 3, 2014)



Slika 6: Kemijska struktura monomerov v ligninu: kumaril alkohol, koniferil alkohol in siringil alkohol  
Foto: LignoWorks, 2014)



#### 2.2.3.4 Ostale snovi

Poleg glavnih polimernih komponent so v lesu tudi škrob, pektin in proteini – prisotni v manjših količinah. Nizkomolekularne snovi so prav tako prisotne, vendar v večjih količinah. Te snovi se ne štejejo kot komponente celične stene. Znale so kot ekstraktabilne, saj jih lahko ekstrahiramo iz lesa s pomočjo vode ali drugih ekstrakcijskih topil. Vsebujejo lahko fenolne spojine, terpene, alkohole in maščobne kisline (Gravelsins, 1998).

### 2.3 Hitrorastoče drevesne vrste

V zadnjih časih postaja uporaba obnovljivih virov vse pomembnejša. V Sloveniji k obnovljivosti virov še največ prispevata les in hidroenergija. V zadnjih letih se je v naši državi povečala proizvodnja obnovljivih virov energije. Ker se Slovenija uvršča med najbolj gozdnate države v Evropi, imamo tudi temu primeren dober potencial izkoriščanja lesne biomase v namen pridobivanja goriv. Program rabe lesne biomase kot vira energije med lesna goriva vključuje gozdne lesne ostanke slabše kakovosti; les s kmetijskih površin; ostanke, ki nastanejo pri sečnji gozda; odslužen, a kemično neobdelan les. Ena izmed možnosti izkoriščanja lesne biomase pa so poleg naravnih gozdnih površin tudi umetno ustvarjeni nasadi hitrorastočih drevesnih vrst, kjer se večinoma uporabljajo vrbe in topoli (Čebul idr., 2012).

Nasadi hitrorastočih drevesnih vrst (SRC ali Short Rotation Coppice) so čedalje bolj v uporabi. Prvotno je bil glavni namen tovrstnih nasadov zagotavljanje lesa za celulozno industrijo, danes pa se ta les uporablja za potrebe energetike (Čebul idr., 2012). V nasadih sadijo različne vrste dreves, saj s tem povečajo varnost dreves pred boleznijo in količino pridelka. Obhodnja (sečnja) v nasadih je 2- do 5-letna. Časovno obdobje je odvisno od izbranih hitrorastočih vrst. Za nasade s krajšo obhodnjo (2 do 3 leta) je značilna večja proizvodnja biomase v krajšem času (Defra, 2002 v Čebul idr., 2012, str. 20). Za namene nasadov s hitrorastočimi vrstami se predvsem uporabljajo: navadna breza (*Betula pendula*), črna jelša (*Alnus glutinosa*), siva jelša (*Alnus incana*), gorski javor (*Acer pseudoplatanus*), beka (*Salix viminalis*), bela vrba (*Salix alba*), črni topol (*Populus nigra*), trepelika (*Populus tremula*), veliki jesen (*Fraxinus excelsior*), robinija (*Robinia pseudoacacia*) in še nekatere tujerodne vrste (Mead, 2004 in Hardcastle, 2006 v Čebul idr., 2012). Za namene diplomskega raziskovalnega dela smo uporabili vrbo in topol.

#### 2.3.1 Vrbe

Vrbe spadajo v taksonomsko zelo raznoliko in zapleteno skupino rastlin, ki sestoji iz več kot 300 taksonov (vrste, podvrste, sorte in križanci) po vsem svetu (Clift, 2014).

Lastnosti vrb se razlikujejo glede na vrsto. Vrbe so lahko drevesa ali grmičevje, žalujke ali pokončna drevesa, imajo lahko gladko ali hrapavo lubje, dolgo ali kratko listje. Nekatere vrste cvetijo zgodaj, druge pozno v letu. Prav tako se razlikujejo v trdoti vejic, saj imajo nekatere vrste zelo krhke vejice, druge pa močne. Seznam razlik med vrstami se nadaljuje, vendar glavno je, da vemo, da se vrbe med seboj razlikujejo. Vrbe imajo sposobnost oblikovati identične križance, zaradi katerih je oteženo prepoznavanje identitete. Skoraj vse vrste vrb so zmožne oblikovati križance z eno ali dvema drugima vrstama vrb, če imajo skupen čas cvetenja in če moška in ženska vrsta raste v bližini za nemoten potek opraševanja (Clift, 2014).

Vse vrste vrb pripadajo rodu *Salix*. Znotraj tega rodu obstajajo trije podrodovi, in sicer *Salix* (drevesne vrbe), *Vetrix* (grmičaste vrbe) in *Chamaetia* (alpske, arktične vrbe). Mi smo pri svojem eksperimentalnem delu uporabljali križane tj. hibridne vrste vrbe *Salix tora* in *Salix inger*. Križanci se lahko oblikujejo z opraševanjem ene vrste moškega in druge vrste ženskega spola (Clift, 2014).

*Salix tora* in *Salix inger* sta križanca. Spadata v skupino najbolj donosnih hitrorastočih vrst vrb. Uporabljata se za namene industrijskega pridobivanja rastlin (SRC nasad) za nadaljnjo pridelavo različnih produktov. Priporočljivo je, da so nasadi narejeni iz petih različnih vrst rastlin, saj se s tem poveča donosnost nasada in hkrati zmanjša možnost nastanka bolezni.

*Salix tora* je križanec med *Salix viminalis* in *Salix schwerinii*. Izdelali so ga na Švedskem. Že več let ga gojijo v Veliki Britaniji. Je visoka, pokončna in glede na prirastek biomase zelo rodovitna vrsta. Prav tako ima visoko odpornost na drevesno rjo ter hrošče. Že od samega začetka spada v skupino visoko donosnih rastlin (SalixEnergi, 2014). *Salix inger* je križanec med *Salix triandra* in *Salix viminalis*. Vrsta obstaja od leta 2005. Zelo dobro se obnese v mešanih nasadih (Agrobränsle, 2006).



Slika 7: Nasad SRC vrste *Salix tora* (Foto: SalixEnergi, 2014)

### 2.3.2 Topoli

Topoli (*Populus*) tako kot vrbe sodijo v skupino hitrorastočih drevesnih vrst. Znanih je okoli 40 različnih vrst topolov. V Sloveniji so tri vrste avtohtone: beli (*Populus alba*), črni topol (*Populus nigra*) in trepetlika (*Populus tremula*). Topoli imajo radi vlago, zato najbolj uspevajo ob vodnih virih. Zrastejo lahko zelo visoko. V SRC nasadih jih požanjejo po dveh do petih letih rasti. Križance topola uporabljajo predvsem za namene pridobivanja goriv in energije. Križanci imajo bolj dovršeno sestavo lesa, so bolj prilagodljivi in hitreje rastejo (Balatinecz in Kretschmann, 2001). Ker je topol trdolesnata rastlina, vsebuje več hemiceluloze. Za razliko od topola vrba sodi v skupino mehkolesnatih rastlin (Sannigrahi idr., 2010).

Vse vrste topolov pripadajo rodu *Populus*. Znotraj tega roda obstajajo podrodovi *Populus aspens*, *Populus aigeiros*, *Populus tacamahaca*, *Populus leucooides*, *Populus turanga* in *Populus abaso*. Mi smo pri svojem delu uporabljali dva križanca *Populus AF 2* in *Populus monviso*.

*Populus monviso* je križanec med *Populus nigra* in *Populus generosa*. Ima zmožnost prilagoditve različnim tipom tal. Prav tako je odporen na sušo in večino bolezni. To vrsto topola se žanje na pet let. Les je zelo težek (gostota je velika), primeren je ravno za proizvodnjo energije, papirja in peletov (Bianconi, 2010).



Slika 8: *Populus AF 2* (Foto: Energie pflantzen, 2014)

### 3 BIORAFINERIJA

Biorafinerija je pojem, ki združuje procese za obdelavo različnih biomas za proizvodnjo goriv, energije in kemikalij z dodano vrednostjo. Koncept je povsem analogen z današnjimi rafinerijami surove nafte, katerih končni produkti so gorivo in drugi izdelki iz nafte. Cilj biorafinerije je izolirati vso dodano vrednost iz surovine biomase in pridobiti malo ali nič končnih odpadkov. Takšno vodenje procesov zmanjša splošen vpliv na okolje in izboljšuje gospodarnost. Biorafinerijo lahko identificiramo tudi kot objekt, pri katerem lahko proizvajamo hrano, materiale, kemikalije, energijo ali toploto iz biomase. S proizvodnjo več različnih produktov se lahko izkoristi razlika v komponentah biomas in polizdelkih. S tem lahko maksimiramo vrednost, ki izhaja iz biomase (Demirbas, 2010).

Gospodarjenje z biorafinerijami je vizija prihodnosti, v kateri obnovljivi viri energije nadomestijo fosilna goriva. Prehod gospodarstva na postopke biorafinerije bi zahteval ogromne naložbe v infrastrukturo in izobraževanje (prav tam, str. 1).

#### 3.1 Kratek pregled zgodovine biorafinerij

Proces pretvorbe obnovljivih virov v uporabne in večvrednostne spojine ni nič novega. V človeški zgodovini se je pojavilo veliko oblik biorafinerij, dandanes uporabljamo le malo bolj dovršene in kompleksnejše postopke pretvorbe v procesih biorafinerije. Kot biorafinerijo lahko smatramo prve oblike fermentacije in destilacije. Etanol so ljudje uporabljali že v rimskih časih kot vinjeno sestavino alkoholnih pijač. Stari Egipčani so alkohol proizvajali s fermentiranjem vegetativnih materialov. Destilacijo so izumili stari Kitajci in ugotovili, da proces povečuje koncentracijo alkohola v fermentiranih raztopinah. Etanol so skozi različna zgodovinska obdobja uporabljali kot gorivo za svetilke, dodatek h gorivu. Brazilija ga je razglasila za gorivo v začetku 20. stol. (Demirbas, 2010, str. 82).

Uporaba rastlinskih olj kot alternativa nafte je bila predlagana na začetku leta 1980. Prednosti rastlinskih olj pred dizelskim gorivom so: tekoče agregatno stanje in prenosljivost, obnovljivost, višja temperatura ob vžigu, ne vsebuje žvepla, so biorazgradljiva. Komerzialna proizvodnja se je začela v poznih 1990-ih. Zgodovinski in tehnološki opis industrijskih virov vključuje vidike v začetnih fazah proizvodnje sladkorja, hidrolizo škroba, oblikovanje in ločevanje furfurala, celuloze in njene proizvodnje, vanilina iz lignina in fermentacijo mlečne kisline. Vendar je v času industrijske revolucije postal premog najbolj priljubljen vir energije. Takrat so postajala

fosilna goriva popularnejša od biomase. Trend je zajel ne le področje energetike, temveč tudi proizvodnjo virov kemikalij. Integrirani procesi in tehnološki razvoj biorafinerij so postali predmeti raziskav in razvoja v 20. stol. (Demirbas, 2010, str. 83).

Mnogi od trenutnih bioindustrijskih proizvodov so rezultat neposredne fizikalne ali kemijske obdelave in predelave biomase v: celulozo, škrob, olje, beljakovine, lignin in terpene. Prav zaradi biotehnoloških procesov in metod se proizvajajo tudi različne surovine kemikalij (etanol, butanol, aceton, mlečna kislina in aminokislina) (Demirbas, 2010, str 83).

## 3.2 Vrste biorafinerij

Clark in Deswarte (2008) navajata tri različne vrste biorafinerije:

1. *biorafinerija faze I* (ena osnovna surovina, en delovni postopek in en končni produkt);
2. *biorafinerija faze II* (ena osnovna surovina, več delovnih procesov in več končnih produktov);
3. *biorafinerija faze III* (več osnovnih surovin, več delovnih procesov in več končnih produktov).

### 3.2.1 Biorafinerija faze I

Pri biorafineriji faze I se za delovanje uporablja samo ena osnovna surovina. Ima enoten fiksni delovni proces za predelavo surovine in ima en sam glavni produkt. Njen koncept se že uporablja v več državah. Izkazal se je za ekonomsko obstojnega. Veliko biorafinerij faze I v Evropi trenutno proizvaja biodizel. Za osnovno surovino se večinoma uporablja rastlinsko olje (zlasti repično olje). Končna produkta sta biodizel in glicerol, ki nastaneta preko procesa imenovanega transesterifikacija (proces, pri katerem rastlinsko olje reagira z alkoholom (metanol), ob prisotnosti katalizatorja (NaOH)). Drugi primeri biorafinerije faze I vključujejo predelovalnice papirja in tovarne za predelavo koruze v etanol (Clark in Deswarte, 2008).

### 3.2.2 Biorafinerija faze II

Podobno kot pri biorafineriji faze I lahko tudi pri tej obliki obdelujejo le eno osnovno surovino. Na koncu postopka lahko dobimo različne končne izdelke (energija, kemikalije z dodano vrednostjo in različni materiali) ter s tem zadostimo povpraševanju trga, cenam. Primer biorafinerije faze II je tovarna Novamont v Italiji, ki uporablja koruzni škrob za proizvodnjo različnih kemičnih izdelkov, vključno z biološko razgradljivim poliestrom in termoplasti. Drugi primer te vrste biorafinerije je tovarna Roquette v Franciji, ki proizvaja več derivatov ogljikovih hidratov, vključno z naravnim in modificiranim škrobom, sladili, polioli in bioetanolom iz žitnih zrn. Vse biorafinerije faze I bi lahko pretvorili v biorafinerije faze II, če bi identificirali načine za nadgradnjo različnih stranskih delovnih procesov. Biorafinerija faze I, ki proizvaja biodizel, se lahko spremeni v biorafinerijo faze II, če razvijemo tehnologije, ki pretvarjajo glicerol biodizla (surovi glicerol) v bioenergijo in kemične izdelke (Clark in Deswarte, 2008).

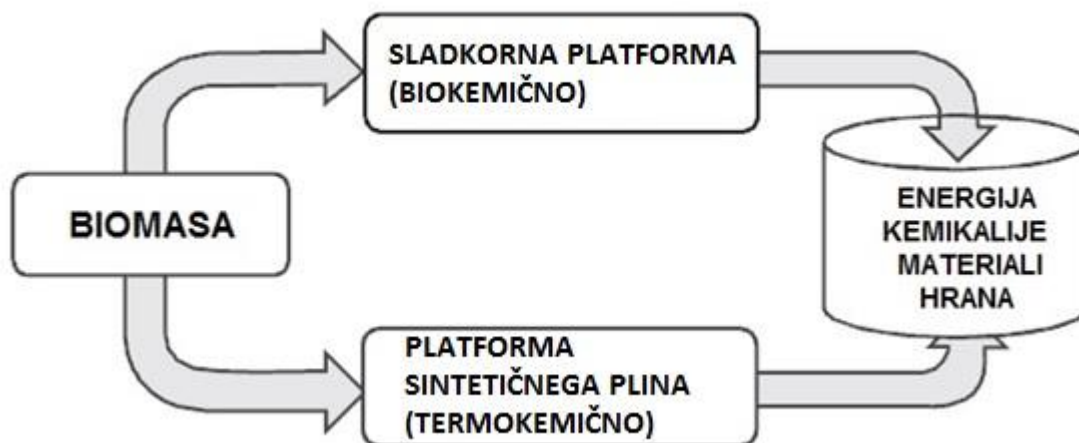
### 3.2.3 Biorafinerija faze III

Biorafinerije faze III spadajo med najbolj razvite oz. napredne vrste biorafinerij. Z njihovo pomočjo nismo sposobni proizvajati le različnih vrst energij in kemičnih izdelkov z dodano vrednostjo, ampak tudi različne industrijski izdelke, ki jih naša družba potrebuje. Raznolikost izdelkov zagotavlja visoko stopnjo prilagodljivosti na spreminjajoče se zahteve na trgu (trenutno stranski produkt lahko postane ključ izdelka v prihodnosti). Različnost industrijskih izdelkov je odvisna od raznolikosti osnovnih surovin. Poleg tega je njihov vidik "različnost surovin" tisti, ki pomaga, da se zagotovi razpoložljivost substrata in ponuja izbiro najboljše donosne kombinacije surovin. V tem trenutku komercialna biorafinerija faze III ne obstaja. Izvaja se obsežno delo na področju razvoja takšne biorafinerije v Evropi, ZDA in drugod po svetu. Biorafinerije faze III, ki bi bile tudi brez odpadkov, so verjetno desetletje stran (Clark in Deswarte, 2008).

Trenutno obstajajo štiri biorafinerije faze III, ki so v raziskovanju (Clark in Deswarte, 2008):

- biorafinerija lignoceluloze (LCF Biorafinerija);
- biorafinerija celih rastlin;
- zelena biorafinerija;
- biorafinerija dvojne platforme.

*Biorafinerija lignoceluloze* običajno za osnovno surovino potrebuje biomaso lesa, slame, koruze itd. Lignocelulozna surovina (sestavljena predvsem iz polisaharidov in lignina) bo ob vstopu v biorafinerijski postopek frakcionirana in pretvorjena v različne energetske in kemične izdelke. *Biorafinerija celih rastlin* bo predelovala žita (pšenica, koruza, oljna repica) in pretvorila celotno rastlino (steblo in zrnca) v energente, kemikalije in materiale. Prvi korak pri tej vrsti biorafinerije je ločiti seme od stebela. Semena lahko nato obdelujemo za proizvodnjo škroba in široko paleto izdelkov, vključno z etanolom in bioplastiko (polimlečna kislina) (Clark in Deswarte, 2008). Pri *zeleni biorafineriji* za delovanje potrebujemo rastline, kot so trava, lucerna, detelja, nezrela žita in alge. Pretvorimo jih lahko v več koristnih izdelkov, vključno z energijo, kemikalijami, materiali in krmo. Pri tem uporabljamo kombinacijo različnih tehnologij, vključno s fermentacijo. Zelena biomasa se načeloma loči na vlakninsko bogato stisnjeno torto in s hranili bogat zeleni sok (Andersen in Kiel, 2000 v Clark in Deswarte, 2008). Zeleni sok vsebuje številne uporabne kemikalije, kot so aminokislina in barvila. *Biorafinerija dvojne platforme* proizvaja produkte iz dveh ločenih platform. Vsaka platforma je zadolžena za drugačne naloge. Vsaka platforma lahko na koncu proizvede energijo, kemikalije, materiale, hrano in ostale produkte. Kot primer navedimo za osnovno surovino biomaso: ena platforma bo delovala na podlagi biokemičnih procesov in bo iz biomase pridobila sladkorje, druga bo delovala na termokemični obdelavi in bo iz biomase pridobila sintetični plin. Nato lahko iz teh dveh pridobljenih komponent ustvarimo kaj drugega (Slika 9).



Slika 9: Poenostavljena shema diagrama koncepta biorafinerije dvojne platforme (Foto: Clark in Deswarte, 2008, str. 13)

## 4 FIZIKALNI POSTOPKI OBDELAVE LESNE BIOMASE

Surovina biomase mora biti pripravljena, skladiščena in prepeljana v procesu pretvorbe energije, preden jo je mogoče uporabiti za proizvodnjo električne energije ali drugih produktov. Obstaja veliko različnih vrst opreme za drobljenje lesa za različne načine uporabe. Produkti drobljenja lesa so sekanci, peleti, žagovina, lesni koščki, kosmiči, vlakna in lesna moka. Za tovrstne produkte potrebujemo tudi ustrezno opremo. Oprema vključuje mline za mletje lesne biomase in tudi sušilnike, ki ob koncu drobljenja posušijo lesno biomaso (Gravelsins, 1998).

Sekanje je najbolj osnovna metoda primarnega zmanjšanja velikosti lesa. Najbolj dovršene aplikacije za sekance so v proizvodnji mletja. Poznamo več različnih naprav za mletje lesa. Te se razlikujejo v končnem produktu (Gravelsins, 1998).

### 4.1 Tehnike sušenja lesa

Po poseku vsebuje les v sebi še vedno veliko vode, zato jo moramo odstraniti za nadaljnjo predelavo ter uporabo. Sušenje je odstranjevanje vode iz lesa, zaradi česar se mu z izhlapevanjem vode spremeni večina njegovih lastnosti. Svojo obliko spreminja s krčenjem. Posušenemu lesu se zmanjša teža in izboljšajo mehanske lastnosti (trdota, trdnost). Prav tako se mu poveča kalorična vrednost in tudi toplotne, električne in akustične lastnosti (Gosar, 2007). Sušenje lesa je v industriji nujen postopek in je prav tako več ali manj poznan. Poznamo različne vrste sušenja: konvencionalno sušenje, zračno sušenje, vakuumsko, kondenzacijsko sušenje ipd.

#### 4.1.1 Liofilizacija

Liofilizacija je tehnika odstranjevanja vlage iz spojin v hrani, kemikalijah, lesu s pomočjo zmrzovanja. Uporablja se za potrebe farmacevtske, biotehnoške in prehranske industrije. Liofilizacija se uporablja tudi za izboljšanje ravnovesja med vlago in občutljivostjo samega proizvoda. Postopek liofilizacije obsega naslednje stopnje: priprava produkta za sušenje, zmrzovanje, primarno sušenje, sekundarno sušenje in hermetično pakiranje. Sam proces je odvisen od produkta, zato je potrebno predhodno določiti čas sušenja, temperaturo in ustrezen tlak. Prednost te vrste sušenja je v tem, da les bolje posuši. Tako obdelan les je tudi veliko lažji in zavzema manj prostornine. Proces je dolgotrajen in drag. Liofilizator porabi približno 3-krat več energije kot konvencionalno sušenje (Povh, 1998). Sušenje lesa poteka po najrazličnejših uveljavljenih postopkih. Kjer je takšno sušenje neizogibno, predstavlja velik delež stroškov. Uporablja se ga le za občutljive in cenjene produkte. Za sušenje mnogih občutljivih materialov se je že uveljavilo sublimacijsko sušenje v liofilizatorju. Liofilizator deluje tako, da pri nizkih tlakih in temperaturah prehaja zamrznjena voda v lesu direktno v paro. Prednosti postopka od ostalih tehnik sušenja so: relativno kratek čas sušenja lesa, nizka temperatura in tlak; nizki obratovalni stroški. Nizka temperatura in tlak prav tako preprečita nezaželeno obarvanje lesne biomase (Gosar, 2007).

Proces liofilizacije se je pojavil že v drugi svetovni vojni, kjer so konzervirali bakterije (npr. steklino). Znanstvenika Flosdorf in Mudd sta liofilizacijo leta 1935 uporabila za sušenje človeške krvne plazme, kar se je industrijsko razvilo v drugi svetovni vojni. Takrat so s pomočjo liofilizacije izdelovali antibiotike, po drugi svetovni vojni pa so proces uporabili še v druge medicinske in farmacevtske namene (sušenje hormonov, človeškega mleka za otroke). V kasnejših letih se je proces izkazal za uporabnega tudi na drugih področjih – v nuklearni tehniki, kemični in prehranski tehniki (Povh, 1998).

Pri postopku najprej začnemo z zamrznitvijo snovi, ki jo želimo posušiti. Snov je potrebno zamrzniti počasi. Po navadi je zamrzovanje izvedeno v zamrzovalno-sušilnem stroju. Ko snov zamrznemo do točke, kjer je hkrati v tekočem in trdnem agregatnem stanju, zagotovimo pojav sublimacije in preprečimo taljenje. Nato sledi primarno sušenje, v katerem moramo dovesti dovolj toplote k snovi, da voda sublimira. V začetni fazi sušenja načeloma sublimira okoli 90 % vode. Ta faza je počasna in lahko traja kar nekaj dni. Snov, ki je v liofilizatorju, lahko hitro spremeni svojo strukturo, če dovedemo preveč toplote naenkrat. Primarnemu sušenju sledi sekundarno sušenje. Cilj sekundarnega sušenja je odstraniti nezmrznjene vodne molekule iz snovi. Temperatura je lahko višja kot v prejšnji fazi, prav tako pa na drugi strani lahko znižamo tlak. S tem pospešimo desorpcijo vode. Ko je proces liofilizacije končan, vakuum izničimo tako, da so vzorci neprodušno zaprti. Po koncu liofiliziranja se v snov vrne nazaj le okoli 2–4 % vode (Fetterolf, 2010).



Slika 10: Del liofilizatorja (Foto: Šekoranja, 2013)

#### 4.1.2 Konvencionalno sušenje lesa

Ko govorimo o sušenju s konvencionalnimi tehnikami, govorimo o sušenju v za to prirejeni komori, in sicer z delno izmenjavo zraka in z nastavitvami različne temperature gretja. Izraz konvencijski se nanaša na prenos toplote in vode z zrakom. Ta se v posebnem prostoru kondicira (segreje, navlaži), v sušilnem prostoru segreje les, od njega pa sprejme oddano vlogo (Lapajne, 2007, str. 6).

Konvencionalno sušenje je hitrejše od zračnega sušenja in je zato industriji bolj praktično. S konvencionalnim sušenjem in vedno bolj izpopolnjeno opremo dosežemo vedno boljše kakovost posušenega lesa, krajši čas sušenja in manjšo porabo energije. Temperature v konvencionalnih sušilnicah so odvisne od vrste in velikosti lesnih sekancev, prav tako od vlažnosti in kvalitete lesa.

#### 4.1.3 Sušenje lesa na prostem

Naravno sušenje je sušenje na prostem ali v pokritem prostoru, kjer je les izpostavljen atmosferskemu zraku. Sušenje poteka pri relativno nizkih temperaturah in zato traja dalj časa. Sušenje na prostem se začne takoj, ko les posekamo in se konča, ko les doseže ravnovesje z vlogo v zraku. Zato se les lahko posuši do 15 % vlažnosti in tudi manj, kar je seveda odvisno od klime določenega kraja (Geršak in Velušček, 2003).

Čeprav smo pri hitrosti sušenja in doseganju nizke končne vlažnosti na prostem odvisni večinoma od vremenskih razmer, lahko s pravilno izbiro in ureditvijo sušilnega prostora ter ustrezno pripravo lesa za sušenje izkoristimo vse naravne možnosti (Lapajne, 2007).

Sušenje lesa na prostem je učinkovito, če zagotovimo ustrezen toplotni tok na sušečo se površino in hkrati čim hitrejšo odvajanje izhlapevajoče vode iz lesa. Nalogo prenosa toplote in vodne pare opravlja zrak. Zaradi oddajanje toplote se le-ta pri prehodu skozi zložaj ohlaja, hkrati pa se zaradi sprejemanja vode njegova vlažnost povečuje. Oba pojava zmanjšujeta učinkovitost sušenja, zato je pomembno, da se zrak čim hitreje izmenjuje. Hitrost izmenjave zraka je odvisna od hitrosti vetra, oblikovanosti zložaja, lege skladovnice na skladišču, oblike in urejenosti skladišča (Gorišek, 2003).





Slika 11: Sušenje na prostem (Foto: Šekoranja, 2013)

## 4.2 Mehanska obdelava lesa

Pri mehanski obdelavi lesne biomase gre predvsem za obdelavo lesa v različnih napravah, ki služijo za sekanje, drobljenje ali mletje lesne biomase. V lesno-predelovalni industriji poznamo več različnih vrst naprav, s katerimi lahko obdelamo lesno biomaso na želeno velikost in obliko. Poznamo mline za mletje lesa ter sekalnike, stiskalnice za stiskanje lesa in razcepilnik, s katerim lahko pridobimo polena. Naprave za obdelavo lesa so različnih velikosti in zmogljivosti. Pri praktičnem delu za diplomsko delo smo uporabljali ročni mlin za mletje lesne biomase. Z mletjem lesne biomase pridobimo lesne sekance.

Lesni sekanci so nasekana lesna biomasa v obliki koščkov z določeno velikostjo delcev, ki se izdelujejo z mehansko obdelavo z ostrim orodjem, kot so npr. noži. Lesni sekanci so nepravilne pravokotne oblike in značilne dolžine od 5 do 50 mm ter z majhno debelino v primerjavi z drugimi dimenzijami. Kakovost sekancev opredeljuje vsebnost vode, drevesna vrsta, kakovost lesa, morebitno trohnenje, porazdelitev in velikost delcev ter delež različnih nečistoč oziroma primesi (zemlja, plastika in drugi tujki). Vsi ti dejavniki vplivajo na kurilno vrednost, gostoto nasutja in delež pepela (Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, 2014).

## 5 EKSPERIMENTALNI DEL

### 5.1 Metode raziskovanja

Diplomsko delo je sestavljeno iz teoretičnega in empiričnega dela.

Pri izdelavi uvodnega dela diplomske naloge smo uporabili deskriptivno metodo s študijem domače in tuje literature. Za empirični del naloge smo podatke pridobili z raziskovalnim delom na ERICo Velenje, Inštitutu za ekološke raziskave.

## 5.2 Vrsta vzorcev

Lesni biomasi, ki smo ju uporabljali pri raziskovanju, sta bili vrba in topol. Vrbo in topol smo pridobili iz SRC nasada. Uporabljali smo dve različni vrsti vrbe (*Salix tora* in *Salix inger*) in dva različna tipa topola (*Populus monviso* in *Populus AF 2*). Ko je bilo vso drevje posekano, ga je bilo potrebno pripraviti za nadaljnjo strojno obdelavo. Najprej je bilo potrebno z drevja odstraniti liste, saj smo želeli imeti za končno maso le čisto lesno maso (debla in veje). Odstranjevanje listov je potekalo delno v laboratoriju Visoke šole za varstvo okolja in delno v laboratorijih ERICo Velenje, Inštituta za ekološke raziskave.



Slika 12: Lesna biomasa – potrebna čiščenja (Foto: Šekoranja, 2013).

## 5.3 Priprava vzorcev

Odstranjevanje listov je pomembno zato, ker če biomasa vsebuje preveč listja, le-to spremeni njeno kemično sestavo. Po odstranitvi odpadne mase smo se lotili tehnološke obdelave lesa.

Tehnoloških priprav lesa je več vrst. Moderna tehnologija vključuje stroje, računalnike in avtomatizacijo procesa. Tehnologijo delimo na tehnologijo materiala in tehnologijo obdelave. Prav tako delimo tehnologijo glede na način predelave v mehansko tehnologijo in kemijsko tehnologijo (Aberšek, 1995, str. 8). V eksperimentalnem delu so bili vzorci lesa dodelani z mehansko tehnologijo obdelave.

V diplomskem delu smo se osredotočili na pripravo lesnih sekancev. Sekanci so kosi sesekanega lesa, veliki do 10 cm. Običajno sekance izdelujejo iz drobnega lesa (les z majhnim premerom: npr. droben les iz redčenja gozdov, veje, krošnje), lesa slabše kakovosti ali iz lesnih ostankov. Poleg sekancev poznamo tudi druge oblike biomase, npr. pelete in brikete.

V našem primeru je tehnološka obdelava lesa pomenila mletje. To smo izvedli v za to primernih prostorih in s primernimi napravami. Za mletje sekancev smo uporabili mlin Retsch SM 300, ki ima različne nastavitve mletja in frekvenco obratov. Nastavitve smo lahko prilagajali glede na zahteve dela. Mletje sekancev je potekalo dvakrat.

Prvič smo sekance zmleli na grobo (velikost delcev: < 2,5 cm), drugič na fino (velikost delcev: < 2 mm). Po prvem mletju sekancev na grobo smo jih zračno posušili in jih šele potem drugič zmleli. Mletje je najbolj optimalno, ko v mlin dajemo manjše količine snovi, saj s tem omogočimo manjšo obremenjenost mlina. Mlin obratuje lažje in se med procesom mletja ne

ustavlja – prav tako se ne pregreva. Če pride do pregrevanja, je potrebno mletje ustaviti in nadaljevati potem, ko se mlin ohladi. Optimalno delovanje mlina smo razvili tekom praktičnega dela.



**Slika 13: Vrba po prvem mletju (Foto: Šekoranja, 2013)**

Sušenje vzorcev je bil osnovni del našega raziskovalnega dela. Obstajata dve metodi sušenja: naravno in umetna. Naravno sušenje lesa poteka v zračnem prostoru, brez naprav za hitrejše sušenje lesa. Umetni način sušenja omogoča hitrejše sušenje s pomočjo sušilnikov ali liofilizatorja. Za umetno sušenje je značilno, da je hitrejše od naravnega. Ko je les posušen, je pripravljen za nadaljnje eksperimente (Aberšek, 1995, str. 8). Pri raziskovalnem delu smo uporabili oba načina sušenja. Najprej smo vse dobljene vzorce naravno posušili, nato smo en del posušili umetno v sušilniku in drugi del v liofilizatorju.

Pripravo vzorcev smo optimizirali. Optimizacija postopka pomeni, da iščemo najboljše med več možnimi rešitvami nekega problema. Pri optimizaciji postopka smo uporabljali raziskovalno opremo – mlin, dva sušilnika, zamrzovalnik in hladilnik.

Ko smo z dobljenih sekancev odstranili vso odpadno listje, smo od vsakega vzorca odvzeli del količine in jo shranili v 2 L vrečke ter jih dali v zamrzovalnik. Prav tako smo en del lesne biomase shranili v 1 L vrečke in jih dali v hladilnik. Vsak vzorec smo posebej označili. Preostanek sekancev smo razgrnili na vrečke in jih pustili, da so se zračno sušili na sobni temperaturi. Ko smo jih dobili, so bili namreč še mokri. Vzorci se med sabo pri zračnem sušenju niso mešali.

**Tabela 1: Označbe vzorcev po drevesnih vrstah**

Oznaka vzorca	Drevesna vrsta
VRBA 1	<i>Salix tora</i>
VRBA 2	<i>Salix inger</i>
TOPOL 1	<i>Populus monviso</i>
TOPOL 2	<i>Populus AF 2</i>

### 5.3.1 Postopek priprave zamrznjenih vzorcev

Vzorci, ki smo jih dali v zamrzovalnik, so bili pripravljene za liofilizacijo. V zamrzovalnik smo dali dve vrsti topola in dve vrsti vrbe. Natehtane mase vidimo v Tabeli 1. Postopek obdelave zamrznjenih vzorcev:

- 1. mletje/drobljenje: grobo mletje, vzorci so pri prvem mletju še zamrznjeni,
- po 1. mletju jih ponovno zamrznemo,
- nato vzorce stehamo in jih postavimo v liofilizator,
- 2. mletje: fino mletje, pridobimo najmanjše delce, pri zapiranju v posodico smo jih pokrili s parafilmom.

### 5.3.2 Postopek priprave zračno sušenih vzorcev

Zračno sušeni vzorci so zajemali lesno biomaso, ki je bila naravno sušena. Zajemali so dve vrsti topola in dve vrsti vrbe. Mase vidimo v Tabeli 1. Postopek obdelave:

- 1. mletje/drobljenje: potrebno je mleti manjše količine vzorca naenkrat, da se mlin ne pregreva,
- vzorce po prvem mletju damo v sušilnik na 105 °C do konstantne mase in na 38 °C do konstantne mase,
- 2. mletje: z drugim mletjem pridobimo manjše delce.

### 5.3.3 Postopek priprave vzorcev iz hladilnika

V hladilnik smo dali dve vrsti topola in dve vrsti vrbe. Postopek obdelave:

- 1. mletje/drobljenje: tudi pri teh vzorcih smo mleli manjše količine naenkrat,
- vzorce po prvem mletju smo razdelili na tri dele: en del smo dali nazaj v hladilnico, en del smo sušili na 105 °C, drugi del pa na 38 °C,
- 2. mletje.

Vsak vzorec smo posebej označili, da se vzorci med sabo niso pomešali.

## 5.4 Raziskovalna oprema

### a) Rezalni mlin SM 300 Retsch

Rezalni mlinci so primerni za brušenje mehkih, srednje trdih, težkih, elastičnih, vlaknenih in heterogenih mešanic izdelkov. Rezalni mlin SM 300 se odlikuje na še posebej težkih delovnih mestih in je primeren za profesionalno uporabo. Je eden izmed najnovejših proizvodov na trgu rezalnih mlinov. Deluje z visokim navorom 3 kW pogona s tehnologijo RES (dodatni masni vztrajnik). Omogoča izjemno učinkovito zmanjšanje predhodnih velikosti heterogenih zmesi: odpadki ali elektronski sestavni deli. Analitska finost končnega izdelka je dosežena že v prvi delovni uri (Retsch, 2015).

SM 300 se odlikuje z nožastim mlinom. Uspešno ga lahko uporabljamo za veliko različnih materialov. V procesu mletja se lahko vzorec delno ogreje zato, da lahko mlin uspešno zmelje za brušenje temperaturno občutljive materiale. Ima več nastavljivih hitrosti. SM 300 je primeren tudi pri brušenju lahkih vzorčnih materialov ali manjših količin (Retsch, 2015).



Slika 14: Mlin SM 300 Retsch (Foto: Šekoranja, 2013)

Materiali, ki jih lahko zmeljemo (Retsch, 2015):

- aluminijeva žindra,
- kosti,
- kabli,
- karton,
- polimeri,
- plastika,
- guma,
- smola,
- les itd.

Lastnosti (Retsch, 2015):

- funkcija mletja in rezanja,
- končna velikost delcev 0,25–20 mm,
- rotor s šestimi diski,
- sestavljen je iz nerjavečega jekla,
- moč: 600 W.

Pri poteku procesa mletja/rezanja zahteva delo z mlinom previdnost in zbranost. Pri delu z mlinom je potrebno nositi zaščitna oblačila in masko, saj se pri mletju lesa v zrak izloča prah.

### **b) Liofilizator DW 3**

Liofilizator je priprava za odstranjevanje kapljev (praviloma vode) iz vzorcev. Deluje na način, da najprej vso vodo v preparatu zamrznemo. Nastale kristale v naslednjem koraku odstranimo s sublimacijo, kar dosežemo z znižanjem pritiska. Ker kapljevina tako prehaja neposredno iz trdnega v plinsko stanje, so mehanske poškodbe sušenja (npr. tkiv) minimalne, hkrati pa so posušeni preparati obstojni. Uporablja se za različne tehnike sušenja. Izdelki se lahko sušijo v različnih vrstah embalaže. Liofilizatorje se zaradi visokega stroška nabave in obratovanja uporablja predvsem v raziskovalne namene.

Pri raziskovalnem delu smo uporabljali klasični liofilizator, kjer smo sušili določeno količino vzorcev lesne biomase.

Moč liofilizatorja: 410 W.

Električna napetost liofilizatorja: 220 V.

Moč črpalke liofilizatorja: 370 W.



Slika 15: Liofilizator (Foto: Šekoranja, 2013)



Slika 16: Vzorci v liofilizatorju (Foto: Šekoranja, 2013)

### c) Zračni sušilnik

Zračni sušilniki, ki se uporabljajo v raziskovalne namene, so oblikovani posebej za namene laboratorijskega dela. Mi smo pri svojem delu uporabljali dva laboratorijska sušilnika, ki sta bila nastavljena na različne temperature sušenja vzorcev. Sušilnika imata več stopenj programov, vgrajen časovnik, cirkulacijo zraka, različne police ipd.

Moč sušilnika: 2070 W

Električna napetost: 220 V



Slika 17: Vzorci v sušilniku (Foto: Šekoranja, 2013)

### d) Ostala oprema

Poleg naštetih naprav, ki so bile poglavitni del raziskovalnega dela, smo pri raziskovalnem delu uporabljali tudi drugo pomožno opremo:

- plastične posodice,
- vedra,
- sito,
- klešče,
- pladnje,
- tehtnico,
- zaščitno obleko,
- zaščitno masko za obraz,
- zaščitna očala,
- zaščitne rokavice,
- sesalec.





Slika 18: Vzorci lesne biomase v vedrih (Foto: Šekoranja, 2013)



Slika 19: Tehtanje vzorca (Foto: Šekoranja, 2013)

Našteta oprema nam je omogočila nemoten potek raziskovalnega dela. Prav tako smo z uporabo zaščitne opreme poskrbeli za našo varnost pri delu.

## 6 REZULTATI

V tem poglavju so zbrani rezultati, pridobljeni iz različnih načinov sušenja lesne biomase. Pri vsakem načinu sušenja lesne biomase smo izračunali tudi vsebnost (%) vode, ki smo jo učinkovito odstranili iz lesne biomase po sušenju.

Delež mase vode v lesu glede na maso vlažnega lesa (Vlažnost in vsebnost vode v lesu, 2015):

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_w} \times 100$$

$m_w$  = masa svežega lesa

$m_0$  = masa sušenega lesa

$w$  = delež mase vode (%) v lesni biomasi

### 6.1 Zračno sušeni vzorci

Zračno sušene vzorce smo najprej grobo zmleli. Pri vrbi 1 in 2 se je mlin po določenem času delovanja začel močno pregrevati. Zaradi pregrevanja se je les, ki se je nahajal v rotorju, lepil na njegove stene. Takšen les ni bil uporaben za nadaljnje raziskave. Obstaja tudi možnost vžiga, saj so leseni delci zelo majhni in temperature visoke. Zaradi tega smo mlin ugašali in imeli premore. Med premori smo mlin očistili.

#### 6.1.1 Vzorci pred sušenjem

Zračno sušene vzorce smo hranili v vedrih. Za vsak vzorec sta bili dve vedri. Tehtanje vzorcev, izvedeno pred prvim sušenjem:

Tabela 2: Mase zračno sušenih vzorcev pred sušenjem.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C
<b>Vrba 1</b>	657 g	653 g
<b>Vrba 2</b>	639 g	535 g
<b>Topol 1</b>	636,6 g	421 g
<b>Topol 2</b>	542 g	539 g

### 6.1.2 Vzorci po sušenju

Tehtanje vzorcev, izvedeno po prvem sušenju:

Tabela 3: Mase zračno sušenih vzorcev po sušenju.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C
<b>Vrba 1</b>	631 g	586 g
<b>Vrba 2</b>	613 g	513 g
<b>Topol 1</b>	608 g	400 g
<b>Topol 2</b>	492 g	511 g

Iz rezultatov je razvidno, da so se mase vzorcev znižale. Po tem lahko sklepamo, da se je procent vode v vzorcih zmanjšal, kar je vplivalo na končno težo. Prav tako lahko opazimo, da so bile večje razlike v teži pri sušenju na višji temperaturi.

### 6.1.3 Delež vode

Delež vode, ki smo ga učinkovito odstranili iz vzorcev, izražen v %:

Tabela 4: Učinkovito odstranjena voda iz zračno sušenih vzorcev, izražena v %.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C
<b>Vrba 1</b>	4,0	10,3
<b>Vrba 2</b>	4,1	4,1
<b>Topol 1</b>	4,5	5,0
<b>Topol 2</b>	9,2	5,2

Delež vode v vzorcih se je, kot smo predvidevali, znižal. Razlike v deležih vode so odvisne glede na vrsto lesne biomase, natehtane mase in višine temperature sušenja. Pri Topolu 2 opazimo da so rezultati ravno obratni kot pri ostalih vzorcih. Predvidevamo, da je to vzrok napake pri tehtanju vzorcev.

### 6.1.4 Vzorci po drugem mletju

Po sušenju vzorcev je nastopilo še drugo mletje. Po končanem mletju je bila velikost lesnih delcev 2–3 mm. Vzorci so se manj lepili na stene, mlin smo manjkrat ugasnili in ga sčistili. Kljub vsemu se pri drugem mletju pojavljajo izgube količine vzorcev zaradi omenjenih težav pri mletju.

Tabela 5: Mase zračno sušenih vzorcev po drugem mletju.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C
<b>Vrba 1</b>	610 g	580 g
<b>Vrba 2</b>	605,1 g	523,9 g
<b>Topol 1</b>	570 g	395 g
<b>Topol 2</b>	384 g	501 g

## 6.2 Zamrznjeni vzorci

Zamrznjene vzorce smo razdelili na tri dele. En del je bil namenjen za sušenje na 38 °C, drugi del za sušenje na 105 °C, tretji del pa za sušenje v liofilizatorju. Najprej je nastopilo 1. mletje. Mleli smo s 700 obrati. Dodajali smo manjše količine vzorcev, saj smo s tem poskušali preprečiti pregrevanje mlina in s tem upočasnjeno mletje. Po vsakem mletju smo mlin očistili.

Najprej smo zmleli vse štiri vzorce. Prvo mletje je bilo grobo mletje. Nato smo jih razdelili na tri dele. Natehtano maso vzorcev smo razdelili na šest lončkov z volumnom 500 ml. Po dva lončka smo uporabili za en postopek (torej dva lončka za liofilizacijo, dva za sušenje na 38 °C in dva za sušenje na 105 °C).

### 6.2.1 Vzorci pred sušenjem

Tabela 6: Mase zmrznjenih vzorcev pred sušenjem.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C	Liofilizacija vzorca
<b>Vrba 1</b>	138 g	122 g	130 g
<b>Vrba 2</b>	135 g	89 g	49 g
<b>Topol 1</b>	135 g	80 g	55 g
<b>Topol 2</b>	111 g	165 g	56 g

Opomba: V liofilizatorju ni bilo dovolj prostora za vseh šest lončkov, kot je bilo to predvideno na začetku. Zato smo v liofilizator dali en lonček Vzorca 1, Vzorca 2 in Vzorca 4 ter oba lončka Vzorca 3. Preostale lončke smo sušili z ostalimi na 38 °C in 105 °C. Zato so natehtane mase ponekod večje od ostalih.

Pri sušenju na 105 °C smo vrstni red pladnjev z vzorci vsake toliko časa zamenjali, saj bi sicer lahko prišlo do vžiga zgornjih vzorcev, ki so bili tik pod virom toplote.

### 6.2.2 Vzorci po sušenju

Pričakovali smo, da se bodo mase po sušenju zmanjšale. Največ naj bi se zmanjšale pri sušenju na 105 °C, najmanj pa na 38 °C.

Tabela 7: Mase zmrznjenih vzorcev po sušenju.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C	Liofilizacija vzorca
<b>Vrba 1</b>	124 g	106,5 g	113,5 g
<b>Vrba 2</b>	121 g	80 g	43,7 g
<b>Topol 1</b>	115,7 g	66,7 g	43 g
<b>Topol 2</b>	97,5 g	143 g	49 g

Iz rezultatov je razvidno, da so se mase vzorcev znižale. Po tem lahko sklepamo, da se je procent vode v vzorcih zmanjšal, kar je vplivalo na končno težo. Prav tako lahko opazimo, da so bile večje razlike v teži pri sušenju na višji temperaturi. Pri načinu sušenja z liofilizatorjem lahko tudi opazimo znižanje teže vzorcev po opravljenem sušenju.

### 6.2.3 Delež vode

Delež vode, ki smo ga učinkovito odstranili iz vzorcev, izražen v %:

Tabela 8: Učinkovito odstranjena voda iz zmrznjenih vzorcev, izražena v %.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C	Liofilizacija vzorca
<b>Vrba 1</b>	10,1	12,7	12,7
<b>Vrba 2</b>	10,4	10,1	10,8
<b>Topol 1</b>	14,3	16,6	21,8
<b>Topol 2</b>	12,2	13,3	12,5

Pri vzorcih iz zamrzovalnika smo odstranili večje deleže vode iz lesne biomase kot pri zračno sušenih vzorcih, kar pomeni, da dajo zamrznjeni vzorci boljše izkoristke pri sušenju kot zračno sušeni vzorci. Pri topolu 1, ki se je sušil v liofilizatorju, smo v primerjavi z drugimi vzorci opazili znaten preskok v izračunani količini odstranjene vode. Sklepamo, da je bilo temu tako zaradi višje vsebnosti vode v vzorcu že pred sušenjem.

### 6.2.4 Vzorci po drugem mletju

Pri drugem mletju smo prav tako opazili, da les vrbe 1 in 2 zastaja v mlinu. Delci so se zaustavljali v rotorju mlina tekom mletja. Zaradi te ugotovitve smo mlin po mletju določenega vzorca vedno pregledali in očistili. Delce, ki so zastajali v mlinu in niso bili zmleti, smo še enkrat

zmleli. Kljub vsemu so se pri drugem mletju pojavljale izgube količine vzorcev zaradi omenjenih težav pri mletju.

**Tabela 9: Mase zmrznjenih vzorcev po drugem mletju.**

	<b>Sušenje 38 °C</b>	<b>Sušenje 105 °C</b>	<b>Liofilizacija vzorca</b>
<b>Vrba 1</b>	78 g	99 g	67, 1 g
<b>Vrba 2</b>	115,7 g	113 g	18,6 g
<b>Topol 1</b>	114,6 g	61,2 g	24,7 g
<b>Topol 2</b>	95 g	139 g	34, 3 g

Po zaključku drugega mletja vzorcev iz zmrzovalnika smo pridobili fino zmlete vzorce. Končna velikost vzorcev je 1–3 mm. Ugotovili smo, da so se pojavile izgube v smislu zastajanja delcev v rotorju mlina. Celotne količine vzorcev ni bilo možno obdržati.



**Slika 20: Mlin po mletju vzorca vrbe 1 (Foto: Šekoranja, 2013)**

### **6.3 Vzorca iz hladilnika**

Vzorci iz hladilnika smo prav tako razdelili na tri dele. En del je bil namenjen za sušenje na 38 °C, drugi del za sušenje na 105 °C, tretji del smo dali nazaj v hladilnik in smo ga nato samo zmleli (brez sušenja). Najprej je nastopilo 1. mletje. Mleli smo s 700 obrati rotorja. Dodajali smo manjše količine vzorcev, saj smo s tem poskušali preprečiti pregrevanje mlina in s tem upočasnjeno mletje. Po vsakem mletju smo mlin očistili.

Postopek po prvem mletju je enak kot pri zamrznjenih vzorcih.

### 6.3.1 Vzorci pred sušenjem

Natehtane mase vzorcev pred sušenjem:

Tabela 10: Mase vzorcev iz hladilnika pred sušenjem.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C	Vzorci v hladilniku
<b>Vrba 1</b>	103 g	108 g	109 g
<b>Vrba 2</b>	111 g	111 g	112 g
<b>Topol 1</b>	90 g	99 g	99 g
<b>Topol 2</b>	119 g	116 g	106 g

### 6.3.2 Vzorci po sušenju

Pri mletju vzorcev iz hladilnika smo prav tako ugotovili, da prihaja do izgub lesne biomase med procesom mletja. Mlin se je pregreval. Zaradi pregrevanja je bilo potrebno mlin večkrat ugasniti in ga sčistiti. Čiščenje je bilo potrebno okoli rotorja in v njem. Iz mlina se je sicer minimalno kadil prah.

Natehtane mase po sušenju:

Tabela 11: Mase vzorcev iz hladilnika po sušenju.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C
<b>Vrba 1</b>	91 g	93,3 g
<b>Vrba 2</b>	101 g	101 g
<b>Topol 1</b>	79 g	83,4 g
<b>Topol 2</b>	108 g	84,3 g

Iz rezultatov je razvidno, da so se mase vzorcev znižale. Po tem lahko sklepamo, da se je procent vode v vzorcih zmanjšal, kar je vplivalo na končno težo. Prav tako lahko opazimo, da so bile večje razlike v teži pri sušenju na višji temperaturi.

### 6.3.3 Delež vode

Delež vode, ki smo ga učinkovito odstranili iz vzorcev, izražen v %:

Tabela 12: Učinkovito odstranjena voda iz vzorcev iz hladilnika, izražena v %.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C
<b>Vrba 1</b>	11,7	13,6
<b>Vrba 2</b>	9,0	9,0
<b>Topol 1</b>	12,2	15,8
<b>Topol 2</b>	9,2	27,3

Pri vzorcih iz zamrzovalnika smo odstranili večje deleže vode iz lesne biomase kot pri zračno sušenih vzorcih, kar pomeni, da dajo zamrznjeni vzorci boljše izkoristke pri sušenju kot zračno sušeni vzorci. Pri topolu 2, ki se je sušil na 105 °C, smo opazili znaten preskok v izračunani količini odstranjene vode v primerjavi z drugimi vzorci. Sklepamo, da je temu tako zaradi višje vsebnosti vode v vzorcu že pred sušenjem.

### 6.3.4 Vzorci po drugem mletju

Po zaključku drugega mletja vzorcev iz hladilnika smo pridobili fino zmlete vzorce. Končna velikost vzorcev je 1–3 mm. Ugotovili smo, da se pojavljajo izgube v smislu zastajanja delcev v rotorju mlina. Kljub vsemu se pri drugem mletju pojavljajo izgube količine vzorcev zaradi omenjenih težav pri mletju.

Natehtane mase po drugem mletju:

Tabela 13: Mase vzorcev iz hladilnika po drugem mletju.

	Sušenje 38 °C	Sušenje 105 °C	Vzorci v hladilniku
<b>Vrba 1</b>	75 g	78 g	108,2 g
<b>Vrba 2</b>	93,6 g	100 g	111,6 g
<b>Topol 1</b>	68 g	82,6 g	97,7 g
<b>Topol 2</b>	101 g	83 g	104,1 g



## 7 RAZPRAVA S SKLEPI

V diplomski nalogi smo se osredotočili na optimizacijo predpriprave lesne biomase za namene nadaljnjih biorafinerijskih postopkov, med katerimi je bila izbrana hitra piroliza. Z optimizacijo smo želeli ugotoviti, kateri postopki obdelave lesne biomase nam dajo najbolj optimalne rezultate velikosti lesne biomase in redukcijo vlage v lesni biomasi. V diplomskem delu smo predstavili tudi različne vrste biomase in obdelave le-te, koncept biorafinerije, katere osnovna surovina je lesna biomasa, in dobljene rezultate.

V praktičnem delu smo mehansko obdelali lesno biomaso vrbe (*Salix tora*, *Salix inger*) in topola (*Populus monviso*, *Populus AF 2*), ki smo ju naprej pripravili (odstranitev listja in ostalih nečistoč) za nadaljnjo obdelavo. Nato smo jih razdelili na tri dele skladiščenja. En del je bil v hladilniku, drugi del v zmrzovalniku in tretji del zračno sušen. Vse smo najprej grobo zmleli. Po grobem mletju je sledilo sušenje vzorcev. Zračno sušene vzorce in vzorce iz hladilnika smo sušili na 38 °C in 105 °C, vzorce iz zmrzovalnika pa smo poleg teh dveh načinov sušili tudi s postopkom liofiliziranja. Najprej smo optimizirali postopek mehanske obdelave, kjer je bilo potrebno optimizirati način mletja lesnih sekancev. Želeli smo doseči čim manjšo velikost delcev lesne biomase in s tem zagotoviti hitrejše odstranjevanje vlage v procesu sušenja vzorcev. Pri drugem mletju pa smo želeli doseči končno velikost lesnih sekancev in s tem višji izkoristek ekstrakcije vodotopnih komponent lesne biomase.

Optimizacija postopka zračno sušenih lesnih sekancev pri mletju je temeljila na preizkušanju različnih hitrosti mletja pri vseh štirih vrstah lesne biomase (vrba in topol). Ugotovili smo, da se je rotor mlina pri večjih obratih hitreje ogrel. Pri višjih obratih mlina (posledično višje temperature) so se pojavile izgube vzorcev zaradi zastajanja delcev vzorca v situ mlina. Ti vzorci so bili za nadaljnje raziskave neuporabni, ker so visoke temperature povzročile strjevanje delcev med sabo. Pri drugem mletju ali finem mletju smo prav tako optimizirali različne hitrosti mletja pri lesni biomasi. Ugotovili smo, da pridobimo najbolj optimalne rezultate pri hitrosti obratov  $<1000 \text{ min}^{-1}$ . Pri teh vrednostih obratov se je mlin najmanj segreval in izgube vzorcev so bile majhne. Pri zračno sušenih vzorcih smo prav tako ugotovili, da se pojavljajo razlike med vrstami lesne biomase. Pri mletju lesne biomase topola se je mlin manj pregreval kot pri lesni biomasi vrbe. Vzorci lesne biomase vrbe so bolj zastajali v mlinu kot vzorci topola. Prav tako smo opazili razliko med vrbo 1 in vrbo 2. Vrba 1 se je boljše mlela kot vzorec vrba 2.

Pri optimizaciji postopka mletja vzorcev iz hladilnika smo ugotovili, da se mlin ne pregreva pogosto. Predvidevamo, da je temu tako, ker so temperature skladiščenja nižje in je pri tem vlaga v lesni biomasi blizu temperature ledišča. Vzorci lesne biomase topola so se boljše mleli kot vzorci lesne biomase vrbe. Ugotovili smo, da ima topol bolj čvrsto sestavo od vrbe. Pri optimizaciji postopka mletja vzorcev iz zamrzovalnika smo uporabili moč obratov na  $700 \text{ min}^{-1}$ . Ugotovili smo, da mlin ni veliko zastajal in se pregreval.

Optimizacija postopka sušenja vzorcev je potekala pod različnimi vrednostmi temperatur sušenja v konvekcijskem sušilniku in za zmrznjene vzorce tudi v liofilizatorju. Vzorce smo pri 105 °C sušili krajši čas, saj se je vlaga pri višjih temperaturah hitreje izločila iz lesa. Vzorce pod 38 °C smo morali sušiti dlje časa zaradi nizkih temperatur. Vzorci iz zamrzovalnika so bili v sušilniku najkrajši čas, zračno sušeni pa najdaljši čas. Z ekonomskega vidika je najbolj optimalna temperatura sušenja 105 °C, saj vzorce posušimo hitreje, pri tem pa ne porabljamo veliko več energije kot pri sušenju na 38 °C. Kvečjemu je postopek sušenja hitrejši in s tem učinkovitejši. Rezultati končnih vrednosti, ki smo jih pridobili pred in po sušenju ter po drugem mletju, nakazujejo na to, da se s sušenjem znižuje teža vzorcev, kar nakazuje na zniževanje količine vode v vzorcih. Izračunali smo tudi vrednosti (%) odstranjene vlage iz vzorcev in ugotovili, da je največ odstranjene vlage pri zamrznjenih vzorcih in najmanj pri vzorcih iz hladilnika. Za sušenje na 105 °C je potrebno več energije kot za sušenje na 38 °C, vendar še

vedno manj kot pa za uporabo liofilizatorja, ki je pri svojem delovanju najbolj potratna naprava. Glede primernosti uporabe tehnike sušenja za določen vzorec je potrebno najprej v celoti preučiti prednosti in slabosti vsake metode in se šele nato odločiti za metodo sušenja, ki jo bomo uporabili pri eksperimentiranju.

V liofilizatorju smo sušili samo en del vzorcev iz zamrzovalnika. Pri liofiliziranju smo ugotovili, da je to najučinkovitejši postopek za odstranjevanje vlage iz lesne biomase. Mase vzorcev so se najbolj zmanjšale pri liofiliziranju. Ta postopek sicer za svoje delovanje porabi največ energije, sušenje vzorcev je dolgotrajno in sam liofilizator je prostorsko omejen (sušenje manjše količine naenkrat). V praksi je metoda liofiliziranja uporabna za namene raziskovanja dražjih in dragocenejših produktov, kjer je poudarek na učinkovitejšem odstranjevanju vlage ne glede na končno porabo energije. Pred uporabo metode liofiliziranja je potrebno še enkrat preučiti vse slabosti in prednosti metode glede na razpoložljive delovne in finančne okvire raziskave, saj je ta metoda približno trikrat dražja od konvencionalne metode sušenja prav tako tudi počasnejša.

Po sušenju smo vse vzorce še fino zmleli (drugo mletje), da smo pridobili delce v velikosti  $< 2$  mm. Ta postopek je dolgotrajnejši od prvega mletja, saj se zaradi velikosti delcev vzorcev mlin hitreje pregreva. Prav tako so izgube mas vzorcev pri tem večje zaradi zastajanja vzorcev na vstopnem delu mlina in situ rotorja. Razlike v mletju so med vzorci minimalne. Kljub temu pa smo ugotovili, da so izgube najmanjše pri vzorcu topol 1 (sušen  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zračno sušen). Največje izgube so se pojavile pri vzorcu vrba 2 (sušena  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zračno sušena). Predvidevamo, da zato ker ima vrba kot drevesna vrsta več vlage in se zato hitreje lepi na stene rotorja.

Raziskave na področju hitrorastečih drevesnih vrst in njihove uporabnosti v postopkih pridobivanja lesne biomase segajo vse do šestdesetih let 20. stoletja, vendar same raziskave glede optimiziranja postopkov fizikalne predpriprave lesne biomase niso znane. Za podrobnejšo raziskavo tovrstnih postopkov je potrebna boljša opremljenost laboratorijev ter boljše finančno stanje.

## 8 VIRI IN LITERATURA

Aberšek, B. (1995). Tehnologija in obdelava gradiv. Radovljica, Didakta.

Agrobränsle. (2006). Angrobränsle Willow Varieties. Medmrežje: <http://pohjonen.org/veli/vpapps/2006-agrob-salix-varieties.pdf> (citirano: 1. 11. 2014)

Balatinecz, J. J., Kretschmann, D. E. (2001). Poplar Culture in North America. Poplar Council of Canada, Poplar Council of the United States.

Bianconi, D. (2010). Field-scale of rhizoremediation of a contaminated soil with hexachlorocyclohexane (HCH) isomers: the potential of poplars for environmental restoration and economical sustainability. Handbook of Phytoremediation. Nova Science Publishers. Medmrežje:

<http://www.ibaf.cnr.it/phyto/schede/P.%20GENEROSA%20x%20P.%20NIGRA%20clone%20Monviso%20-%20%20Exachlorocyclohexane.pdf>

Biomasa. (2014). Ministrstvo za gospodarske dejavnosti, Agencija RS za učinkovito rabo energije. Ljubljana. Medmrežje: <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL5-01.PDF> (citirano: 13. 9. 2014)

Biorefineries: Techno-economical and environmental evaluation of lignocellulosic biorefineries. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Medmrežje: <http://bpe.epfl.ch/page-34016-en.html> (citirano: 13. 9. 2014)

Butala, V., Turk, J. (1998). Lesna biomasa – neizkoriščen domači vir energije. FEMOPET Slovenija, Ljubljana.

Carbohydrates – Chemical Structure. Medmrežje: <http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohydrates2.html> (citirano: 28. 12. 2014)

Borrega, M., Nieminen, K., Sixta, H. (2011). Degradation kinetics of the main carbohydrates in birch wood during hot water extraction in a batch reactor at elevated temperatures. Bioresource Technology, 102, 10724–10732.

Clark, J. H., Deswarte, F. E. I. (2008). The Biorefinery Concept – An Integrated Approach. Green Chemistry Centre of Excellence, University of York, United Kingdom.

Clift Holland, S. Weeds of National Significance, Willow Identification: An essential skill for succesful willow management. Medmrežje: [http://www.weeds.org.au/WoNS/willows/docs/Willow\\_identification-Resource\\_Sheet2.pdf](http://www.weeds.org.au/WoNS/willows/docs/Willow_identification-Resource_Sheet2.pdf)

Čebul, T., Krajnc, N., Piškur, M. (2012). Lesna biomasa iz zunajgozdnih nasadov hitrorastočih vrst. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 97, str. 19–29.

Demirbas A. (2010). Biorefineries. For Biomass Upgrading Facilities. Springer-Verlag, London.

Energiepflanzen. Medmrežje: <http://www.energiepflanzen.com/it/energiepflanzen-miscanthus-pappel-weide-online-shop/pappeln-populus/> (citirano: 3. 11. 2014)

Fetterolf, D. M. (2010). Lyophilization. Journal of GXP Compliance; 14, 4; ProQuest Central, str. 52.

Geršak, M. Velušček, V. (2003). Sušenje lesa. Ljubljana, Lesarska založba.

Gravelsins, R. J. (1998). Studies of grinding of wood and bark-wood mixtures with the Szego mill. Graduate Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto.

Gorišek, Ž. (2004). Sušenje lesa, 1. del. Korak, 5, 1: 19.

Gosar, M. (2007). Vpliv kakovosti smrekovine na izkoristek osušenega žaganega lesa. Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, str. 51.

Humar, M. prof., dr. Odslužen les – še neizkoriščen vir surovin v Sloveniji. Gospodarska zbornica Dolenjske in Bele krajine. Medmrežje: <http://www.gzdbk.si/si/aktualno/uspeh/detajl/?id=1202> (citirano: 13. 9. 2014)

Kralj, M. (2011). Narod, ki najde svojo identiteto v gozdu. Dnevnik. Medmrežje: <http://www.dnevnik.si/slovenija/1042423050#> (citirano: 13. 9. 2014)

Krogell, J. Korotkova, E., Pranovich, A. in ostali. (2013). Intensification of hemicellulose hot-water extraction from spruce wood in a batch extractor – Effect of wood particle size. Bioresource Technology. str. 212–220.

Leban, I. Osnove lesarstva. Zgradba lesa. Srednja lesarska šola Škofja Loka.

Lesna biomasa. Medmrežje: [http://www.sef.si/uploads/JV/VZ/JVVZLMVwVhapAOoG\\_x0kqw/les.pdf](http://www.sef.si/uploads/JV/VZ/JVVZLMVwVhapAOoG_x0kqw/les.pdf) (citirano: 13. 9. 2014)

LignoWorks. What is Lignin? Medmrežje: <http://www.lignoworks.ca/content/what-lignin> (citirano: 28. 12. 2014)

Medmrežje 1: <http://hrovat.net/o-lesu/beljava/> (citirano: 16. 9. 2014)

Medmrežje 2: <http://www.izoliraj.me/celuloza/> (citirano: 16. 9. 2014)

Medmrežje 3: <http://pellets-wood.com/the-practical-value-of-hydrolytic-lignin-o7717.html> (citirano: 16. 9. 2014)

Medmrežje 4: [http://www.cz.all.biz/kukuricny-skrob-g8670#.VBmpJPI\\_uU4](http://www.cz.all.biz/kukuricny-skrob-g8670#.VBmpJPI_uU4) (citirano: 17. 9. 2014)

Medmrežje 5: <http://www.hammermills.com/size-reduction-product-categories-schutte-buffalo-hammermill/wood-grinders-1/fine-grinders/13-series-finish-grinding-wood-hammer-mill> (citirano: 22. 9. 2014)

Michaelides, E. E. (2012). Alternative Energy Sources. Springer-Verlag, Berlin.

Ministrstvo za kmetijstvo in okolje. Medmrežje: [http://www.mko.gov.si/si/delovna\\_podrocja/gozdarstvo/navodila\\_za\\_pravilno\\_kurjenje/nasveti\\_za\\_pripravo\\_drv/lesni\\_sekanci/](http://www.mko.gov.si/si/delovna_podrocja/gozdarstvo/navodila_za_pravilno_kurjenje/nasveti_za_pripravo_drv/lesni_sekanci/) (citirano: 22. 9. 2014)

Povh, B. (1998). Osnove liofilizacije. Vakuumist, letnik 18, številka 4, str. 11–13.

Retsch. Cutting Mill SM 300. Medmrežje: <http://www.retsch.com/products/milling/cutting-mills/sm-300/function-features/> (citirano: 14. 1. 2015)

SalixEnergi. Medmrežje: <http://www.salixenergi.se/sorter> (citirano: 1. 11. 2014)

Sannigrahi, P., Ragauskas, A. J., Tuskan, G. A. (2010). Poplar as feedstock for biofuels: A review of compositional characteristics. Society of Chemical Industry and John & Wiley Sons, Ltd.

Science Clarified. Medmrežje: <http://www.scienceclarified.com/Ca-Ch/Cellulose.html> (citirano: 28. 12. 2014)

Van, C. (2010). MyOrganicChemistry: Cellulose. Medmrežje: <https://myorganicchemistry.wikispaces.com/Cellulose> (citirano: 28. 12. 2014)

Vlažnost in vsebnost vode v lesu. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Medmrežje: [http://www.mkgp.gov.si/si/delovna\\_podrocja/gozdarstvo/navodila\\_za\\_pravilno\\_kurjenje/nasveti\\_za\\_pripravo\\_drv/vlaznost\\_in\\_vsebnost\\_vode\\_v\\_lesu/](http://www.mkgp.gov.si/si/delovna_podrocja/gozdarstvo/navodila_za_pravilno_kurjenje/nasveti_za_pripravo_drv/vlaznost_in_vsebnost_vode_v_lesu/) (citirano: 13. 3. 2015)

Zavod za gozdove Slovenije. Medmrežje: <http://www.zgs.si/slo/delovna-podrocja/lesna-biomasa/index.html> (citirano: 16. 9. 2014)

## PRILOGE

### Priloga 1: Spremljevalni list vzorca



Operacija delno financirana Evropska unija, in sicer iz Evropskega sklada za regionalni razvoj. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa krepitve regionalnih razvojnih potencialov za obdobje 2007-2013, razpisne skupine Konkurenčnost podjetij in raziskovalna odličnost, prednostne umeritve L1 Izboljšanje konkurenčnih sposobnosti podjetij in raziskovalna odličnost  
Izvajanje operacije "Razvojni center energije"  
št. pogodbe o sofinanciranju: RČSG/4301-16/2011-2011/2015-9895/9896-BE

## SPREMLJEVALNI LIST VZORCA

### 1. OZNAKA VZORCA:

#### 2. DATUM VZORČENJA:

2.1. *OPOMBE vzorčenja:*

--

#### 3. DATUM LABORATORIJSKE PRIPRAVE:

3.1. *OPOMBE laboratorijske priprave:*

--

#### 4. NOVO NASTALI VZORCI

4.1. *OPOMBE novo nastalih vzorcev:*

--

Datum:

Podpis: