



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Diplomsko delo

PIROLIZA LESNE BIOMASE

Januar 2016

Maja Preskar



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Maja Preskar

Piroliza lesne biomase

Diplomsko delo

Maribor, 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Piroliza lesne biomase

Diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa I. stopnje

Študent: Maja Preskar

Študijski program: univerzitetni študijski program I. stopnje Kemijska tehnologija

Predvideni strokovni naslov: diplomirana inženirka kemijske tehnologije (UN)

Mentor: izr. prof. dr. Darko Goričanec

Somentorica: asist. dr. Danijela Urbančl

Maribor, 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Številka: K1005703

Datum: 01.10.2015

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 44/2015)

izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Maja Preskar, študent-ka univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje KEMIJSKA TEHNOLOGIJA, lahko izdela diplomsko delo.

Mentor-ica:izr. prof. dr. Darko Goričanec

Somentor-ica: asist. dr. Danijela Urbančl

Naslov diplomskega dela:

PIROLIZA LESNE BIOMASE

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

PYROLYSIS OF WOOD BIOMASS

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo diplomskega dela« in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije do 30.09.2016 v referatu za študentske zadeve Fakultete za kemijo in kemijsko tehnologijo.

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

Obvestiti:

- kandidata -ko,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv



FAKULTETA ZA KEMIJO IN
KEMIJSKO TEHNOLOGIJO

DEKAN:

red. prof. dr. Zdravko Kravanja

Kazalo

Kazalo	I
Izjava.....	II
Zahvala	III
Povzetek.....	IV
Abstract.....	V
Seznam tabel.....	VI
Seznam slik.....	VII
Uporabljeni simboli in kratice	VIII
1 Uvod.....	1
2 Lesna biomasa	2
3 Piroliza	3
3.1 Tipi pirolize.....	4
3.2 Procesna shema torefikacije.....	7
4 Prednosti pirolize lesa	9
5 Analiza kurilnih sistemov s postopkom pirolize	11
5.1 Reaktorske tehnologije.....	11
5.1.1 Rotacijski boben	11
5.1.2 Vijačni reaktor	12
5.1.3 Peč z več toplotnimi viri oziroma Herreshoffova pečica.....	13
5.1.4 Torbed reaktor	14
5.1.5 Reaktor s premično plastjo	16
5.1.6 Tračni sušilnik	17
5.1.7 Mikrovalovni reaktor	18
5.2 Primerjava proizvodnje oglja in proizvodnje lesa.....	19
5.2.1 Vsebnost energije.....	19
5.2.2 Vlažnost	20
5.2.3 Gostota lesne biomase	20
5.2.4 Prihodki in stroški v podjetju.....	21
5.2.5 Obseg in stroški proizvodnje polen in toreficiranih peletov.....	22
5.2.6 Lastnosti goriv	26
5.3 Primerjava izgorevanja energentov v kotlu	27
5.3.1 Kotel Orlan Super	27
5.3.2 Dodatek h kotlu za kurjenje s peleti	29
5.3.3 Primerjava uporabe energentov	30
5.4 Vpliv izgorevanja toreficiranih peletov na okolje.....	35
6 Zaključek.....	37
7 Literatura	38
Izjava o istovetnosti tiskane in elektronske verzije	40

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelala sama, prispevki drugih so posebej označeni. Pregledala sem literaturo s področja diplomskega dela po naslednjih geslih:

Vir: ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com/>)

Gesla:	Število referenc
Pyrolysis of wood biomass	29
Torrefied biomass and charcoal	138
Torrefaction air pollution	137
Torrefaction technologies	683

Vir: COBISS/OPAC (<http://dkum.uni-mb.si/Iskanje.php/>)

Gesla:	Število referenc
Lesna biomasa	596
Piroliza	195
Charcoal production	7

Skupno število pregledanih člankov: 51

Skupno število pregledanih knjig: 5

Maribor, januar 2016

Maja Preskar

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Darku Goričancu in somentorici dr. Danijeli Urbancl za pomoč in vodenje pri izdelavi diplomskega dela. Velika zahvala gre moji mami, stari mami in tatiku, ki so mi omogočili študij, me podpirali, pomagali skozi vsa študijska leta in verjeli v moj uspeh. Zahvaljujem se tudi fantu Alenu, ki mi je med študijem v Mariboru vedno stal ob strani, mi pomagal, me spodbujal in spravljal v dobro voljo. Zahvaljujem se tudi vsem prijateljem, ki so bili ob meni ter me spodbujali pri študijskih obveznostih.

Piroliza lesne biomase

Povzetek

Cilj diplomskega dela je opisati in predstaviti proces pirolize lesa in se osredotočiti na proces pirolize, kjer se pridobi največ trdnega produkta – to je proces torefikacije lesa.

V prvem delu diplomskega dela je predstavljena lesna biomasa in pomen posameznih sestavnih delov v lesu. Predstavljen in opisan je postopek pirolize ter vsi tipi pirolize s prevladujočimi produkti in značilnostmi. Diplomsko delo je osredotočeno na počasno pirolizo, ki jo imenujemo torefikacija, ker pri tem postopku dobimo največ trdnega produkta.

Drugi del diplomske naloge zajema podrobne opise različnih tehnologij, uporabljenih pri postopku torefikacije lesne biomase, kjer dobimo kot produkt toreficirane pelete. Narejena je energetska primerjava energentov – lesa, toreficirane biomase, toreficiranih peletov in oglja. Primerjava vključuje energetske vrednosti in gostote pri značilni vrednosti vlage v materialu. Za primerjavo je bil izbran kotel na trdna goriva za ogrevanje poslovnega objekta. Kotel obratuje po principu pirolize lesa. Preračunana je primerjava porabe posameznih energentov ter ekonomska in energetska analiza, v smislu kurilnih vrednosti vseh energentov. Energenti, ki so bili izbrani za izgorevanje v kotlu na trdna goriva, so les, lesni peleti, toreficirani peleti in oglje.

Ključne besede: piroliza, biomasa, les, torefikacija, toreficirani peleti, oglje.

UDK: 66.092-97(043.2)

Pyrolysis of wood biomass

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to describe and introduce the process of pyrolysis of wood and focus on the process of pyrolysis, which is the one that produces the largest quantity of solid products – this is the process of wood torrefaction.

The first part of the thesis introduces wood biomass and the importance of individual wood components. The thesis presents the process of pyrolysis and all types of pyrolysis with their main products and characteristics. The thesis is focused on the slow pyrolysis, called torrefaction, because it is the process in which the largest number of solid products is produced.

The second part of the thesis involves detailed descriptions of various technologies, used in the process of wood biomass torrefaction, the product of which is torrefied pellets. I have made an energy comparison of energy products – wood, torrefied biomass, torrefied pellets and charcoal. The comparison includes energy values and densities at different moisture value in the material. The solid fuels boiler used to heat business premises has been chosen for the comparison. The boiler operates on the wood pyrolysis principle. The thesis includes use calculations of individual energy products, economic and energy analyses, within the meaning of heating value of all energy products. The energy products chosen for combustion in the solid fuels boilers are wood, wood pellets, torrefied pellets and charcoal.

Key words: pyrolysis, biomass, wood, torrefaction, torrefied pellets, charcoal.

UDK: 66.092-97(043.2)

Seznam tabel

Tabela 3-1: Tipi pirolize glede na pogoje in dane produkte [7].....	4
Tabela 3-2: Osnovne kemikalije, ki so produkti pirolize lesne biomase [7].....	6
Tabela 4-1: Raznolikost goriv [8]	10
Tabela 5-1: Prednosti in slabosti rotacijskega bobna [25]	12
Tabela 5-2: Prednosti in slabosti vijáčnega reaktorja [25].....	12
Tabela 5-3: Prednosti in slabosti peči z več toplotnimi viri [25]	13
Tabela 5-4: Prednosti in slabosti torbed reaktorja [25].....	15
Tabela 5-5: Prednosti in slabosti reaktorja s premično plastjo [25].....	17
Tabela 5-6: Prednosti in slabosti tračnega sušilnika [25]	17
Tabela 5-7: Prednosti in slabosti mikrovalovnega reaktorja [25]	18
Tabela 5-8: Letni stroški proizvodnje polen	22
Tabela 5-9: Ocena obratovalnih stroškov za pridelavo toreficiranih peletov [16, 28]	25
Tabela 5-10: Primerjava energentov [8, 15, 20, 21, 29]	26
Tabela 5-11: Karakteristike kotla Orlan 25 kW [19, 22]	29
Tabela 5-12: Cene dodatkov h kotlu za kurjenje s peleti [33]	29
Tabela 5-13: Izračuni analize uporabe bukovih drv [8, 20, 22, 28, 30].....	30
Tabela 5-14: Izračuni analize uporabe oglja [27, 21, 22, 30]	31
Tabela 5-15: Izračuni analize uporabe lesnih peletov [22, 30, 31, 32, 33]	32
Tabela 5-16: Izračuni analize uporabe toreficiranih peletov [2, 8, 15, 22, 33].....	33
Tabela 5-17: Rezultati analize [8, 10, 15, 20, 21, 22, 27, 28, 31, 32].....	34
Tabela 5-18: Kemijske sestave [4].....	36

Seznam slik

Slika 3-1: Peletiziran produkt pirolize lesne biomase – toreficirana biomasa [9].....	5
Slika 3-2: Shema torefikacijskega obrata [16].....	7
Slika 5-1: Rotacijski boben [8].....	11
Slika 5-2: Vijalni reaktor [8].....	12
Slika 5-3: Peč z več toplotnimi viri [8].....	14
Slika 5-4: Torbed reaktor [8].....	15
Slika 5-5: Reaktor s premično plastjo [16].....	16
Slika 5-6: Shema pridelave polen [13].....	23
Slika 5-7: Procesni diagram postopka od pridobivanja biomase do toreficiranih pelet [12]..	24
Slika 5-8: Masne bilance in kurilna vrednost surovine in produkta torefikacije [8, 29]	26
Slika 5-9: Kotel Orlan Super [19].....	27
Slika 5-10: Shema kotla Orlan [19].....	28
Slika 5-11: Dodatek h kotlu [34].....	29
Slika 5-12: Primerjava goriv, ki se uporabljajo v elektrarnah [24]	36

Uporabljeni simboli in kratice

Simboli

$C_{A,i}$	denarni tok v letu i (€)
d	relativna gostota (/)
I_0	naložba (€)
I	celotna investicija (€)
I_{OBR}	investicija v obratna sredstva (€)
I_{OS}	investicija v osnovna sredstva (€)
m_0	masa absolutno suhega lesa (kg)
m_w	masa svežega lesa (kg)
n	izbrano obdobje (a)
q_A	toplotne izgube na strani dimnih plinov (%)
q_S	sevalne površinske izgube kotla (%)
p	diskontna stopnja oz. obrestna mera (/)
u	vlažnost (%)
w	vsebnost vode (%)

Grški simboli

η_k	izkoristek kotla (%)
ρ	gostota (kg/m^3)
ρ_{ref}	gostota referenčne snovi (kg/m^3)
Φ_A	toplotne izgube zaradi dimnih plinov (W)
Φ_F	toplotni tok (W)
Φ_K	oddan koristni toplotni tok (W)
Φ_S	toplotne izgube zaradi sevanja površine kotla (W)

Kratice

LHV	spodnja kurilna vrednost
NSV	neto sedanja vrednost
TOP	toreficirani peleti

1 Uvod

Z izčrpavanjem fosilnih goriv in vse večjim zavedanjem o varstvu okolja je izraba energetskih virov biomase pritegnila povečevanje svetovnega interesa. Piroliza, kot ena od obetavnih termokemičnih pretvorbenih poti, igra ključno vlogo pri pretvorbi lesne biomase. Vendar je piroliza izredno kompleksen proces, saj skozi vrsto reakcij nanjo vpliva veliko dejavnikov.

Hemiceluloza, celuloza in lignin so tri glavne komponente lesne biomase in imajo vsaka svoj pomen. Potrebno je tudi omeniti, da poznamo več vrst pirolize, ki potekajo pri različnih pogojih, kjer nastane različna količina trdnega, tekočega in plinastega produkta.

Torefikacija je toplotna razgradnja biomase v energetsko bogat in homogen izdelek, koristen za nadaljnjo uporabo. Toreficirana biomasa postane odporna na vodo in na biorazgradnje. Zraven tega je pomembno, da je produkt krhek in drobljiv. Torefikacija se izvaja v inertnem okolju, običajno pri atmosferskih pogojih. Natančne značilnosti toreficiranega produkta so odvisne od vrste biomase, ki vstopa v proces in od procesnih pogojev. Pomembno je tudi, da je biomasa pred vstopom v izbrano tehnologijo pravilno pripravljena, saj mora imeti konstantno vsebnost vlage in ustrezno velike delce surovine.

Namen diplomskega dela je opisati celoten postopek pirolize lesa z največ trdnega produkta in predstaviti tehnologije, ki so razvite na tem področju. Cilj je opisati in primerjati kurilne vrednosti, spreminjanje gostote trdnih produktov pirolize ter postopke pridelave lesa in toreficiranih peletov. Predstavljen in opisan je kotel na trdna goriva, ki ga uporabimo za ogrevanje poslovnega objekta s površino 150 m² ter izbran ustrezen dodatek opreme v primeru uporabe izgorevanja peletov, opisana je ekonomska in energetska primerjava uporabe lesa, lesnih peletov, toreficiranih peletov ali oglja v izbranem kotlu.

2 Lesna biomasa

Biomasa, sonce (fotovoltaične sončne celice in sončni kolektorji toplote), veter (vetrnice), voda (hidroelektrarne, plimovanje) in geotermalni viri spadajo med obnovljive vire energije. Biomasa služi kot edini obnovljivi vir ogljika za proizvodnjo kemikalij, materialov in goriv. Problemi, ki so povezani z uporabo fosilnih goriv, zahtevajo prehod na obnovljive vire za proizvodnjo energije. Heterogenost in kompleksnost biomase še vedno nasprotujeta izkoriščanju njenega polnega potenciala.

Med biomaso prištevamo produkte, ki jih najdemo v naravi – les, trava, rastline in podobno. Lesno biomaso predstavlja predvsem naravni les. Med ostanke lesa v gozdu štejemo veje, krošnje, hlude in debla z manjšimi premeri ter les, ki ni primeren za predelavo v industriji. Ostanke nastanejo kot stranski produkt v naravi zaradi pogostega žaganja, priprave drv in hlovov ter sečenj. Kemično neobdelan les je tudi les iz sadovnjakov in vinogradov, uporabljen les in lesni izdelki. Les prištevamo med vire energije in ima mnogo prednosti pred ostalimi, saj je vedno na razpolago, ob pravilnem kurjenju ne povzroča veliko emisij, vzdrževanje gozdov je z njegovo uporabo izboljšano [6].

Procesi pirolize lesa temeljijo na čistih virih biomase in čistih lesnih odpadkih. Zaradi nižjih cen in boljše dostopnosti se zanimanje za odpadke in ostanke, ki služijo kot surovina za ta proces, povečuje. Pomembna je tudi kemijska sestava materiala biomase. Najbolj kritični deli v biomasi so alkaliske kovine, klor, žveplo, dušik, težke kovine in pepel, ki lahko ostanejo v gorivu tudi po postopku pirolize.

Biomasa je izraz za vse organske snovi, ki izhajajo iz rastlin, kjer je les glavni predstavnik. S kemijskega vidika so glavni sestavni deli lesa celuloza, hemiceluloza, lignin in ekstrakti. Prav tako so sestavni deli biomase anorganske snovi (pepel) z vsebnostjo manj kot 1 %. Pepel je sestavljen iz kalija, kalcija, natrija, silicija, fosforja in magnezija. Klor se nahaja v večjih koncentracijah v zeleni biomasi [5].

Celuloza predstavlja običajno od 45 % do 50 % suhega lesa. Molekule celuloze so v strukturi lesa urejene v vlakna, ki so sestavni del ogrodja celične stene biomase. Celulozne stene prepuščajo vodo z raztopljenimi snovmi, vgradnja lignina v celulozno celično steno pa povzroči olesenitev lesa, zmanjšuje prepustnost in poveča trdnost [3]. Sestava lignina v biomasi je med 17 % in 30 %. Lignin se uporablja kot glavno vezivo za kopičenje vlaknatih komponent v lesu. Vsebnost hemiceluloze je od 20 % do 40 %. Skupaj z ligninom hemiceluloza tvori matriko, kjer so vgrajene celulozne fibrile. Sestava komponent v lesu je odvisna od sorte dreves. Ekstrakti predstavljajo veliko število organskih in anorganskih spojin. Primeri organskih ekstraktov so terpeni (komponenta v smolah in eteričnih oljih), maščobe, voski, beljakovine, fenolne spojine, ogljikovodiki in sladkorji. Primeri anorganskih ekstraktov so vodotopne snovi, kot na primer natrijeve in kalijeve soli [7].

3 Piroliza

Piroliza lesne biomase se uporablja predvsem za energetska izrabo, saj lahko produkt nadomesti fosilna goriva, ki jih je vedno manj na voljo. Piroliza lesa zmanjšuje emisije ogljikovega dioksida v primerjavi z običajnim izgorevanjem lesa. Prav tako je tvorba spojin NO_x manjša, tudi emisije ogljikovega monoksida in ogljikovodikov so manjše, kar lahko štejem kot prednost pred običajnimi tehnologijami izgorevanja [4].

Piroliza je termična razgradnja organske snovi pod inertnimi pogoji ali pri omejenem dotoku zraka, kar vodi do sproščanja hlapnih snovi in tvorbe produkta. S pomočjo tega postopka lahko pretvarjamo odpadke v produkte z visoko kurilno vrednostjo. V praksi ni mogoče doseči ozračja popolnoma brez kisika, zato je kisik prisoten v vsakem sistemu pirolize in se zaradi tega vedno pojavi majhna količina oksidacije. Ker proces poteka v odsotnosti kisika ali v kontrolirani količini kisika, je potreben skrben reakcijski nadzor, hitro ogrevanje in hlajenje. Piroliza lesa se običajno začne pri 200 °C in traja do temperature 450°C oziroma 500 °C, kar je odvisno od vrste biomase. Ta postopek ima pomembno vlogo pri izgorevanju lesa in žagovine zaradi deležnega gorečega in žarečega izgorevanja, izhajanja hlapnih snovi in produkta oglja oziroma sproščanja toplotne energije [1].

Postopek pirolize se uporablja v kemični industriji za pridobivanje oglja, aktivnega oglja, metanola in drugih kemikalij iz lesa. Piroliza je značilna za razgradnjo odpadkov za proizvodnjo oglja, pirolizo olja ali sinteznega plina. Sintezni plin se lahko uporablja kot gorivo za proizvodnjo električne energije ali pare, lahko se tudi uporablja kot osnovna kemikalija v petrokemiji ali rafineriji. Drugi stranski proizvodi vključujejo tekočine (voda) in trdne ostanke (pepel ali oglje). Razmerje produktov je odvisno od obratovalnih pogojev, vrste pirolize in tehnologije, ki je uporabljena za proces. Pretvorba materiala poteka v zaporednih stopnjah: destilacija, endotermna in eksotermna piroliza, goreče izgorevanje ter počasno gorenje.

Prvi osnovni pojav, ki poteka med pirolizo lesa, je prehod toplote iz vira toplote, ki vodi k povečanju temperature v notranjosti goriva. Nato sledijo reakcije, ki vodijo do sproščanja hlapnih snovi in tvorbe trdnega produkta. Poteka tudi kondenzacija nekaterih hlapnih snovi v hladnejših delih goriva in nastajanje katrana. Zadnji pojav so avtokatalitične reakcije sekundarne pirolize zaradi interakcij.

Temperaturno gledano, je proces pirolize lesa sestavljen iz [1]:

- popolna odstranitev vlage pri okoli 160 °C,
- razgradnja hemiceluloze v temperaturnem območju 200 °C do 280 °C, kjer dobimo hlapne produkte, kot so ogljikov dioksid, ogljikov monoksid in kondenzirana para,
- od 280 °C do 500 °C poteka razgradnja celuloze in doseže višek pri okoli 320 °C, produkti so zopet večinoma hlapne sovi,
- pri temperaturah nad 320 °C se povečuje stopnja razgradnje lignina, kar tudi spremlja hitro povečanje vsebnosti ogljika in tvorba oglja.

3.1 Tipi pirolize

Reakcijski produkti pirolize so večinoma zgoščeni v tri skupine: plini, tekočine (bio-olje ali katran) in trden preostanek – oglje. Dejavniki, ki vplivajo na količino, lastnosti, sestavo in razmerje produktov, so stopnja pirolize in z njo temperatura, tlak in hitrost segrevanja. Pomembno vlogo imajo tudi določene lastnosti biomase, kot na primer kemična sestava, vsebnost pepela, velikost in oblika delcev, gostota materiala, vsebnost vlage, vrsta biomase ipd.

Glavne komponente v lesni biomasi – celuloza, hemiceluloza in lignin – reagirajo drugače pri različnih temperaturah, zato dobimo različne vrste produktov. Tabela 3-1 ponazarja glavne tehnologije pirolize pri okvirnih režimih in pogojih ter okvirne deleže glavnih produktov.

Tabela 3-1: Tipi pirolize glede na pogoje in dane produkte [7]

TIP PIROLIZE	POGOJI	Tekoči produkt	Trdni produkt	Plinasti produkt
Hitra	Temperatura v reaktorju: 500 °C Zelo visoke stopnje segrevanja: > 1000 °C/s Kratki zadrževalni čas vroče pare ~ 1 s	75 %	12 %	13 %
Srednja	Temperatura v reaktorju: 400–500 °C Stopnja segrevanja: 1– 1000 °C/s Zadrževalni čas vroče pare ~ 10 do 30 s	50 %	25 %	25 %
Počasna – torefikacija	Temperatura v reaktorju: ~ 290 °C Stopnja segrevanja do 1 °C/s Zadrževalni čas trdne snovi ~ 30 s	0–5 %	77 %	23 %
Počasna – karbonizacija	Temperatura v reaktorju: 400 do 500 °C Stopnja segrevanja do 1 °C/s Dolgi zadrževalni čas trdne snovi h-dnevi	30 %	33 %	35 %

Hitra in srednja piroliza sta tehnologiji toplotne pretvorbe, razviti za proizvodnjo tekočih produktov iz biomase. Tehnologija hitre pirolize je bila razvita za proizvodnjo bio-olja iz biomase. Tako imenovana piroliza olja se lahko uporabi za proizvodnjo toplote, električne energije in tudi za kemikalije. Za hitro pirolizo je značilno hitro segrevanje fino mlete in

suhe biomase (okoli 10 mas % vlage) do temperature okoli 500 °C, kar povzroči sprostitvev produktov zaradi termičnega razpada – bio-olje, zmes kondenziranih organskih spojin in voda. Nastanejo tudi znatne količine oglja in plinov [7].

Torefikacija je blaga toplotna obdelava, ki spreminja lignocelulozno (lesno) biomaso v trdni produkt z večjo energijsko gostoto, boljšo drobljivostjo in nižjo vsebnostjo vlage kot pri prvotni biomasi. S tem postopkom dobimo iz lesne biomase toreficirano biomaso oziroma bio-premog. Namen torefikacije je ustvariti boljše gorivo za proizvodnjo toplote in električne energije. Pri tem postopku imamo atmosfero z nizkimi koncentracijami kisika, tako da se vsa vlaga odstrani kot frakcija hlapnih snovi iz suhe biomase [15]. Pride do znatne izgube teže in relativno majhne izgube kalorične vrednosti, kurilna vrednost predelane biomase na enoto se poveča. Fizikalne in kemične lastnosti biomase lahko s procesom torefikacije spremenimo in približamo lastnostim premoga. Glavni namen je uporabiti toreficirano biomaso kot gorivo, predvsem kot pelete, s podobnimi možnostmi za drobljenje in hranjenje, kot jih ima premog. Sestava toreficirane biomase je različna od oglja, ki tudi zahteva večje temperature za pridobitev slednjega. Torefikacija poteka pri najnižji temperaturi pirolize – okoli 300 °C, zato toreficirana biomasa še vedno vsebuje lastnosti biomase in ni popolno termično razgrajena. Peletizirano toreficirano biomaso prikazuje slika 3-1.



Slika 3-1: Peletiziran produkt pirolize lesne biomase – toreficirana biomasa [9]

Na splošno je namen karbonizacije proizvodnja oglja in stranskih produktov, kot so lesni katrani in očetna kislina. Med procesom pridobivanja oglja visoke temperature povzročijo absorpcijo toplote, ki vodi do popolne razgradnje biomase, separacijo v hlapne pline, paro in trden preostanek – oglje. Preoblikovanje lesa v oglje je končano pri temperaturah od 400 °C do 500 °C. Na tej stopnji oglje še vedno vsebuje veliko količino katrana, ki se mora zmanjšati s pomočjo dodatnega ogrevanja, da dosežemo končno vsebnost ogljika, ki znaša okoli 80 %. Do razlike v kakovosti oglja pride predvsem zaradi strukture lesa, poroznosti in mehko-be, kar ima negativni posledici – slabo tlenje in nižjo energetska vrednost. Preveč zdrobljeno oglje, ki vsebuje premajhne kose, smatramo kot slabše, ker majhni kosi ne dopuščajo nemotene ga dotoka zraka in gorenje le-teh povzroča dušenje ognja. Oglje

najboljše kvalitete mora imeti vnetišče pri temperaturi 230 °C in temperaturo žerjavice 280 °C [11].

Produkti, ki jih pridobimo s pomočjo pirolize lesa in njihova uporaba na trgu, so opisani v tabeli 3-2.

Tabela 3-2: Osnovne kemikalije, ki so produkti pirolize lesne biomase [7]

Komponenta biomase	Produkti pirolize	Uporaba na trgu
Hemiceluloza	Ocetna kislina, furfural	Kis (hrana), čistila, vinil acetat, estri, topila, anhidrid ocetne kisline, sredstvo za preprečitev nastanka ledu na cestah, lepila, aroma za hrano
Celuloza	Levoglukoza, hidroksi acetaldehid	Glukoza, polimeri, antibiotiki
Lignin	2-metoksifenol, 2,6 – dimetoksifenol, katehol, fenol, metanol, alkil-fenol	Fine kemikalije, zdravila, arome, dišavna industrija, lepila, smole, topila, goriva, sredstva proti zamrznitvi
Celotna biomasa	Ekstrakti, oglje, olje, plini (CO, CO ₂ , CH ₄)	Fine kemikalije, farmacevtski izdelki, terpentini, goriva, sredstva za izboljšanje tal, aktivno oglje, metalurgija, tekoča goriva, surovine za kemikalije (organske kisline, fenolne spojine za gorivo)

Plini, ki izhajajo pri postopku pirolize, so večinoma CO₂, CO, CH₄, v manjšem deležu tudi H₂ in ostali ogljikovodiki. Delež tekočine je odvisen od količine toplote, ki je prisotna v procesu. Primarni hlapi (oksidanti) so povezani z reakcijsko temperaturo 400 °C do 500 °C, nato ogljikovodiki ali sekundarni katran pri temperaturah do 850 °C in aromati ali terciarni katrani pri temperaturah 850 °C do 1 000 °C. Tekoči produkti lahko vsebujejo tudi znaten delež vode, ki izvira iz vsebnosti vlage v trdnem gorivu in razgradnje reakcij [5].

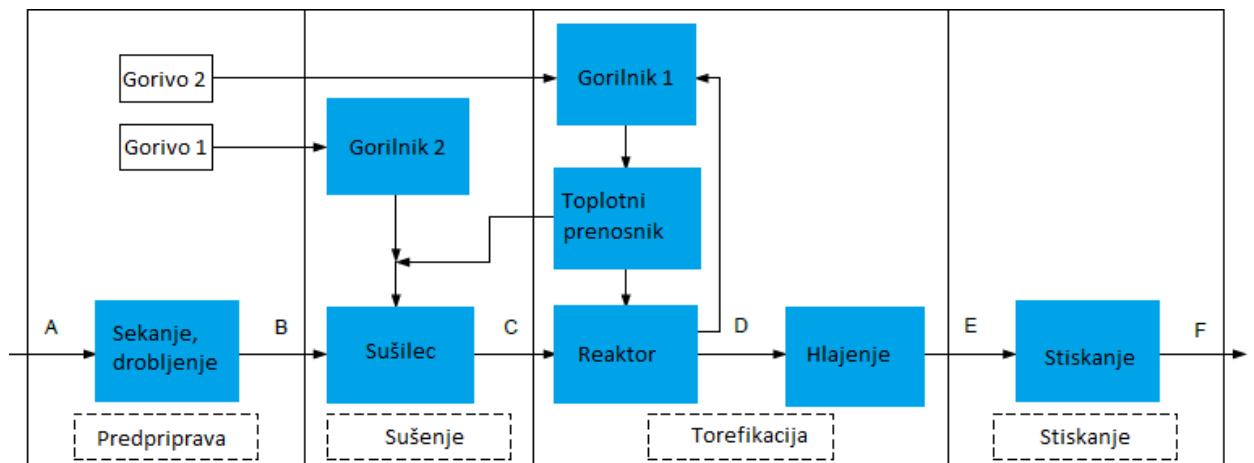
3.2 Procesna shema torefikacije

Lesna biomasa običajno vsebuje približno 80 % hlapnih snovi in 20 % vezanega ogljika glede na enoto suhega lesa [8]. Med postopkom torefikacije lesa poteka razčlenitev vlaknene strukture prvotnega materiala, ki vstopa v proces. Procesni pogoji se za vse reaktorje, ki so namenjeni za torefikacijo lesa, med seboj razlikujejo v zadrževalnem času in pretoku surovine, načinu prenosa toplote, velikosti vstopne biomase, velikosti reaktorja, mehanizmu reaktorja in investicijskih stroških.

Toplota, potrebna za postopek sušenja in torefikacije lesa, je lahko pridobljena na naslednje načine:

- obtok dimnih plinov za direktno ali indirektno ogrevanje procesa,
- obtok plina za procesno ogrevanje,
- obtok pare z neposredno ali posredno procesno toploto.

Osnovni procesi, ki se uporabljajo za pirolizo lesne biomase in temeljijo na prenosu toplote, so prikazani na sliki 3-2. Opisana shema torefikacijskega obrata se uporablja za proizvodnjo toreficiranih peletov v torbed reaktorju, ki temelji na učinkovitem prenosu toplote s kratkim bivalnim časom surovine. V proces vstopajo lesni sekanci z vsebnostjo vlage med 40 % in 50 %.



Slika 3-2: Shema torefikacijskega obrata [16]

V procesu torefikacije se značilnosti produkta razvijajo glede na fazo postopka (od A do F) [16]:

- A vstopna biomasa,
- B maksimalna velikost lesnih sekancev: 25 mm x 30 mm x 8 mm; vsebnost vlage lesnih sekancev je od 40 % do 50 %,
- C suhi lesni sekanci, vsebnost vlage lesnih sekancev je 10 %,
- D toreficirani lesni sekanci,
- E ohlajena toreficirana biomasa, primerna za stiskanje,
- F zgoščeni peleti ali briketi.

Suhi lesni sekanci vstopijo v reaktor za torefikacijo in se toreficirajo z vročimi plini, ki prehajajo skozi biomaso in zagotavljajo enakomerno razporeditev toplote. Toreficiran material izstopi na dnu reaktorske posode. Iz reaktorja toreficiran material prehaja preko hladilnega sistema v skladiščni silos. Pri procesu zgoščevanja material prehaja skozi kladivni mlin, kjer se zmelje na enako velikost, in nato v stiskalnico za peletiranje. Rezultat procesa so energijsko zgoščeni peleti, pripravljeni za skladiščenje in transport.

Na potrebo po toplotni energiji v torefikacijskem obratu vplivajo naslednji dejavniki:

- sušenje biomase in izhlapevanje vode,
- segrevanje biomase za proces torefikacije, kjer se energija pridobi med fazo hlajenja produkta,
- izguba toplote preko odvodnika,
- izguba toplote v okolico.

Plin, ki izstopa iz gorilnika, pred vstopom v sušilnik in torefakcijski reaktor, se ohlaja pri toku skozi več prenosnikov toplote. Prenosniki toplote so izbrani tako, da se lahko izbere vrsta operativnih pogojev (tok in temperatura) v reaktorjih. Pretok plinov se regulira z ventilatorji. Potrebna energija se proizvaja z dvema gorilnikoma na toreficiran plin in/ali zemeljski plin. Glavni vstopni plin je toreficiran plin, ki se proizvede pri torefikaciji. Zemeljski plin se uporablja kot podporno gorivo pri zagonu obrata in nadzira nihanja energetskega procesa. Nadzor energetskega procesa z zemeljskim plinom je veliko bolj odziven, kar pomeni bolj stabilen proizvodni proces v primerjavi s trdnim gorivom, če bi se uporabil kot podporno gorivo. Predvideno povečanje mase in energije v procesu je 78 % oziroma 90 % pri suhi surovini [16].

4 Prednosti pirolize lesa

Med procesom torefikacije se iz biomase odstranijo voda in odvečne hlapne snovi, biopolimeri pa delno razpadejo in pri tem oddajajo različne vrste hlapnih snovi. Končni produkt je preostali trden, suh in počrnel material, ki se imenuje toreficirana biomasa. Vstopna biomasa običajno izgubi od 20 % do 30 % mase in 10 % vsebovane energije, ki se porabi kot energent za ogrevanje torefikacijskega procesa. Ker toreficiran produkt že izgubi veliko količino hlapnih snovi med termokemičnim postopkom, jih ostane manj pri procesu izgorevanja. Možnost za rast glivic in mikrobov, ki povzročajo poslabšanje lastnosti materiala, je majhna glede na zelo suho toreficirano biomaso [15].

Potem ko je biomasa toreficirana, se jo lahko zgosti, običajno v brikete ali pelete ob uporabi standardne opreme, kar še nadalje poveča gostoto materiala. Pri postopku torefikacije dobimo toreficirano biomaso z gostoto 240 kg/m^3 in energijsko vrednostjo $18,75 \text{ MJ/kg}$, ki se nato peletizira in zgosti na gostoto 800 kg/m^3 , energijska vrednost pa se poveča na $21,7 \text{ MJ/kg}$ [29]. Poleg tega hidrofilne lastnosti biomase postanejo hidrofobne, kar omogoča preprosto skladiščenje, to pa pomeni večjo odpornost na biološko degradacijo, samovžig in fizično razpadanje. Pred procesom torefikacije je običajno potrebno biomaso posušiti tako, da vsebuje manj kot 20 % vlage. Hidrofobne lastnosti produkta naredijo gorivo manj občutljivo na razgradnjo (gnitje) in adsorpcijo vlage. Po postopku pirolize je adsorpcija vlage in vode zmanjšana v odvisnosti od stopnje pirolize.

Glavni cilj torefikacije je izboljšati surovo biomaso in izdelati izpopolnjeno trdno gorivo, s katerim je lažje ravnati, njegove gorljive lastnosti pa so podobne fosilnemu premogu, kar vodi do nižjih stroškov. Bistveno načelo je povečanje energijske gostote biomase (približno za 30 %), za kar je potrebno povečati razmerje med energijo in maso [15]. Posledično se poveča tudi kalorična vrednost biomase. Med procesom se struktura biomase spremeni, biomasa pridobi nove lastnosti, zaradi česar je s končnim produktom lažje ravnati in se lahko uporablja v obstoječih kotlih na premog.

Torefikacija poveča meljivost biomase zaradi spremembe njene molekularne strukture, kar reši probleme, ki nastanejo pri mletju neobdelane biomase v termoelektrarni. Po navadi so za bistvene izboljšave pri mletju potrebne precej visoke temperature torefikacije, $290 \text{ }^\circ\text{C}$ do $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Če je temperatura pri torefikaciji $300 \text{ }^\circ\text{C}$, se poraba energije pri mletju toreficiranih sekancev zmanjša za 10-krat v primerjavi z neobdelano biomaso [15].

Zgoščevanje proizvoda omogoča pretvorbo biomase v primeren nosilec energije v smislu prevoza, skladiščenja in ravnanja, zaradi enotne oblike in velikosti. Poleg peletiranja pa je z briketiranjem možna tudi izdelava večjih kosov zgoščenega goriva. Briketi so običajno valjasti kosi s premerom od 50 do 80 mm, medtem ko imajo peleti premer od 6 do 10 mm. Briketiranje se po navadi uporablja pri proizvodnji manjšega obsega, saj je zmogljivost stiskalnic od 1 do 3 ton na uro. Zmogljivost modernih obratov za izdelovanje peletov je 500 000 ton na leto, zmogljivost posameznih stiskalnic pa več kot 5 ton na uro [15].

Rezultati pirolize lesa kažejo visoko kakovost goriva, z značilnostmi, kot je prikazano v tabeli 4-1.

Tabela 4-1: Raznolikost goriv [8]

	Les	Lesni peleti	Toreficirani peleti	Oglje	Premog
Vsebnost vlage (mas %)	30–45	7–10	1–5	1–5	10–15
Spodnja kurilna vrednost – LHV (MJ/kg)	9–12	15–18	20–24	30–32	23–28
Hlapne snovi (vol %)	70–75	70–75	55–65	10–12	15–30
Ogljik (vol %)	20–25	20–25	28–35	85–87	50–55
Gostota (kg/L)	0,2–0,25	0,55–0,75	0,75–0,85	~ 0,2	0,8–0,85
Energijska gostota (GJ/m ³)	2–3	7,5–10,4	15–18,7	6–6,4	18,4–23,8
Prah	Povprečno	Omejeno	Omejeno	Visoko	Omejeno
Higroskopske lastnosti	Hidrofilen	Hidrofilni	Hidrofobni	Hidrofobni	Hidrofobni
Biološka razgradnja	Da	Da	Ne	Ne	Ne
Drobnost	Slaba	Slaba	Dobra	Dobra	Dobra
Ravnanje	Posebno	Posebno	Dobro	Dobro	Dobro
Kakovost	Visoka	Omejena	Omejena	Omejena	Omejena

Rezultat torefikacije so toreficirani peleti z visoko kakovostjo goriva, ki ima podobne lastnosti kot premog. Povečanje kalorične vrednosti povzroči odstranitev vlage in nekaterih organskih snovi iz prvotne biomase. Temeljna razlika med toreficiranimi peleti in ogljem je v hlapnih snoveh, ker je pri procesu torefikacije cilj ohraniti hlapne snovi.

Pomembno vlogo pri notranji vezavi v toreficiranem peletu ima lignin. Med procesom pirolize se lignin deloma razgradi, odvisno od procesnih pogojev. Za pripravo kompaktnega peleta je potrebna optimizacija procesnih pogojev med procesom pirolize kot tudi peletiranje toreficirane biomase pri povišani temperaturi ali uporabi visokih tlakov. Veziva, ki se uporabljajo za vezavo materiala v pelet, so glicerol, parafin, melasa (sladkorni sirup), lignin, bioplastika ali kondenzacijski produkti plina, ki nastanejo med procesom pirolize lesa. Tudi vbrizg vodne megle v toreficirano biomaso izboljša vezavo materiala [8].

5 Analiza kurilnih sistemov s postopkom pirolize

5.1 Reaktorske tehnologije

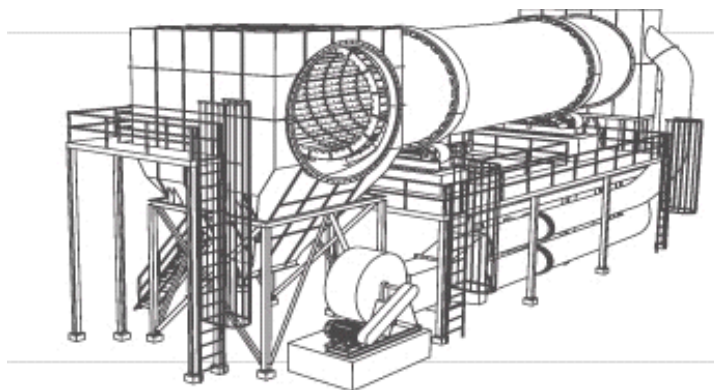
Najpomembnejši tehnični izzivi v razvoju pirolize lesa so povezani z ravnanjem in onesnaževanjem s procesnim plinom, s postopki, vezanimi na kakovost proizvodov, prenosom toplote skozi material in prilagodljivost pri uporabi različnih vhodnih surovin. Cilj je proizvesti hidrofobni material in ga pretvoriti v pelete ali brikete, ki se lahko obdelujejo in shranjujejo na prostem brez zaščite pred vremenskimi vplivi v primerjavi s premogom, ki ga moramo zaščititi pred vremenskimi vplivi.

Tehnologije, ki uporabljajo proces torefikacije za proizvodnjo toreficiranih peletov, so:

- rotacijski boben,
- vijačni reaktor,
- peč z več toplotnimi viri,
- torbed reaktor,
- reaktor s premično plastjo,
- tračni sušilnik,
- mikrovalovni reaktor,
- reaktor s fluidiziranim slojem.

5.1.1 Rotacijski boben

Rotacijski boben, ki je prikazan na sliki 5-1, je šaržni reaktor. Za potrebe torefikacije se lahko biomasa v reaktorju segreva direktno ali indirektno z uporabo segrete pare ali dima, kar povzroči vžig vnetljivih delcev. Proces torefikacije lahko nadzorujemo s spreminjanjem temperature pirolize, s spreminjanjem hitrosti vrtenja, dolžine in kota bobna. Rotacija bobna poskrbi, da se delci v reaktorju pravilno premešajo in dobro izmenjavo toplote, vendar pa trenje s steno poveča fino drobljenje materiala. Tabela 5-1 opisuje prednosti in slabosti rotacijskega bobna.



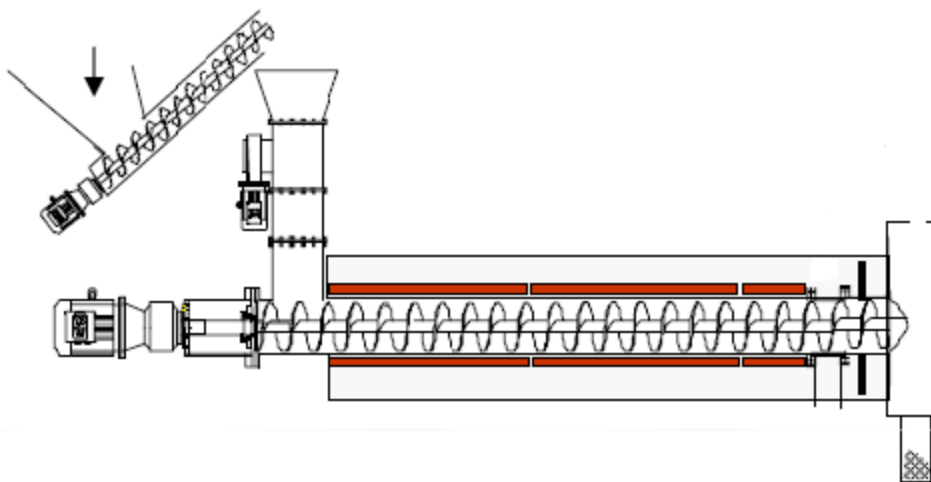
Slika 5-1: Rotacijski boben [8]

Tabela 5-1: Prednosti in slabosti rotacijskega bobna [25]

Rotacijski boben	Prednosti	Slabosti
Kapaciteta: 53 kt/leto	<ul style="list-style-type: none"> • različne metode za nadzor torefikacije procesa, kjer je zajeto posredno in neposredno ogrevanje, • enoten prenos toplote, • sposobnost sprejema velikega razpona velikosti delcev biomase, • preizkušena tehnologija za sušenje biomase. 	<ul style="list-style-type: none"> • slab nadzor temperature, • povečanje količine praha zaradi trenja med biomaso in steno bobna, • omejena sposobnost zmogljivosti (10–12 t/h vhodne biomase in 5 t/h toreficiranega izdelka), • visoki stroški.

5.1.2 Vijačni reaktor

Vijačni reaktor je vrsta šaržnega reaktorja, ki vsebuje enega ali več polžastih vijakov, ki se uporabljajo za transport biomase skozi reaktor. Ta reaktorska tehnologija se lahko uporablja v vertikalni in horizontalni obliki. Vijačni reaktor se pogosto segreva indirektno z uporabo medija, ki se nahaja v votli steni ali pa v votlem vijaku, vendar pa obstaja več načinov koncepta reaktorja, kjer se toplota dovaja direktno s pomočjo dvovijačnega sistema. Pomanjkljivost indirektno segretega vijačnega reaktorja je predvsem v formaciji saj na vročih predelih. Omejeno je tudi dovajanje toplote v vijačni reaktor zaradi omejenega mešanja biomase. Čas torefikacije v reaktorju je odvisen od dolžine in hitrosti vrtenja vijaka. Vijačni reaktor je relativno poceni, vendar pa je povečanje reaktorja omejeno zaradi poslabšanja razmerja med površino vijaka in volumnom reaktorja pri večjih reaktorjih. Obstajajo pa tudi reaktorji z visoko učinkovitim vrtenjem za izboljšavo toplotnega prenosa, kar omogoča veliko učinkovitost tudi večjih vijačnih reaktorjev. Na sliki 5-2 je prikazan vijačni tip reaktorja, v tabeli 5-2 pa so podane prednosti in slabosti tega reaktorja.



Slika 5-2: Vijačni reaktor [8]

Tabela 5-2: Prednosti in slabosti vijačnega reaktorja [25]

Vijačni reaktor	Prednosti	Slabosti
-----------------	-----------	----------

Kapaciteta: 21 kt/leto	<ul style="list-style-type: none"> • relativno poceni reaktor, • boljši pretok biomase, • sposobnost sprejema velikega razpona velikosti delcev biomase, • preizkušena tehnologija. 	<ul style="list-style-type: none"> • neenakomerna torefikacija biomase; ker se biomasa ob steni reaktorja bolj segreva, • slaba toplotna izmenjava, ker je omejeno mešanje biomase, • razmerje površine vijaka/volumna biomase je slabše pri vijakih večjega premera.
---------------------------	---	--

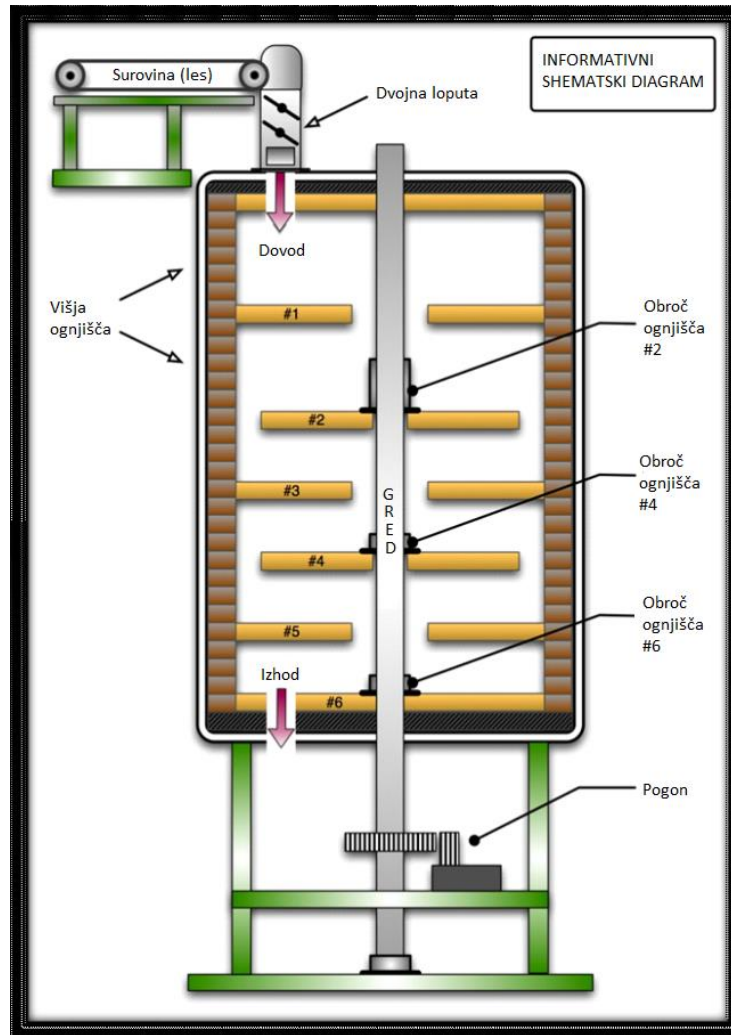
5.1.3 Peč z več toplotnimi viri oziroma Herreshoffova pečica

Ta šaržni reaktor je sestavljen iz več nivojev. Omogoča uporabo večjega razpona velikosti delcev od žagovine do večjih koščkov oziroma celo večjih vej. Na vsakem posameznem nivoju poteka posamezna faza torefikacije biomase. Skozi nivoje se temperatura postopoma viša, z 220 °C na 300 °C. Biomasa vstopa v sistem z zgornje strani reaktorja na horizontalni plošči, kjer se jo mehanično potiska v reaktor. V reaktor pade skozi odprtino na drugo ploščo, kjer se spet mehanično premika na zunanjo stran, kjer pade skozi odprtino v naslednji nivo. Proces se nadaljuje skozi več nivojev, kar omogoča dobro mešanje in postopno segrevanje. Toplota se neposredno dovaja v posamezne nivoje reaktorja s pomočjo notranjih gorilnikov na plin in dovodom pare. Na višjih nivojih reaktorja se biomasa najprej posuši, nato pa se toreficira na nižjih nivojih.

Gorilniki lahko uporabljajo zemeljski plin ali pa suspenzijske gorilnike za sežig lesnega prahu. Uporaba zemeljskega plina za pripravo vročega transportnega plina skozi reaktor prispeva h količini vlage v končnem produktu. Vendar to ni nujno negativna posledica, ker lahko vlaga izboljša mehansko obstojnost peletov po iztiskanju. Tipičen čas procesa znaša 30 minut z vrha do dna [8]. Prednosti in slabosti peči z več toplotni viri so podane v tabeli 5-3, na sliki 5-3 pa je opisana tehnologija, prikazana shematsko.

Tabela 5-3: Prednosti in slabosti peči z več toplotnimi viri [25]

Peč z več toplotnimi viri	Prednosti	Slabosti
Kapaciteta: 50 kt/leto	<ul style="list-style-type: none"> • dober prenos toplote, • sposobnost sprejema velikega razpona velikosti biomase, • dober nadzor temperature. 	<ul style="list-style-type: none"> • velika velikost reaktorja, • potrebo po toploti določa poraba plina, postopek odločanja je manj trajen, izgorevanje plina povzroča vlago, povzroča manjše zgorevanje dimnih plinov.



Slika 5-3: Peč z več toplotnimi viri [8]

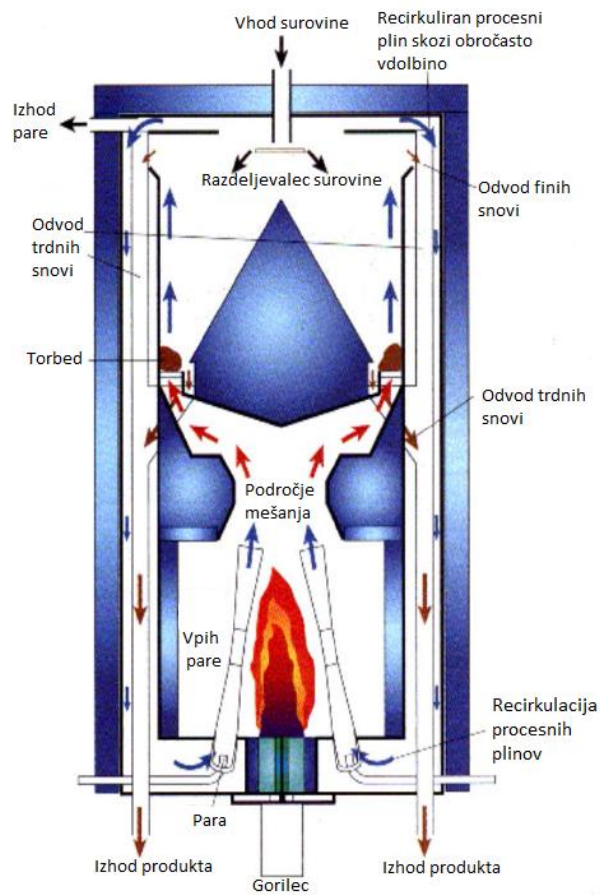
5.1.4 Torbed reaktor

Medij za prenos toplote, ki se uporablja pri torbed tehnologiji, se vpihuje iz dna reaktorja z visoko hitrostjo (od 50 m/s do 80 m/s) mimo stacionarnih, nagnjenih lopatic. To omogoča premikanje delcev biomase v reaktorju v vertikalni in horizontalni smeri, kar povzroča vrtince, ki zelo hitro segrejejo delce biomase na zunanjih stenah reaktorja. Relativno visok prenos toplote omogoča pirólizo z zelo kratkim bivalnim časom (približno 80 sekund), kar omogoča relativno majhno velikost reaktorjev. Intenzivni prenos toplote omogoča operacijo reaktorja na kontroliran način tudi pri zelo visokih temperaturah (do 380 °C), in sicer večjo izgubo vnetljivih delcev. To omogoča fleksibilnost tehnologije pri pripravi produkta za različne potrebe tržišč. Vendar pa je proces občutljiv na variacije v velikosti delcev v surovini. Slika 5-4 prikazuje shemo torbed reaktorja [8]. Reaktor s fluidiziranim slojem torbed ima kratek bivalni čas in je zelo učinkovit pri prenosu toplote. Vendar pa potrebuje delce precej majhne velikosti (žagovina), v nasprotju z reaktorji s potujočo plastjo, ki lahko sprejmejo lesne sekance običajne velikosti. To pomeni dodatne zahteve pri predobdelavi biomasnih goriv. Med procesom torefikacije se proizvedejo hlapne snovi (»torgas«). Toplotno energijo, potrebno za preosušenje in proces torefikacije, proizvede gorilnik na dvojno gorivo, ki uporablja »torgas« in zemeljski plin kot gorivo. Plin, ki izstopa iz gorilnika, pred vstopom v sušilnik in torefakcijske reaktorje se ohlaja v več izmenjevalnikih

toplote. Izmenjevalniki toplote so izbrani tako, da se lahko obratovalni pogoji v reaktorjih spreminjajo (tok in temperatura). Pretok plinov poteka preko ventilatorjev. V tabeli 5-4 so podane pozitivne in negativne lastnosti torbed reaktorja.

Tabela 5-4: Prednosti in slabosti torbed reaktorja [25]

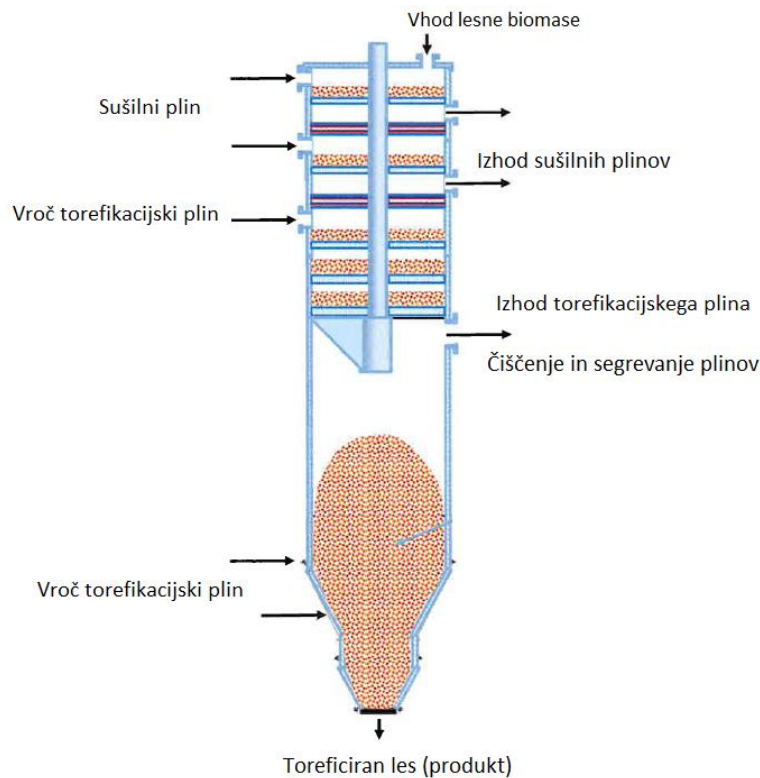
Torbed reaktor	Prednosti	Slabosti
Kapaciteta: 60 kt/leto	<ul style="list-style-type: none"> • kratki zadrževalni čas (< 100 s), • hiter prenos toplote, • velik pretok (zaradi kratkega zadrževalnega časa in hitrega prenosa toplote), • ni gibljivih delov v reaktorju, • sposobnost natančnega nadzorovanja izdelka, • nizka poraba energije. 	<ul style="list-style-type: none"> • omejena volumetrična kapaciteta, • visoka temperatura vodi do večje izgube hlapnih snovi, • nevarnost nastanka katrana zaradi relativno višjih izgub hlapnih snovi.



Slika 5-4: Torbed reaktor [8]

5.1.5 Reaktor s premično plastjo

Ta tehnologija šaržnega reaktorja je sestavljena iz zaprtega reaktorja, kjer biomasa vstopa z vrha, nato pa se postopoma premika navzdol, medtem ko se izvaja proces torefikacije kot posledica prenosa toplote s strani plinastega medija, ki vstopa s spodnje strani. Takšen reaktor ne vsebuje premikajočih delov. Na dnu reaktorja izstopa toreficiran material, kjer se nato zunaj reaktorja ohladi. Na vrhu reaktorja se odstranjujejo vnetljivi plinasti produkti reakcije. Zaradi odsotnosti mehanizma za mešanje delcev biomase nastopa problem prenosa toplote skozi reaktor po toplotnih kanalih, kar povzroči neenakomerno torefikacijo produkta na reaktorskem dnu. Stopnja napolnjenosti reaktorja je relativno visoka v primerjavi s torbed reaktorjem, ker lahko uporabljamo celoten volumen reaktorja v procesu. Padec tlaka skozi reaktor je relativno visok, predvsem pri toreficiranju relativno majhnih delcev biomase. Temu se lahko izognemo s sejanjem biomase, vendar pa se ne moremo izogniti formaciji manjših delcev v reaktorju samem, predvsem na dnu, kjer je tlak najvišji. Slika 5-5 prikazuje opisano tehnologijo reaktorja, v tabeli 5-5 pa so podane prednosti in slabosti reaktorja s premično plastjo.



Slika 5-5: Reaktor s premično plastjo [16]

Tabela 5-5: Prednosti in slabosti reaktorja s premično plastjo [25]

Reaktor s premično plastjo	Prednosti	Slabosti
Kapaciteta: 20 kt/leto	<ul style="list-style-type: none"> • relativno enostaven in poceni reaktor, • visok prenos toplote, • visoka zmogljivost reaktorja z velikim pretokom biomase, • ni gibljivih delov v reaktorju. 	<ul style="list-style-type: none"> • prisotnost prašnih delcev povzroči visoke padce tlaka, ki lahko povzročijo zaustavitev delovanja reaktorja, • omejena velikost in vrsta biomase zaradi padca tlaka, • neenotna porazdelitev temperature s posrednim ogrevanjem, • možnost nastanka kanala med delci lesne biomase, ki povzročijo neenakomerno torefikacijo, • težki nadzor temperature.

5.1.6 Tračni sušilnik

Tračni sušilnik je tehnologija za sušenje biomase. Med transportom biomase na premikajočem perforiranem traku se biomasa direktno segreva s pomočjo vročega plinastega medija. V reaktorju s tračnim sušilnikom se po navadi uporablja več trakov, nameščenih eden nad drugim. Medtem ko delci biomase padajo z enega traku na drugega, se dogaja mešanje delcev, kar se izkaže v bolj homogenem produktu. Čas torefikacije v reaktorju se lahko kontrolira s pomočjo nadzora hitrosti trakov. Pomanjkljivost reaktorja je v zamašitvi perforirane strukture trakov zaradi smol in majhnih delcev. Zaradi omejitve volumnskega pretoka je ta tehnologija manj primerna za biomaso z nizko gostoto. Možnost nadzora temperature v reaktorju je omejena, ker lahko proces nadzorujemo le z vstopno temperaturo plina in hitrostjo traku. Prednosti in slabosti tračnega sušilnika so podane v tabeli 5-6.

Tabela 5-6: Prednosti in slabosti tračnega sušilnika [25]

Tračni sušilnik	Prednosti	Slabosti
Kapaciteta: 41,5 kt/leto	<ul style="list-style-type: none"> • boljši nadzor temperature, • sposobnost, da sprejme širok razpon velikosti delcev biomase, • razmeroma nizki investicijski stroški, • enostaven nadzor zadrževalnega časa s hitrostjo traka, • preizkušena tehnologija iz industrije sušenja biomase. 	<ul style="list-style-type: none"> • perforacija traku se lahko zamaši s katranom in prahom, kar povzroči neenakomerno torefikacijo – izdelek ni homogen, • zmogljivost je odvisna od površine traka (drugi sistemi so odvisni od prostornine), • nadzor temperature, • sistem ima veliko mehanskih delov, kar povečuje stroške vzdrževanja.

5.1.7 Mikrovalovni reaktor

Alternativna opcija za torefikacijo biomase je uporaba mikrovalovne energije. Glavna ovira pri uporabi te tehnologije je potreba po uporabi električne energije, ki jo težko učinkovito pridobivamo iz plinov, ki nastajajo pri procesu torefikacije biomase. To negativno vpliva na energijsko učinkovitost in stroške obratovanja, ostale prednosti in slabosti mikrovalovnega reaktorja so podane v tabeli 5-7.

Tabela 5-7: Prednosti in slabosti mikrovalovnega reaktorja [25]

Mikrovalovni reaktor	Prednosti	Slabosti
Kapaciteta: 110 kt/leto	<ul style="list-style-type: none"> • prenos toplote temelji na sevanju namesto konvekcije in prevajanja toplote, • visok prenos toplote, • hitra torefikacija, • prenos toplote je manj odvisen od velikosti delca biomase, • dober nadzor temperature, • modularni. 	<ul style="list-style-type: none"> • dokazana tehnologija za sušenje ali torefikacijo biomase – učinek s hitrim segrevanjem biomase ni znan, • za proces potrebna električna energija, • ogrevanje notranjosti biomase neenotno z drugimi konvencionalnimi grelniki, • neenotno ogrevanje.

5.2 Primerjava proizvodnje oglja in proizvodnje lesa

Ta del diplomskega dela je osredotočen na energente, ki jih dobimo s postopkom torefikacije in karbonizacije. Prvi energent je lesna biomasa iz gozdov, ki se v postopku pirolize lesne biomase uporablja kot vstopna surovina. Drugi energent je produkt torefikacije, to je toreficirana biomasa. Tretji energent je prav tako produkt torefikacije in ga dobimo z dodatnim postopkom peletiziranja, to so toreficirani peleti. Produkt karbonizacije lesa je oglje, ki je uporabljen kot četrti energent. Primerjani so podatki o kurilni vrednosti vseh energentov in njihove gostote pri značilnem procentu vlažnosti goriva. Preučena je celotna proizvodnja, od podrtja drevesa do končnega produkta. Pri izračunih je uporabljena programska oprema Microsoft Office Excel.

5.2.1 Vsebnost energije

Ergent je snov, ki da koristno energijo direktno ali z ustrežno pretvorbo. Ima določeno energijo, katera se imenuje primarna energija. Med sekundarno energijo se prišteva energija, katera se dobi s pretvorbo iz primarne energije z upoštevanjem izgub pri pretvorbi. Končna energija označuje energijo, katero dobi uporabnik z upoštevanjem izgub pri prenosu toplote [20].

Izkoristek kotla je pomemben pri pretvorbi energije in je določen s preizkušanjem. Izkoristek kotla opisuje, kolikšen delež vložene primarne energije v obliki goriva se spremeni v končno energijo. Pri tem se primarna energija ne more povsem izrabiti, saj se določen del energije odvede v okolico z dimnimi plini, drugi del pa so sevalne površinske izgube kotla in mirovanje gorilnika. Enačba 6.1 prikazuje izračun izkoristka kotla [14].

$$\eta_k = \frac{\phi_K}{\phi_F} = \frac{\phi_F - \phi_A - \phi_S}{\phi_F} = 100 - q_A - q_S \quad (6.1)$$

Kjer je:

- η_k izkoristek kotla (%)
- ϕ_A toplotne izgube zaradi dimnih plinov (W)
- ϕ_F toplotni tok (W)
- ϕ_K oddan koristni toplotni tok (W)
- ϕ_S toplotne izgube zaradi sevanja površine kotla (W)
- q_A toplotne izgube na strani dimnih plinov (%)
- q_S sevalne površinske izgube kotla (%).

Energijska vrednost goriva opisuje količino energije, ki se sprosti med popolnim gorenjem enote mase goriva [20]. Če se vsebnost vode v gorivu poveča, se energijska vrednost zniža, ker se del energije, sproščene med procesom izgorevanja, porabi za izhlapevanje vode. Kurilnost opisuje količino toplote, ki se dobi z izgorevanjem lesa pri ohlajanju dimnih plinov do temperature rosišča vodne pare, ki je v dimnih plinih. Para je voda, ki se pri tem procesu sprošča, torej je odšteta toplotna energija, ki je obvezna za spremembo vode v paro [20].

5.2.2 Vlažnost

Delež vsebovane vode v lesu se navede kot delež mase vode glede na maso lesa v absolutno suhem stanju ali kot delež mase vode glede na maso vlažnega lesa [20]. Vlažnost, ki je pogosto izražena v odstotkih, je definirana kot delež mase vode v lesu glede na maso absolutno suhega lesa, kar prikazuje enačba 6.2:

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (6.2)$$

Kjer je:

- u vlažnost (%)
- m_w masa svežega lesa (kg)
- m_0 masa absolutno suhega lesa (kg).

Prav tako je vsebnost vode po navadi izražena v odstotkih in je definirana kot delež mase vode v lesu glede na maso vlažnega lesa. Ta mera se po navadi uporablja pri trženju lesnih goriv [20]. Enačba 6.3 prikazuje izračun vsebnosti vode:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100\% \quad (6.3)$$

Kjer je:

- w vsebnost vode (%).

5.2.3 Gostota lesne biomase

Gostota je kvocient med maso in volumnom ter je za lesna goriva opisana na različne načine. Relativna gostota je kvocient med gostoto lesa (tukaj se upoštevata masa pri absolutno suhem stanju lesa pri vlažnosti 0 % in volumen pri določeni vlažnosti) in gostoto referenčne snovi v specifičnih razmerah. Relativna gostota nima enote in bi se morala določati glede na gostoto vode pri temperaturi 4 °C [20]. Enačba 6.4 prikazuje izračun relativne gostote.

$$d = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (6.4)$$

Kjer je:

- d relativna gostota
- ρ gostota lesa (kg/m³)
- ρ_{ref} gostota referenčne snovi (kg/m³).

5.2.4 Prihodki in stroški v podjetju

Za praktično izvedbo zastavljenega projekta, je potrebno izvesti prvi korak ekonomske analize – ocena investicije. Podlaga za izvedbo je opredeliti osnovno ceno opreme in investicijskih sredstev. Po pripravi procesnega diagrama in izračunih snovnih ter energijskih bilanc je potrebno določiti vrsto procesne enote in njihovo velikost. Potrebno je tudi opredeliti obratovanje pri ekstremnih obratovalnih pogojih, saj je to tudi lahko vključeno v ceno in gradivo, iz katerega je narejena procesna enota. Denar, katerega vložimo za neki projekt proizvodnje, se deli na osnovna in obratna sredstva. Vir financiranja, ki se ga vloži v opremo, se imenuje osnovno sredstvo, za katerega je značilna omejena življenjska doba, kar pomeni, da se obrabijo in jih je potrebno po nekem času zamenjati. Med obratna sredstva se šteje vloženi denar za začasne stvari, ki se hitro porabijo in jih je potrebno dovajati [17].

Oceno celotne investicije dobimo s seštevkom osnovnih in obratnih sredstev, kar prikazuje enačba 6.5:

$$I = I_{OS} + I_{OBR} \quad (6.5)$$

Kjer je:

- I celotna investicija (€)
- I_{OS} investicija v osnovna sredstva (€)
- I_{OBR} investicija v obratna sredstva (€).

Obratovalni stroški predstavljajo stroške surovin in energije ter plačilo delavcem, ki konstantno nastajajo med proizvodnim procesom. Med obratovalne stroške se prištevajo stalni in spremenljivi stroški. Ločujejo se po tem, da stalni stroški niso odvisni od obsega proizvodnje (amortizacija, zavarovanje itd.), medtem ko se spremenljivi stroški spreminjajo z obsegom proizvodnje (stroški surovin, energije, transporta, pakiranja itd.) [17].

Od količine pridobljenih produktov v proizvodnji je odvisen strošek vzdrževanja, zaradi česar se lahko uvrščajo v kategorijo stalnih stroškov. V industrijskih obratih so stroški vzdrževanja precej visoki, saj lahko letno ta znesek ocenimo na okoli 6 % cene osnovnih sredstev na začetku. Tukaj gre polovica za materialne stroške vzdrževanja in druga polovica za stroške dela [17].

Med skupne obratovalne stroške se štejejo letni obratovalni stroški elektrike, vode (ali pare), stroški dela, stroški vzdrževanja in amortizacija [17].

Neto sedanja vrednost je odvisna od obdobja, za katerega se neto sedanja vrednost računa, od diskontne stopnje in denarnih tokov, za katere so ocenjeni stroški in dobički v določenem projektu. Denarni tokovi zajemajo denar, ki teče v (dobiček) ali iz (strošek) projekta, torej iz projekta tečejo investicije, popravila, plače, zavarovanje, v projekt pa prihaja denar, ki se dobi zaradi prodaje produktov. Interna stopnja donosnosti ali diskontna stopnja je kriterij, katerega se dobi tako, da neto sedanjo vrednost izenačimo z nič. Če je neto sedanja vrednost pozitivna, je projekt ekonomično upravičen, če je ta vrednost negativna, pa z ekonomskega vidika projekt povzroča dodatne stroške. V primeru, če je neto sedanja vrednost enaka nič, je projekt ekonomsko neupravičen [18]. Enačba 6.6 prikazuje izračun neto sedanje vrednosti:

$$NSV = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_{A,i}}{(1+p)^i} \quad (6.6)$$

Kjer je:

$C_{A,i}$ denarni tok v letu i (€)

I_0 naložba (€)

n izbrano obdobje (a)

NSV neto sedanja vrednost (€)

p diskontna stopnja oz. obrestna mera (/).

Diskontno stopnjo izračunamo po enačbi 6.7:

$$0 = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_{A,i}}{(1+p)^i} \quad (6.7)$$

5.2.5 Obseg in stroški proizvodnje polen in toreficiranih peletov

Pri proizvodnji polen direktno iz gozdov ločimo več pristopov za pridobitev končnega produkta. Najprej je potrebno drevesa podreti, nato sledi oblikovanje podrttega drevesa – odstranitev vej in krošnje dreves ter žaganje hlodov na določeno dolžino. Potem moramo les zbrati in dostaviti do odvozne poti, čemur sledi spravilo lesa (vožnja ali vlačenje lesa po gozdnih poteh) do skladišča. Sledi prevoz lesa in nato izdelava lesnih goriv s pomočjo žaganja, cepljenja, sekanja in mletja surovine. Med postopki pridobivanja polen ločimo dva načina delovnih sistemov; sistem kratkega in sistem dolgega lesa. Sistem kratkega lesa je metoda sečnje, kamor spada izdelava lesnih produktov v gozdu, opravljeno na mestu sečnje. Nato sledi transport lesne biomase do skladišča. Sistem dolgega lesa deluje na principu poseka drevesa, nato se celotno drevo spravi do gozdne ceste ali skladišča, kjer se nadaljuje celotna obdelava drevesa [20].

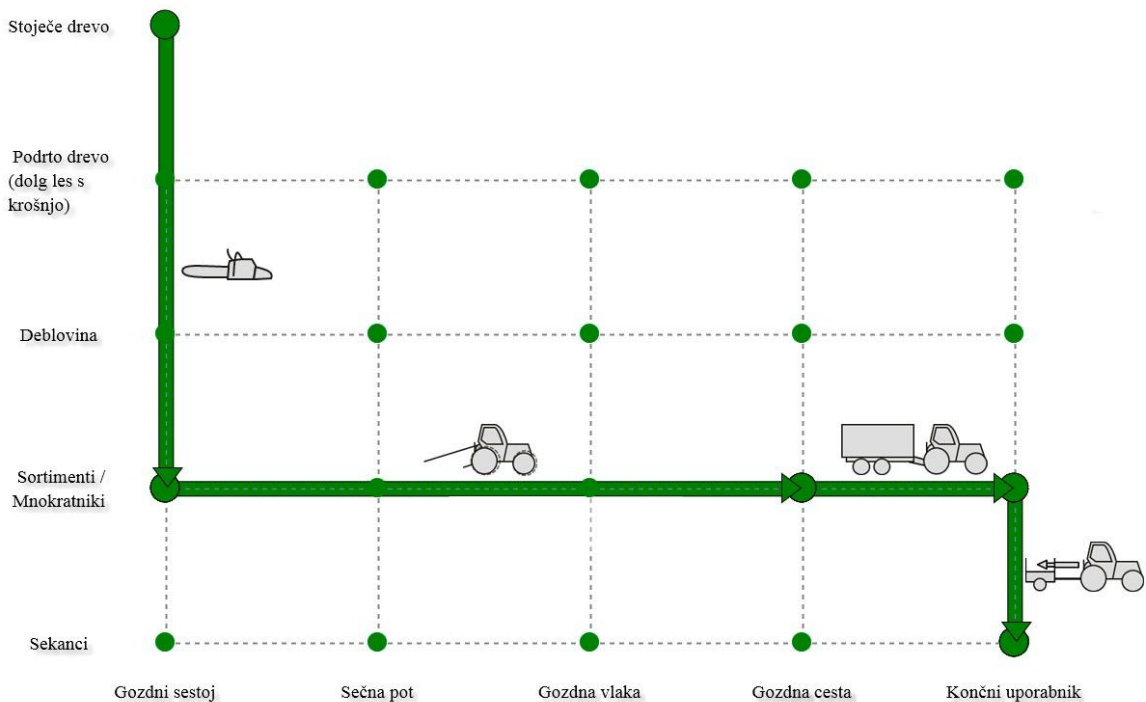
Tabela 5-8 prikazuje stroške proizvodne verige pri pridelavi polen. Delo se opravlja 300 dni v leto in 8 ur na dan. Zajeti so stroški celotne proizvodnje od podrtja drevesa do polen, skupno s sečnjo, spravilom lesa in s transportom biomase do končnega uporabnika [13]. Shema pridelave polena prikazuje slika 5-8.

Tabela 5-8: Letni stroški proizvodnje polen

	Obratovalni stroški [€/m ³]	Obratovalni stroški [€/leto]
Skupni stroški žaganja	12,6	44 400
Skupni stroški transporta	44,1	467 280
Skupni stroški proizvodne dejavnosti	56,7	511 680

Skupni stroški žaganja zajemajo motorne žage, potrebne za sečnjo in prežaganje, skupno s stroški cepilnika, ki služi za izdelavo polen. Med skupne transportne stroške se uvrščata

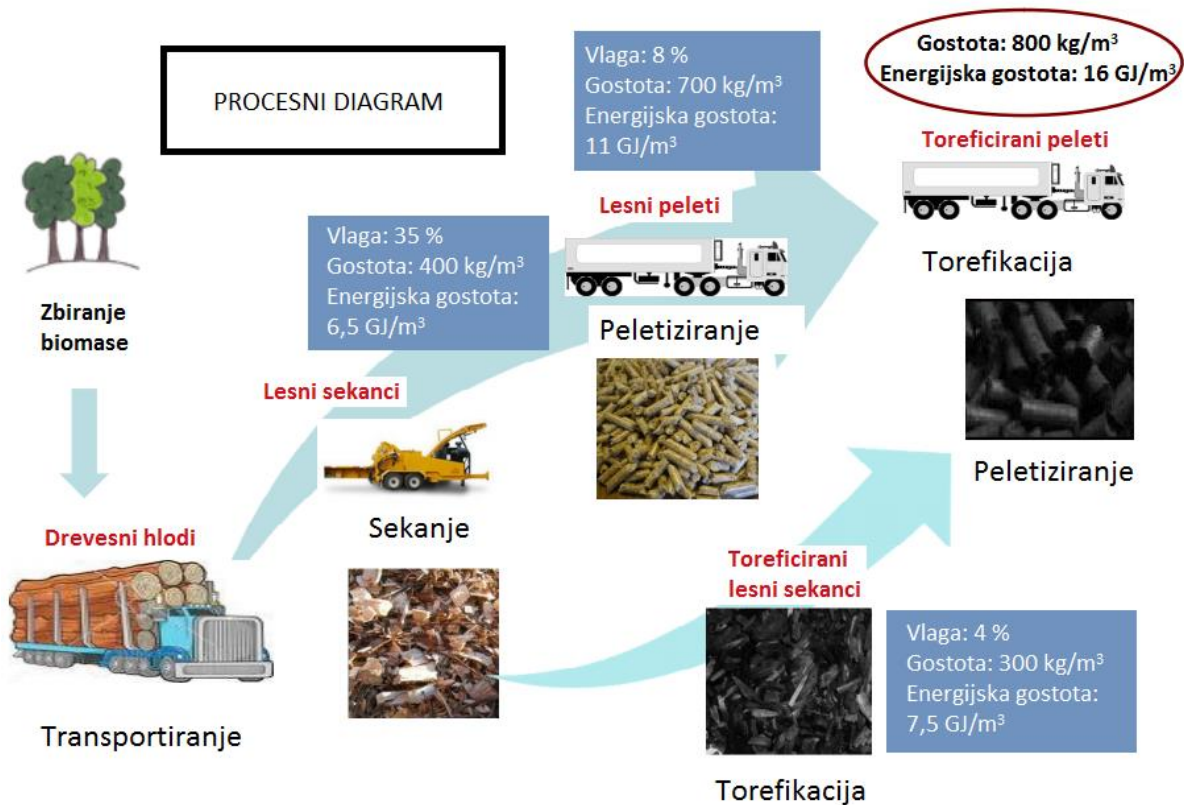
gozdarski in standardni traktor za spravilo in vleko dreves iz gozda ter transport in prevoz do nadaljnega oblikovanja lesa v polena. Na koncu sledi spravilo lesa do končnega uporabnika. Iz tabele 5-8 je razvidno, da so materialni stroški za pripravo m^3 lesa 56,7 €.



Slika 5-6: Shema pridelave polen [13]

Izbira sistema pridelave toreficiranih peletov mora biti v skladu z omejitvami v okviru projekta, še posebno če se pričakuje relativno kratka življenjska doba procesnih naprav, in tudi stroške dela. Pomembna je tudi pravilna izbira tehnologije za pridelavo produkta.

Ko iz peči dobimo produkt – toreficirane pelete, je pred nadaljnjim transportom najprej potrebno produkt osušiti z adsorpcijo kisika iz zraka, da ne pride do samovžiga. Slika 5-7 prikazuje procesni diagram pridobivanja končnega izdelka toreficiranih peletov, kjer se kot surovina uporabljajo lesni sekanci.



Slika 5-7: Procesni diagram postopka od pridobivanja biomase do toreficiranih pelet [12]

Uporabljena surovina v torefikacijskem procesu je bukov les, kjer so upoštevani proizvodni pogoji [16, 8]:

- proizvodna zmogljivost: 60 kt/leto,
- vsebnost vlage produkta: 5 %,
- kalorična vrednost produkta: 21,7 MJ/kg.

Torefikacijski obrat dela neprestano 7 dni v tednu in 24 ur na dan. Surovina, ki vstopa v proces, je bukov les s 40 % vlažnostjo. Cena surovine je 15 €/MWh [16].

Podatki iz masne in energijske bilance se uporabljajo za izračun operativnih stroškov, ki vključujejo stroške osebja, pomožna goriva (sušenje), električno energijo, potrošni material, vzdrževanje in ostale splošne stroške ter stroške zavarovanja. Letni stroški vzdrževanja opreme se izračunajo kot odstotek stroškov investicije. Ta odstotek se ocenjuje za vso opremo. Tudi drugi splošni in zavarovalni stroški se ocenjujejo kot odstotek investicije. Tabela 5-9 prikazuje oceno obratovalnih stroškov za pridelavo toreficirane biomase. Ocena letnih obratovalnih stroškov je upoštevana za torbed reaktor, ki ima zmogljivost 60 kt/leto.

Tabela 5-9: Ocena obratovalnih stroškov za pridelavo toreficiranih peletov [16, 28]

	Obratovalni stroški [€/m ³]	Obratovalni stroški [€/leto]
Investicija	19,75	1 481 250
Vzdrževanje	3,54	265 500
Električna energija	11,70	877 500
Potrošni material	3,17	237 750
Biomasa (bukov les)	69,44	5 208 000
Drugi stroški	0,94	70 500
Skupni stroški proizvodne dejavnosti	108,54	8 704 500

Investicijski stroški temeljijo na ponudbah prodajalcev opreme podobne zmogljivosti za naslednje podsisteme:

- sisteme za vzdrževanje biomase in ravnanje z njimi,
- sušenje,
- torefikacijo,
- termični oksidator za razgradnjo nevarnih plinov pri visoki temperaturi,
- kotlovni in vročevodni tokokrog,
- naprave za hlajenje.

Če primerjamo tabelo 5-8 in tabelo 5-9, ugotovimo, da pri proizvodnji polen ni potrebne investicije za postavitev objekta. Pri proizvodnji polen se kot investicija štejejo različne žage, cepilniki in traktorji za predelavo lesne biomase v polena, pri torefikacijskem obratu je potrebna naprava za sušenje biomase pred vstopom v proces, torefikacijski reaktor in na koncu naprava za peletiziranje toreficirane biomase. Če primerjamo stroške proizvodne verige za pripravo enega kubičnega metra produkta, je pri proizvodnji polen strošek 56,7 €/m³ in pri proizvodnji toreficiranih peletov 88,79 €/m³, brez upoštevanja stroškov investicije. Ker proizvodnja polen poteka v gozdu, ni potrebne električne energije, ki pa je nujno potrebna pri proizvodnji toreficiranih peletov. Torefikacijski obrat deluje 24 ur na dan, medtem ko je delo v gozdu omejeno na 8-urni delavnik. Obratovalni stroški na leto za pridelavo polen so nižji v primerjavi s stroškom za proizvodnjo toreficiranih peletov, ker je torefikacijski obrat bolj kompleksno zgrajen in potrebuje več energije kot pri proizvodnji polen. Predelava lesne biomase je pogoj za nadaljnji proces torefikacije, saj lesna biomasa vanj vstopa kot surovina.

5.2.6 Lastnosti goriv

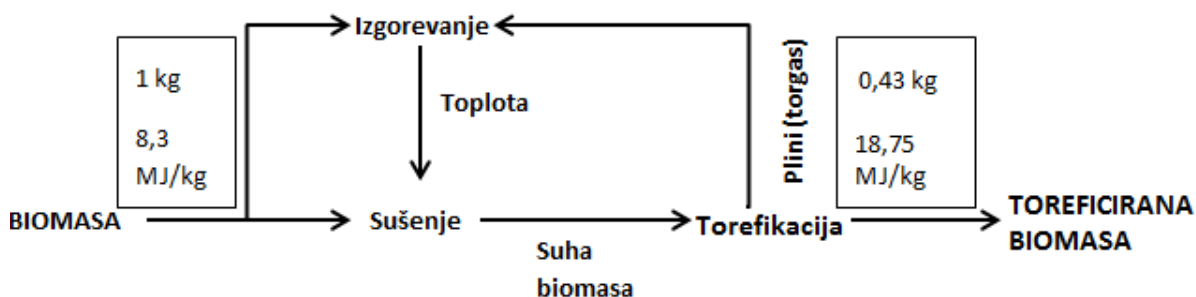
Tabela 5-10 prikazuje primerjavo energetske vrednosti polen, toreficirane biomase, toreficiranih peletov (TOP) in oglja.

Tabela 5-10: Primerjava energentov [8, 15, 20, 21, 29]

	Les (polena)	Toreficirana biomasa	TOP	Oglje
Drevesna vrsta	Bukev	Trdi les	Les listavcev	Trdi les
Vlažnost [%]	50	5	5	5
Gostota [kg/m^3]	720	240	800	200
Kurilna vrednost [MJ/kg]	8,3	18,75	21,7	30

V tabeli 5-10 so prikazane lastnosti posameznih energentov, kjer so za vse energente upoštevane listnate drevesne vrste. Vlažnost bukovega lesa je 50 %, kar je vrednost za les, ki ni bil sušen in je sveže posekan ter pripravljen za sušenje. Vlažnost toreficirane biomase, toreficiranih peletov in oglja je enaka in znaša 5 %. Po postopku torefikacije dobimo toreficirano biomaso, katero nato zgostimo v pelete, ki imajo največjo gostoto. Najmanjšo gostoto ima oglje, kot produkt karbonizacije, ki poteka pri najvišji temperaturi pirolize. Gostota energentov se razlikuje zaradi same obdelave. Med proizvodnjo toreficiranih peletov se uporablja postopek zgoščevanja, zato je gostota toreficiranih peletov največja. Največjo kurilno vrednost ima oglje, najmanjšo pa les. Kurilna vrednost toreficiranih peletov je manjša od kurilne vrednosti oglja, saj je za proizvodnjo oglja potrebna višja temperatura kot za toreficirano biomaso. Les vstopa v proces torefikacije in karbonizacije kot surovina, zato ima najmanjšo kurilno vrednost.

Koliko produkta pri procesu torefikacije dobimo iz lesa, je odvisno od vrste lesa (trdi ali mehki les), njegove začetne vlažnosti in obratovalnih pogojev, pri katerih izvajamo proces. Med obratovalne pogoje štejemo temperaturo in bivalni čas surovine v reaktorju. Energija hlapnih snovi, ki izhajajo med torefikacijo, se uporablja za odstranitev vlage v vstopni biomasi med procesom sušenja. Slika 5-8 kaže teoretične energetske bilance in shemo procesa ob predpostavki, da na vhodu 1 kg svežega lesa vsebuje 50 % vlage [8].



Slika 5-8: Masne bilance in kurilna vrednost surovine in produkta torefikacije [8, 29]

Iz slike 5-8 ugotovimo, da iz 1 kg vstopne biomase dobimo 0,43 kg produkta toreficirane biomase.

5.3 Primerjava izgorevanja energentov v kotlu

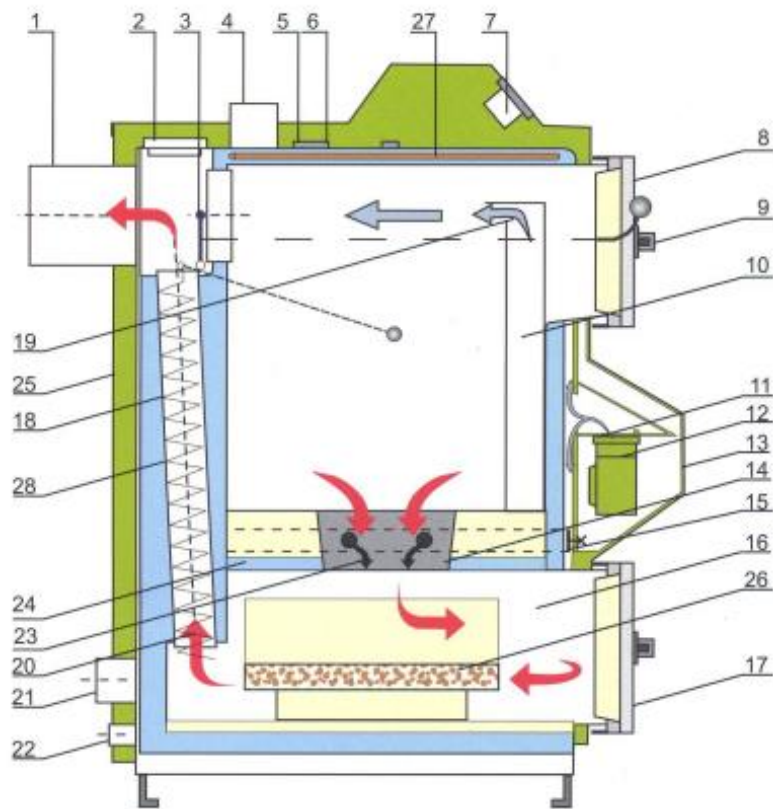
V tem poglavju je narejena primerjava možnosti uporabe lesa, toreficiranih peletov, lesnih peletov in oglja za proizvodnjo toplote. Izbran je bil kotel na trda goriva, ki deluje na principu uplinjanja biomase pri moči 25 kW, s katerim ogrevamo poslovni objekt. Primerjane so neto sedanje vrednosti investicije, poraba lesa in oglja na sezono (6 mesecev, 12 ur na dan) pri značilnih kurilnih vrednostih posameznih goriv.

5.3.1 Kotel Orlan Super

Kotel Orlan deluje po principu uplinjanja lesa in sledi uporabi obnovljivih virov energije za ogrevanje. Kot gorivo se uporabljajo trda goriva, najboljši izkoristek dobimo z uporabo lesne biomase z vlažnostjo do 20 %. Piroliza in izgorevanje lesa se vršita preko nadtlachnega ventilatorskega sistema in temperaturno vodene regulacije, kar povzroči optimalno delovanje, če imamo prisotno različno vlažnost in kurilnost biomase. Potek izgorevanja lesa nadzoruje elektronska regulacija v kotlu, glede na podatke senzorja po zahtevani temperaturi ogrevalnega medija. Če imamo prisotno optimalno izgorevanje, se dosega visok izkoristek, kar povzroča nizke emisije izpustov [19]. Slika 5-9 prikazuje kotel Orlan, na sliki 5-10 so prikazani sestavni deli kotla.



Slika 5-9: Kotel Orlan Super [19]



1	Dimnik	14	Primarne vpihvalne šobe
2	Čistilna vratca	15	Dovod sekundarnega zraka
3	Dimna loputa	16	Zgorevalna komora
4	Izток ogrevalne vode	17	Vratca izgorevalne komore
5	Termometer	18	Toplotni izmenjevalec
6	Varnostni termostat	19	Primarni zrak
7	Kotlovna regulacija	20	Izstop dimnih plinov
8	Nalagalna vratca kurišča	21	Povratek ogrevalne vode
9	Ročica za odpiranje vratc	22	Polnjenje ogrevalne vode
10	Zalogovnik	23	Sekundarne vpihvalne šobe
11	Zračna loputa	24	Vodni del kotla
12	Ventilator	25	Plašč kotla
13	Ohišje ventilatorja	26	Posoda za pepel

Slika 5-10: Shema kotla Orlan [19]

Karakteristike kotla Orlan so podane v tabeli 5-11.

Tabela 5-11: Karakteristike kotla Orlan 25 kW [19, 22]

Kotel Orlan Super

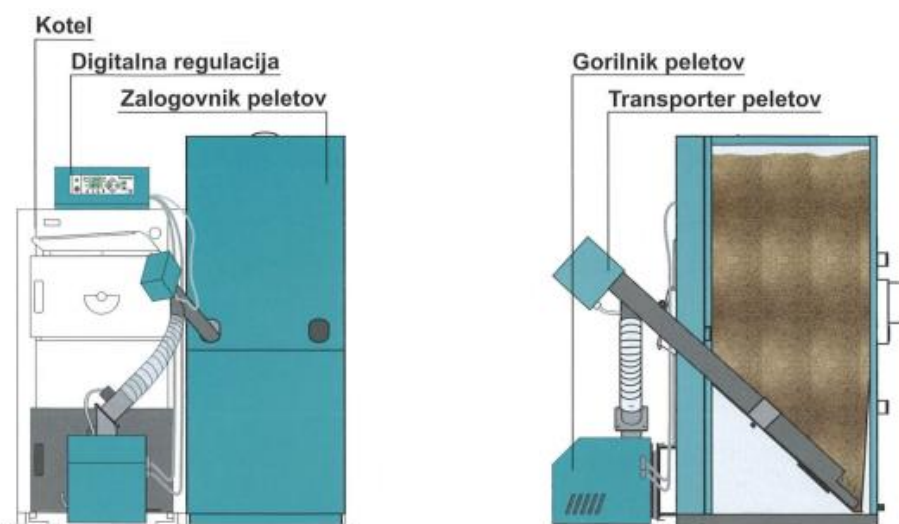
Toplotni tok kotla	25 kW
Velikost	988,416 dm ³
Teža	525 kg
Izkoristek kotla	91 %
Cena kotla	1 522,6 €
Gorivo	Trda goriva

5.3.2 Dodatek h kotlu za kurjenje s peleti

Ker je kotel Orlan Super kotel na trdna goriva, je mogoče kurjenje z lesnimi ali s toreficiranimi peleti. V tem primeru je potrebno kotlu dodati zalogovnik peletov, transporter peletov in gorilnik peletov z regulacijo.

Zalogovnik peletov se nahaja na desni ali levi strani peči. Transporter peletov poteka od rezervoarja do gorilnika in je sestavljen iz cevi, v kateri je »Arhimedova« spirala, ki s pomočjo elektromotorja z reduktorjem prenese pelete iz rezervoarja, preko cevi, v gorilnik peletov. V gorilniku peletov se nahaja ventilator, ki s pomočjo posebno oblikovane rešetke gorilnika oblikuje plamen kot pri klasičnih gorilnikih. Sestavljen je tudi iz elektroglrelca, ki omogoča avtomatsko doziranje peletov v gorilec s pomočjo avtomatizacije. Posebna oblika zgorevalne komore omogoča kakovostno mešanje zraka in goriva, kar povzroča izgorevanje z visokim izkoristkom. Digitalna kotlovska regulacija omogoča določitev temperature ogrevanja [35].

Slika 5-11 prikazuje opisane dodatke h kotlu, tabela 5-12 pa prikazuje cene.



Slika 5-11: Dodatek h kotlu [34]

Tabela 5-12: Cene dodatkov h kotlu za kurjenje s peleti [33]

Dodatek	Cena
Zalogovnik peletov	235,85 €
Transporter peletov	132,73 €
Gorilnik z regulacijo	625,05 €

5.3.3 Primerjava uporabe energentov

5.3.3.1 Izračuni primerjave energentov

Tabele 5-13 do 5-16 prikazujejo izračune ekonomske analize investicije 25 kW kotla Orlan za ogrevanje poslovnega objekta s površino 150 m² za uporabo posameznih energentov.

Tabela 5-13: Izračuni analize uporabe bukovih drv [8, 20, 22, 28, 30]

POLENA (bukova drva)

Kotel Orlan	25	kW peč
Izkoristek kotla	91	%
Začetna naložba (investicija)	1 522,60	€
Gostota bukovih drv	720	kg/m ³
Cena biomase (bukova drva)	69,44	€/m ³
Cena biomase (bukova drva)	0,096	€/kg
Kurilnost bukovega lesa	1660	kWh/m ³
Kurilnost bukovega lesa	2,31	kWh/kg
Poraba energenta	15,00	m ³
Toplotni tok lesa	24 900	kWh
Cena lesa na sezono	1041,6	€
Cena končne energije	0,0418	€/kWh
Cena končne energije na sezono	2258,89	€/sezono
Denarni tok (1 leto)	1 217,29	€
Denarni tok (10 let)	12 172,9	€
Diskontna stopnja	7	%
Neto sedanja vrednost	9 904,33	€

Začetna investicija zajema začetno naložbo 25 kW kotla Orlan. Poraba bukovega lesa je predvidena za poslovni objekt s površino 150 m². Toplotni tok lesa je določen kot zmnožek kurilnosti biomase in porabe biomase. Produkt cene biomase in porabe energenta da ceno lesa na kurilno sezono. Kvocient cene biomase in kurilnosti biomase predstavlja ceno končne energije. Kurilna sezona je v obsegu 6 mesecev oz. 180 dni. Denarni tok je predstavljen kot razlika med ceno končne energije na sezono kurjenja in ceno biomase na sezono. Denarni tok za obdobje 10 let predstavlja življenjsko dobo kotla. Vrednost diskontne stopnje je bila izbrana. Neto sedanja vrednost je bila izračunana za življenjsko dobo kotla.

Tabela 5-14: Izračuni analize uporabe oglja [27, 21, 22, 30]

OGLJE

Kotel Orlan	25	kW peč
Izkoristek kotla	91	%
Začetna naložba (investicija)	1 522,60	€
Gostota oglja	200	kg/m ³
Cena oglja	120	€/m ³
Cena oglja	0,6	€/kg
Kurilnost oglja	2083,33	kWh/m ³
Kurilnost oglja	10,42	kWh/kg
Poraba energenta	11,95	m ³
Toplotni tok oglja	24 900	kWh
Cena oglja na sezono	1 434,24	€
Cena končne energije	0,0576	€/kWh
Cena končne energije na sezono	3 110,4	€/sezono
Denarni tok (1 leto)	1 676,16	€
Denarni tok (10 let)	16 761,60	€
Diskontna stopnja	7	%
Neto sedanja vrednost	14 211,84	€

Tabela 5-14 prikazuje izračune analize uporabe oglja kot energenta za ogrevanje poslovnega objekta s površino 150 m². Uporabljen je enak postopek izračunov kot pri izračunih za bukova drva.

Tabela 5-15: Izračuni analize uporabe lesnih peletov [22, 30, 31, 32, 33]

LESNI PELETI

Kotel Orlan	25	kW peč
Izkoristek kotla	91	%
Začetna naložba (investicija)	2 516,23	€
Gostota lesnih peletov	650	kg/m ³
Cena lesnih peletov	139,52	€/m ³
Cena lesnih peletov	0,215	€/kg
Kurilnost lesnih peletov	3077	kWh/m ³
Kurilnost lesnih peletov	4,73	kWh/kg
Poraba energenta	8,07	m ³
Toplotni tok lesnih peletov	24 900	kWh
Cena lesnih peletov na sezono	1 129,04	€
Cena končne energije	0,0453	€/kWh
Cena končne energije na sezono	2 448,51	€/sezono
Denarni tok (1 leto)	1 319,48	€
Denarni tok (10 let)	13 194,80	€
Diskontna stopnja	7	%
Neto sedanja vrednost	9 869,94	€

Tabela 5-15 prikazuje izračune analize uporabe lesnih peletov kot energenta za ogrevanje s 25 kW pečjo za poslovni objekt s površino 150 m². Začetna naložba zajema ceno kotla Orlan in dodatek za doziranje peletov, to so gorilnik za pelete z regulacijo, transporter za pelete in zalogovnik peletov. Postopek izračunov v tem delu je takšen kot pri izračunih gorenja biomase.

Tabela 5-16: Izračuni analize uporabe toreficiranih peletov [2, 8, 15, 22, 33]

TOREFICIRANI PELETI

Kotel Orlan	25	kW peč
Izkoristek kotla	91	%
Začetna naložba (investicija)	2 516,23	€
Gostota toreficiranih peletov	800	kg/m ³
Cena toreficiranih peletov	185,78	€/m ³
Cena toreficiranih peletov	0,232	€/kg
Kurilnost toreficiranih peletov	4 822,22	kWh/m ³
Kurilnost toreficiranih peletov	6,03	kWh/kg
Poraba energenta	5,16	m ³
Toplotni tok toreficiranih peletov	24 900	kWh
Cena toreficiranih peletov na sezono	959,29	€
Cena končne energije	0,0385	€/kWh
Cena končne energije na sezono	2 080,39	€/sezono
Denarni tok (1 leto)	1 121,10	€
Denarni tok (10 let)	11 211,0	€
Diskontna stopnja	7	%
Neto sedanja vrednost	8 007,75	€

Tabela 5-16 prikazuje izračune analize uporabe energenta toreficiranih peletov za ogrevanje poslovnega objekta s površino 150 m². V tem primeru začetna naložba prav tako zajema ceno kotla Orlan in dodatek za doziranje peletov. Postopek izračunov v tem delu je takšen kot pri izračunih gorenja biomase.

5.3.3.2 Rezultati analize

Tabela 5-17 prikazuje rezultate ekonomske analize investicije 25 kW kotla za ogrevanje poslovnega objekta s površino 150 m².

Začetna naložba je zajemala ceno kotla na trda goriva v primeru uporabe polen in oglja, v primeru uporabe toreficiranih in lesnih peletov pa ceno kotla z dodatkom za doziranje peletov, gorilnik za pelete z regulacijo, transporter za pelete in zalogovnik peletov. Poraba lesa je predvidena, medtem ko je poraba oglja in toreficiranih peletov določena glede na isti toplotni tok kot pri lesu. Cena energenta na sezono je preračunana na sezono ogrevanja, to je 6 mesecev, 12 ur na dan. Delovanje kotla je predvideno za obdobje desetih let. Iz tega je bila izračunana diskontna stopnja in neto sedanja vrednost v obdobju desetih let istega denarnega toka.

Tabela 5-17: Rezultati analize [8, 10, 15, 20, 21, 22, 27, 28, 31, 32]

	Polena	Lesni peleti	Toreficirani peleti	Oglje
Začetna naložba [€]	1 522,6	2 516,23	2 516,23	1 522,6
Cena energenta [€/m ³]	69,44	139,52	185,78	120
Cena energenta [€/kg]	0,096	0,215	0,232	0,6
Kurilnost energenta [kWh/m ³]	1 660	3 077	4 822,22	2 083,33
Kurilnost energenta [kWh/kg]	2,31	4,73	6,03	10,42
Poraba energenta na sezono [m ³]	15	8,09	5,16	11,95
Cena energenta na sezono [€]	1 041,6	1 129,04	959,29	1 434,24
Neto sedanja vrednost	9 904,33	9 869,94	8 007,75	14 211,84

Iz tabele 5-17 je razvidno, da je cena kubičnega metra toreficiranih peletov največja v primerjavi z ogljem, lesnimi peleti in lesom. Ker je kurilnost toreficiranih peletov največja, je poraba toreficiranih peletov najmanjša. Kurilnost lesa je najmanjša, ker v procesih torefikacije in karbonizacije nastopa kot surovina, ki vstopa v oba procesa. Les je tudi surovina pri pridelavi lesnih peletov, kjer poteka proces peletizacije za zgoščevanje lesa v pelete. Ker se les v procesih pridobivanja toreficiranih peletov in oglja toplotno predela, je zato cena nastalih produktov večja. Prav tako imajo oglje, lesni in toreficirani peleti manjšo vsebnost vlage kot les, kar tudi vpliva na ceno. Poraba lesa na sezono je predvidena, medtem ko je poraba lesnih peletov, toreficirane biomase in oglja izračunana glede na potreben toplotni tok, dobljen s kurjenjem lesa. Ugodna izbira so tudi lesni peleti, saj imajo visoko kurilno vrednost. Pri pridelavi lesnih peletov poteka postopek zgoščevanja lesa, zato je tudi kurilna vrednost lesnih peletov večja kot pri lesu. Večja kurilna vrednost lesnih peletov v

primerjavi z lesom je povezana s porabo energenta na sezono, zato je poraba lesnih peletov manjša. Toreficirani peleti imajo največjo kurilno vrednost, zato je poraba le-teh manjša v primerjavi z lesnimi peleti. Tabela 5-17 prikazuje, da je poraba toreficiranih pelet najmanjša, zaradi največje kurilne vrednosti v primerjavi z ogljem in z lesom. Cena energenta na sezono je določena kot produkt med ceno energenta in porabo skozi kurilno sezono. Cene energentov se razlikujejo zaradi postopka predelave in s tem povezanimi predelovalnimi stroški, zato ima les kot surovina najmanjšo ceno, ostali energenti pa imajo višjo ceno. Zaradi višje cene oglja glede na njegovo kurilno vrednost so stroški ogrevanja v kurilni sezoni največji v primerjavi z lesom, lesnimi in s toreficiranimi peleti. Ker je pri kurjenju s peleti potrebna drugačna tehnologija doziranja goriva, je potrebno dodati zalogovnik za pelete, transporter za pelete in gorilnik za pelete z regulatorjem. Zato je začetna naložba v primeru lesnih in toreficiranih peletov večja kot v primerjavi uporabe lesa ali oglja. Tabela 5-17 prikazuje podatke, iz katerih lahko ugotovimo, da je najbolj ugodna uporaba toreficiranih peletov. Toreficirani peleti imajo največjo kurilno vrednost, kar se posledično pozna pri porabi energenta in stroškov energenta v kurilni sezoni v primerjavi z lesom in ogljem.

5.4 Vpliv izgorevanja toreficiranih peletov na okolje

Pri gorenju poteka kemijski proces oksidacije gorljivih snovi, ki vsebujejo vodik, dušik in žveplo s kisikom. Pri tem postopku dobimo toploto, nastanejo pa ogljikov dioksid in vodna para ter zaradi nepopolnega izgorevanja goriva tudi škodljiv ogljikov monoksid, toplogredni plini, C_xH_y , NO_x , žveplove spojine, pri nepopolnem zgorevanju ogljika nastanejo saje in ostali škodljivi delci [26].

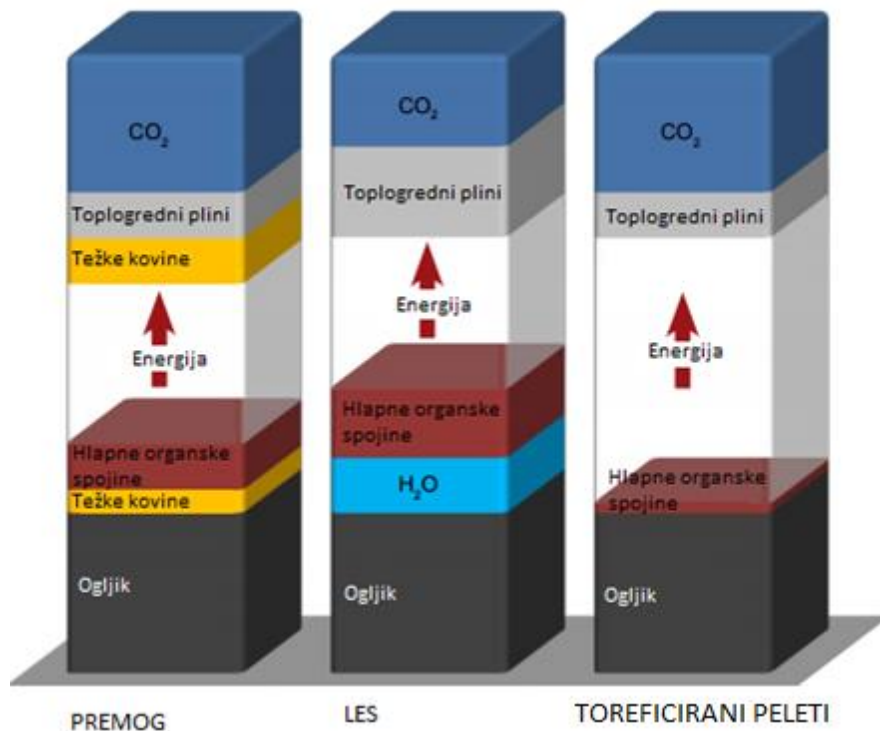
Izgorevanje premoga za proizvodnjo električne energije se šteje kot eden izmed največjih virov emisij toplogrednih plinov. Toreficirana biomasa ima lastnosti med premogom in lesom, zato je primerna za uporabo v elektrarnah. Delno nadomestitev premoga s toreficirano biomaso kot obnovljivega vira energije lahko označimo kot CO_2 nevtralni sistem za pretvorbo energije. Nadomestek premoga s toreficirano biomaso bi pripomogel k zmanjšanju emisij CO_2 in toplogrednih plinov. Zraven zmanjšanja porabe premoga sosežig toreficirane biomase povzroči tudi zmanjšanje emisij NO_x in SO_2 .

Toreficirana biomasa je bila zasnovana predvsem za elektrarne, ki delujejo na premog, za zmanjšanje toplogrednih plinov in emisij CO_2 . Skozi proces torefikacije in peletizacije biomase se energija biomase povečuje in prečiščuje za potrebe proizvodnje električne energije iz biomase. Med procesom torefikacije se molekularna struktura lesa preoblikuje v gorivo, ki je podobno kurilni vrednosti premoga. Premog je biomasa, ki je nastala z dolgotrajnim procesom karbonizacije v odsotnosti kisika, kjer so žveplo in ostale škodljive snovi ostale v premogu in jih ni mogoče v celoti odstraniti pred sežigom [23]. Tabela 5-18 prikazuje rezultate kemijske sestave lesa listavcev, ki vsebuje 20 % vlažnost pri postopku pirolize, kjer se je temperatura dvigovala za 4 °C/min.

Tabela 5-18: Kemijske sestave [4]

Kemijska sestava [%]	Les listavcev	Toreficirana biomasa	Oglje
Hlapne snovi	83,6	46,8	21,8
Pepel	0,4	0,7	1,2
Vlaga	20	3,2	4,4
Ogljik	49,5	67,3	80,9
Vodik	6,5	4,1	2,2
Kisik	44	28,6	16,9
Žveplo	0	0	0
Dušik	0	0	0

Slika 5-12 prikazuje primerjavo premoga, lesa in toreficiranih peletov, ki se kot gorivo uporabljajo v termoelektrarnah. Za vsa goriva je značilno, da je vsebnost ogljika pri vseh treh gorivih približno enaka, medtem ko je delež hlapnih organskih komponent pri toreficiranih peletih najmanjši. Največjo kurilno vrednost dajo prav tako toreficirani peleti. Les ima v tem primeru največji izpust toplogrednih plinov, premog in toreficirani peleti pa imajo približno enak delež le-teh. Podoben rezultat se opazi tudi v primeru izpusta CO₂. Les edini vsebuje vlago, kar lahko pri skladiščenju povzroči mikrobiološki razpad goriva. Premog pa edini vsebuje tudi težke kovine. Ravno izogorevanje težkih kovin pri premogu povzroči dodatno onesnaževanje okolja. Iz diagrama na sliki 5-12 je razvidno, da so naravi in ozračju najbolj primerno gorivo toreficirani peleti, saj povzročajo najmanjše onesnaževanja glede na ostali dve gorivi.



Slika 5-12: Primerjava goriv, ki se uporabljajo v elektrarnah [24]

6 Zaključek

V diplomskem delu so analizirane možnosti uporabe toreficiranih pelet v primerjavi z lesom, lesnimi peleti in ogljem za proizvodnjo toplote. Najprej so bili poiskani podatki o kurilni vrednosti, ceni na trgu in načinih predelave energentov iz lesne biomase. Največjo kurilno vrednost imajo toreficirani peleti, ki tudi vsebujejo najmanjšo vsebnost vlage. Med preučevanjem proizvodnje polen oziroma toreficiranih peletov je bilo opaženo, da je proizvodnja toreficiranih peletov zahtevnejša in vključuje več postopkov predelave kot proizvodnja polen.

Za praktični prikaz je v diplomskem delu predstavljen kotel na trda goriva in ustrezna dodatna oprema, kjer se je izvedla primerjava izgorevanja toreficiranih peletov, lesnih peletov, oglja in lesa. Uporabljeni kotel deluje na principu postopka pirolize. Rezultati analize so pokazali, da je najugodnejše za gorivo izbrati toreficirane pelete, ker imajo največjo kurilnost in s tem najmanjšo porabo energenta na sezono v primerjavi z lesom in ogljem. Toreficirani peleti imajo največjo ceno na trgu, vendar se, zaradi največje kurilne vrednosti in s tem najmanjše porabe goriva na ogrevalno sezono, uporabnost toreficiranih peletov najbolj obrestuje.

V diplomskem delu so bile preučene znane tehnologije torefikacije lesa. Nekatere tehnologije torefikacije lahko procesirajo surovine z majhnimi delci, kot je žagovina, medtem ko druge lahko procesirajo tudi velike delce. Le redke tehnologije so sposobne predelave širokega velikostnega spektra delcev. To pomeni, da je izbira tehnologije odvisna od lastnosti surovin in od predhodne predelave surovin pred procesom torefikacije z uporabo naprav za zmanjšanje velikosti delcev lesne biomase. Ker je to področje še vedno v razvoju, večina tehnologij temelji na že obstoječih principih reaktorjev, ki so sicer bili konstruirani za druge namene, z nadgradnjo za proces torefikacije lesne biomase. Vsaka tehnologija ima svoje značilnosti, ki se med seboj razlikujejo z določenimi prednostmi in slabostmi. Tukaj je tudi vzrok, zakaj noben reaktor ni proglašen kot najboljši in najbolj primeren za torefikacijo lesne biomase.

V prihodnosti se predvideva, da se bodo proizvodni procesi izpopolnjevali glede na zahtevane procesne pogoje proizvodnje oglja in toreficiranih peletov v smislu hidrofobnosti, kurilne vrednosti in gostote energije. Torefikacija je obetavna tehnologija obdelave lesne biomase kot obnovljivega vira energije. Pri tem je ključnega pomena učinkovita toplotna integracija, ki zajema obravnavo vseh procesnih naprav, z namenom zmanjšanja porabe energije in izpusta ogljikovega dioksida. Uspešnost postopka temelji predvsem na sposobnosti učinkovitega prenosa toplote na biomaso, optimalni uporabi hlapnih snovi, proizvedenih med torefikacijo, delovanju pod pogoji brez dodatnega vira energije in prilagajanju lastnostim surovin ter proizvodov.

Danes je v svetu vse večja zahteva po zmanjšanju emisij toplogrednih plinov in povečanju deleža obnovljivih virov energije v proizvodnji energije. Glede na analizo vpliva na okolje so učinki nadomeščanja fosilnih goriv z viri energije lesne in toreficirane biomase pozitivni. Seveda pri uporabi biomase obstajajo emisije (CO , CO_2 in NO_x) in emisije zaradi transporta, vendar zamenjava obstoječih neobnovljivih energetskega virov s toreficiranimi peleti povzroči zmanjšanje skupnih emisij CO_2 in zmanjšanje povpraševanja po uvoženih virih energije.

7 Literatura

- [1] Sinha S., Jhalani A., Ravi M. R., Ray A. Modelling of pyrolysis in wood: A review. *SESI Journal*, Vol. 10(1): 41–62, 2000.
- [2] Wilén C., Sipilä K., Tuomi S., Hiltunen I., Lindfors C. Wood torrefaction – market prospects and integration with the forest and energy industry. Espoo, March 2014.
- [3] I. Leban. Les zgradba. http://www.cpi.si/files/cpi/userfiles/Lesarstvo_tapetnistvo/3-LES_ZGRADBA.pdf (Dostop: 21. 5. 2015).
- [4] Donahue W. S., Brandt J. C. Pyrolysis: Types, Processes, and Industrial Sources and Products. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2009.
- [5] Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in energy and combustion science*, 34, 47–90, 2008.
- [6] Copot A., Krmelj V., Tekavec S. Trajnostna izraba lesne biomase “Energetska agencija za Podravje”. http://www.greenpartnerships.eu/wp/wp-content/uploads/Sustainable-use-of-biomass_Trajnostna-izraba-lesne-biomase_article_GPs.pdf (Dostop: 1. 5. 2015).
- [7] De Wild P. Biomass Pyrolysis for Chemicals. Groningen, Nizozemska: University of Groningen, 2011.
- [8] Koppejan J., Sokhansanj S., Melin S., Madrali S. IEA Bioenergy Task 32 report, Status overview of torrefaction technologies. Enschede, December 2012.
- [9] State of the industry. <http://www.canadianbiomassmagazine.ca/news/state-of-the-industry-2287> (Dostop: 5. 7. 2015).
- [10] Lastnosti bukovega oglja. <https://sites.google.com/site/ogljarskiklub/o-oglju/lastnosti-bukovega-oglja> (Dostop: 21. 5. 2015).
- [11] Charcoal. <http://www.personal.rdg.ac.uk/~scscharip/Charcoal.htm> (Dostop: 21. 5. 2015).
- [12] Pros and cons of torrefaction of woody biomass. http://www.agrireseau.qc.ca/references/32/presentations_guelph/2Torrefaction%20-%20Pros%20and%20Cons%20By%20Mathias%20Leon%20UoG.pdf (Pristop: 24. 6. 2015)
- [13] Proizvodnja polen. <http://www.bioheatlocal.com/proizvodnja-polen> (Pristop: 25. 6. 2015)
- [14] Grobovšek B. Toplotne izgube in izkoristek pri ogrevalnih kotlih. <http://gcs.gizrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT117.htm> (Pristop: 8. 6. 2015)
- [15] Wilén C., Jukola P., Järvinen T., Sipilä K., Verhoeff F., Kiel J. Wood torrefaction – pilot tests and utilisation prospects. Energy research Centre of the Netherlands, Kopijyvä Oy, Kuopio, 2013.
- [16] Arpiainen V., Wilen C. Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction, Deliverable No. D3.2. Report on optimisation opportunities by integrating torrefaction into existing industries, 2013.
- [17] Novak Pintarič Z. Razvoj produktov in procesov: zbrano gradivo. Maribor, 2014.
- [18] Hajduk Š. Ekonomska primerjava različnih tehnologij sušenja lesnih sekancev: diplomsko delo. Maribor: Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2014.
- [19] Ika, trgovsko podjetje Žiri, d. o. o. Ogrevanje z obnovljivo energijo: Orlan. Katalog.

- [20] Krajnc N., Piškur M., Klun J., Premrl T., Piškur B., Robek R., Mihelič M., Sinjur I. Lesna goriva: drva in sekanci – proizvodnja, standardi kakovosti in trgovanje, Gozdarski inštitut Slovenije, Ljubljana 2009.
- [21] Seep S, ECO Consulting Group. Multiple-Household Fuel Use – a balanced choice between firewood, charcoal and LPG. Germany, 2014.
- [22] Kotel na biomaso Orlan 25 kW. http://www.lontech.si/Kotli_orlan_super (Pristop: 9. 6. 2015)
- [23] Eco clean coal. http://www.freeenergynews.com/Directory/Biomass/NewEarth_Clean_Coal/ECO_Clean_Coal_brochure_EU.pdf. (Pristop: 5. 7. 2015)
- [24] CNFbiofuel. <http://cnfbiofuel.com/poster2.pdf>. (Pristop: 5. 7. 2015)
- [25] Batidzirai B., Mignot A.P.R., Schakel W.B., Junginger H.M., Faaij A.P.C. Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. Energy, Vol. 62: 196–214, 2013.
- [26] Kaplar J. Zgorevanje lesa v malih kurilnih napravah. http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/zrak/zgorevanje_lesa.pdf (Dostop: 6. 7. 2015)
- [27] Ilc J. Oglarjenje na kočevskem gozdnogospodarskem območju: diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 2011.
- [28] Cena bukovih polen. http://www.drva.info/izdelki/drva-na-paletah/drva-na-paleti/335/1/?gclid=CjwKEAjwpaqvBRCxzIGoxs6v2TkSJADel-MITwA9-wQ2uY6d_yybmkJWU76uJOFBGr9K82n93PdIRoC5Xzw_wcB. (Dostop: 13. 9. 2015)
- [29] Bagramov G. Economy of converting wood to biocoal. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2010.
- [30] Strukturni skladi – ESRR, Kohezijski sklad in ISPA. Priročnik za izdelavo analize stroškov in koristi investicijskih projektov. Strukturni skladi EU v Sloveniji, 2004.
- [31] Kaker D. Tehnološke značilnosti izdelave lesnih kuriv: diplomsko delo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo, 2009.
- [32] Cena lesnih peletov. <http://www.peleti-ceneje.si/>. (Dostop: 15. 11. 2015)
- [33] Centrometal. <http://www.etazgrejanje.com/katalog.php?prodID=582&valuta=EUR>. (Dostop: 6. 12. 2015)
- [34] Kompleti na lesne pelete (14–50 kW). <http://elbatrade.si/wp-content/uploads/katalog-Centrometal-pelet-set-EKO-CK-P-+-gorilec-na-pelete.pdf>. (Dostop: 6. 12. 2015)
- [35] Centrometal. Tehnika grijanja. http://www.etazgrejanje.com/cms_upload/catalog/product_files/582_teh.uputstvo-pelet-set-14-35-korisnik-srb-10-2010-02-78.pdf. (Dostop: 6. 12. 2015)

Izjava o istovetnosti tiskane in elektronske verzije