



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

SOOJUSTEHNKA INSTITUUT
Soojusenergeetika õppetool

MSE40LT

Viljar Stalkov

BIOKÜTUSE TORREFITSEERIMINE

Autor taotleb
tehnikateaduse bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn

2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”201... a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

Soojusenergeetika õppetool

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2014. aasta 6. semester

Üliõpilane: Viljar Stalkov, 113063 (nimi, kood)

Õppekava: MASB02/09

Spetsialiseerumine: Soojusenergeetika

Juhendaja: vanemteadur PhD Siim Link (amet, nimi)

Konsultandid: (nimi, amet, telefon)

.....

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Biokütuse torrefitseerimine

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Kirjandusega tutvumine	11.02.2014
2.	Tabelite ja seleda töötlemine	13.03.2014
3.	Lõputöö valmis kirjutamine	18.05.2014

Lahendatavad insener-tehnilised ja majanduslikud probleemid:

Torrefitseerimis protsessi uurimine, hinnang andmine ning eeliste ja puuduste väljatoomine.

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada dekanaati hiljemalt

Töö esitamise tähtaeg

Üliõpilane Viljar Stalkov /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Siim Link /allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE	3
SELEDE LOETELU	6
TABELITE LOETELU	7
EESSÕNA.....	8
SISSEJUHATUS	9
1 ÜLEVAADE BIOKÜTUSEST	11
1.1 Lignotselluloosse biomassi struktuur	12
1.1.1 Tselluloos.....	12
1.1.2 Hemitselluloos	13
1.1.3 Ligniin.....	13
2 TORREFITSEERIMISE ALGTÕED	14
2.1 Torrefitseerimise kasutusvaldkonnad.....	14
2.2 Torrefitseerimist mõjutavad parameetrid	14
2.2.1 Temperatuur	15
2.2.2 Hapniku kontsentratsioon	16
2.2.3 Protsessi ajakulu.....	17
2.2.4 Osakeste suurus.....	17
2.2.5 Reaktori tüüp.....	18
2.3 Torrefitseerimisprotsessi diagramm	19
2.3.1 Kuivatamine	21
2.3.2 Torrefitseerimine.....	22
2.3.3 Jahutamine	22
2.4 Torrefitseerimise mehhanism	23
2.5 Massi ja energia bilanss.....	24
2.6 Soojuse bilanss	25
3 TORREFITSEERIMISE EELISED	28
3.1 Alternatiivne lähteaine	29
3.2 Pelletite tootmine.....	29
3.3 Transport	30
3.4 Kütuse peenestamine.....	31
4 TORREFITSEERIMISE TEHNOLOOGIAD	33
4.1 Pöörlev trummel.....	33
4.2 Kruvi tüüpi reaktorid	34
4.3 Herreshoffi ahi.....	35
4.4 Toroidkihtreaktor	35

4.5	Liikuv kihiga reaktor	36
4.6	Lintkuivati	37
4.7	Mikrolainetel töötav reaktor	38
4.8	Keevkihtreaktor	39
5	TORREFITSEERIMISE MAJANDUSLIK VÄÄRTUS	41
	KOKKUVÕTE	43
	SUMMARY	45
	KASUTATUD KIRJANDUS	47

SELEDE LOETELU

Sele 1.1 Taime põhiraku seinu struktuur.....	11
Sele 2.1 Temperatuuri mõju torrefitseeritud männilaastule. (a) Toores puit, (b) 225 °C, (c) 250 °C, (d) 275 °C ja (e) 300 °C.....	16
Sele 2.2 Kase torrefitseerimisel saadud saagise jaotumine.....	16
Sele 2.3 Ülevaade torrefitseerimisprotsessi diagrammist	20
Sele 2.4 Torrefitseerimise kuumutusfaasid ja jahutamine.	21
Sele 2.5 Füüsikalised-keemilised nähtused lignotselluloosse materjali kuumutamisel torrefitseerimisel kasutatavatel temperatuuridel	24
Sele 2.6 Van Kreveleni diagramm	25
Sele 2.7 Erinevate biomasside energiatiheduse tegurid pärast torrefitseerimist.....	25
Sele 2.8 Integreeritud torrefitseerimisprotsessi teoreetiline termiline kasutegur, lähtematerjal on puit (tuhasus 0,5%) ja soojusevajadus kuivatamiseks on 2,9 MJ 1 kg vee kohta. (Kuivati efektiivsus on 75%).....	26
Sele 2.9 Üldine torrefitseerimise massi ja energia bilanss.....	27
Sele 3.1 Pelletite tootmine ja torrefitseerimine	30
Sele 3.2 Tükisuuruse vähendamise tulemused.....	32
Sele 4.1 Pöörlev trummel reaktor	34
Sele 4.2 Kruvi tüüpi reaktor.....	34
Sele 4.3 Herreshoffi ahi	35
Sele 4.4 Toroidkihtreaktor	36
Sele 4.5 Liikuva kihiga reaktor	37
Sele 4.6 Lintkuivatireaktor.....	38
Sele 4.7 Mikrolainetel töötav reaktor.....	39
Sele 4.8 Keevkihtreaktor.....	40

TABELITE LOETELU

Tabel 1.1 Erinevate biomasside polümeerne koostis	12
Tabel 2.1 Torrefitseerimise eelised ja väljakutsed.....	14
Tabel 2.2 Erinevate allikate torrefitseerimise temperatuurid.....	15
Tabel 2.3 Protsessi kestuse lühendamine hapnikurikka keskkonna mõjul	18
Tabel 2.4 Eelised ja puudused erinevatel torrefitseerimise reaktoritel	18
Tabel 3.1 Valik kütuseid, mis sobivad biokütusega koospõletamiseks.	28
Tabel 4.1 Ülevaade erinevatest torrefitseerimisreaktoritest ja nende toodangumahust.....	33

EESSÕNA

Antud bakalaureusetöö teema kujunes välja autori huvist biokütuste vastu. Torrefitseerimine on unustatud vana tehnoloogia, millega on hakatud tegelema ka Eestis. Seega tundus autorile torrefitseerimise temaatika olevat aktuaalne ja huvitav. Lõputöö teema pakkus välja soojustehnika instituudis töötav vanemteadur PhD Siim Link, kes aitas lõputöö juhendajana kaasa ka materjali kogumisel.

SISSEJUHATUS

Biokütuse torrefitseerimine on vana tehnoloogia, mis on muutunud üha aktuaalsemaks. Juhtivad riigid, kes biokütuse torrefitseerimisega tegelevad, on Ameerika Ühendriigid ja Holland, aga viimastel aastatel on see tehnoloogia hakanud jõudma ka Eestisse. Kuna torrefitseeritud biomassi omadused sarnanevad kivisöele, siis võib seda kütust hakata põletama väiksemates katlamajades ja kodumajapidamistes. Töö eesmärk on teha uurimus torrefitseerimisprotsessist, millest see sõltub, milliseid reaktoreid kasutatakse ja mis on selle eelised.

Biokütuse torrefitseerimise peamine eesmärk on parandada kütuse omadusi. Biokütuseid on erinevaid (puitpõhine, rohtne jne), aga torrefitseerimise plussiks on see, et pärast protsessi on erinevat tüüpi biokütuste teatud omadused suhteliselt sarnased. Peamised parameetrid, mis määravad protsessi edukuse, on temperatuur (vahemikus 200-300 °C), hapniku kontsentratsioon protsessi läbiviimise keskkonnas, osakeste suurus ja protsessile kuluv aeg.

Torrefitseerimisprotsessi on võimalik läbi viia väga erinevate reaktoritega: mikrolainetel töötav reaktor, toroidkihtreaktor, trummelreaktor ja nii edasi, kõigil on omad eelised ja puudused. Õige reaktori valik sõltub kütusele esitatud tingimustest. Samuti on oluline protsessile kuluva energia ja reaktori maksumus. Kuna torrefitseeritud toodet on võimalik kasutada paljudes kohtades, näiteks koospõletamiseks fossiilse kütusega ja keemiatööstuses, siis võivad soovitud kütuse omadused varieeruda. Koospõletamisel peab kütus olema võimalikult sarnaste omadustega kivisöele. Keemiatööstuses soovitakse, et kütus ei oleks hüdrofoobne, mis tegelikult on torrefitseeritud toote üks eeliseid.

Torrefitseerimisreaktorid on kallimad kui tavaliste pelletite tootmiseks tehtavad kulutused, aga sellegipoolest tasub see tehnoloogia end alati ära. Madala energiasisaldusega biomass omandab töötlemise käigus kivisöega võrreldava kütteväärtuse ja seeläbi kõrgema majandusliku väärtuse.

Lõputöö esimeses peatükis seletatakse lahti, mis on biokütus ja mis on selle põhikoostisosad lähtudes biomassi torrefitseerimisest. Teises osas tuuakse välja torrefitseerimise algtõed: kus kasutatakse torrefitseerimist, mida torrefitseeritakse, mis on torrefitseerimise etapid ja millised parameetrid protsessi mõjutavad. Bakalaureusetöö kolmandas peatükis tuuakse välja

torrefitseerimise eelised ja põhjused, miks on soovitatav seda protsessi rakendada. Neljandas osas räägitakse täpsemalt reaktoritest, tuuakse välja nende põhimõtted, eelised ja puudused. Viimases osas vaadeldakse tehnoloogia majanduslikku tasuvust.

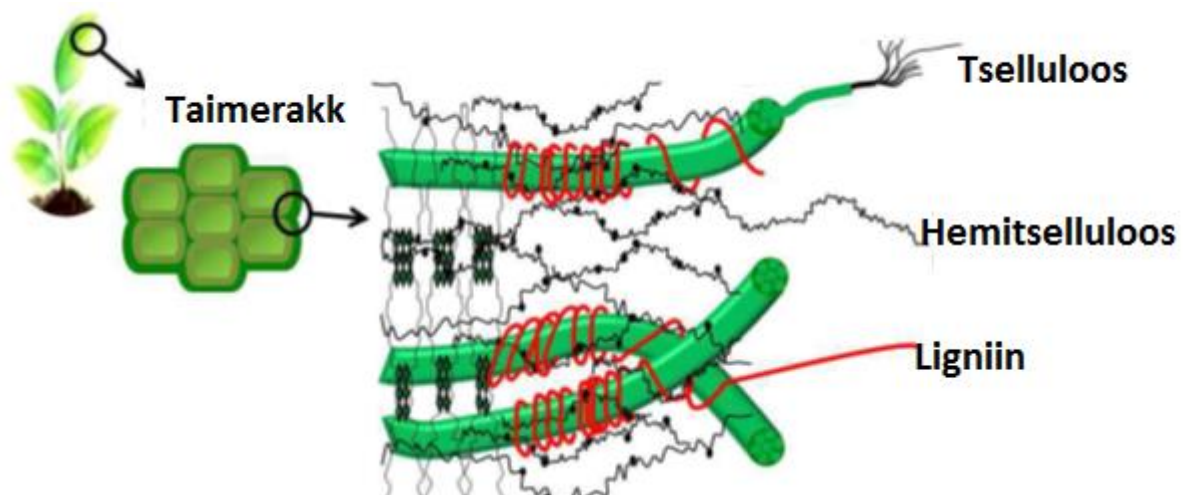
1 ÜLEVAADE BOKÜTUSEST

Biokütus on orgaaniline materjal, mis on tekkinud taimede või loomade elutegevuste tagajärjel, välja arvatud kütused, mis on tekkinud miljonite aastate jooksul, nagu näiteks kivisüsi või nafta. Biokütustest toodetud energia ei aita kaasa happevihma põhjustavate gaaside tekkele, sest need sisaldavad vähesel määral väävel- ja lämmastikühendeid. Biokütus salvestab päikeselt kiirgavat energiat läbi fotosünteesi. On tähele pandud, et biomassi saab otse muundada kõrgema klassi energiakandjaks, nagu biosüsi, generaatorgaas ja bioõli, läbi erinevate valmistamismeetodite, nagu näiteks pürolüüs, gasifitseerimine, ümberesterdamine ja anaeroobne käärimine. [1]

Eestis kasutatakse biokütustes kõige laialdasemalt puitu, sellepärast on edaspidi töös käsitletud puitu. Sele 1.1 kujutab taime põhiraku seina struktuuri.

Puidu põhikomponendid on: [2]

- Tselluloos 40-50%
- Hemitselluloos 25-35%
- Ligniin 20-30%



Sele 1.1 Taime põhiraku seina struktuur

Männi, kuuse ja kase tüvipuit sisaldab ülaltoodud komponente erineval hulgal. Puidu põhimass koosneb orgaanilistest ühenditest, mille koostisesse kuulub 50% süsinikku, 43% hapnikku, 6% vesinikku ja 0,1% lämmastikku. Peale orgaaniliste ühendite kuulub puidu keemilisse koostisse veel mõningal määral mineraalühendeid, mis põlemisel moodustavad tuha (0,4%). [2]

1.1 Lignotselluloosse biomassi struktuur

Biomass võib olla lignotselluloosne või mittelignotselluloosne materjal. Lignotselluloosne materjal on tärglisesisalduseta ja kiuline osa taimest, mis enamasti koosneb tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist. [3] Mittelignotselluloosne materjal on orgaaniline materjal, mis omab peamiselt toiteväärtust. Suhkur, tärklis, proteiin ja rasvad kuuluvad iga põllukultuuri mitte-lignotselluloosse materjali hulka. Neid materjale on lihtne hüdrolyüsida ning nendest toota bioetanooli. Rakuseinte ehitusest arusaamine on eelduseks antud protsessi läbiviimiseks. Taime rakusein koosneb neljast peamisest makrokomponendist: esimene sein, teine sein, plasma membraan ja lamell. Need kõik koosnevad tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist. Selliseid taimi kutsutakse lignotselluloosseteks materjalideks. Eelnimetatud polümeerid annavad taimele jäiga struktuuri. Tabel 1.1 näitab, kuidas jaguneb taime koostis. [1]

Tabel 1.1 Erinevate biomasside polümeerne koostis

Lignotselluloosmaterjalid	Tselluloos (%)	Hemitselluloos (%)	Ligniin (%)
Lehtpuu tüvi	40-55	24-40	18-25
Okaspuu tüvi	45-50	25-35	25-35
Pähklikoored	25-30	25-30	30-40
Maisitõlvikud	45	35	15
Rohi	25-40	35-50	10-30
Paber	85-99	0	0-15
Nisuõled	40-55	50	15
Sorteeritud prügi	60-70	20	20
Puulehed	15-20	80-85	0
Puuvill	80-95	5-20	0
Ajalehed	40-55	25-40	18-30
Heitvesi	8-15	-	24-29
Sealäga	6	28	-
Tahke veisesõnnik	1,6-4,7	1,4-3,3	2,5-5,7

1.1.1 Tselluloos

Tselluloos on kõige levinum orgaaniline komponent Maal [3] ja ta on puidu rakkude üheks põhiühendiks. Tselluloos on kiudja ehitusega, värvitu, lõhnatu, maitsetu, vastupidav, pika ahelaga, kristalne, tugev ja raskesti hüdrolyüsitav glükoosi polümeer, mis võib luua intra- ja intermolekulaarse vesiniksideme. Tselluloosi ($C_6H_{10}O_5$)_n iseloomustab suur molekulaarmass (162,14 g/mol). [3]. Vesiniksidemete kaudu on tselluloosi molekulid liitunud kimpudeks.

Tselluloosi makromolekul hüdrolüüsub kontsentreeritud mineraalhapetes, kuid leeliste suhtes on see püsiv. [4] Tselluloos annab biokütusele tugevuse. Kui biokütust torrefitseerida, siis puit kaotab oma tugevuse ja muutub hapramaks. See aitab kaasa kütuse jahvatamisele.

1.1.2 Hemitselluloos

Hemitselluloos on keemiliselt koostiselt väga lähedane tselluloosile ja moodustab 25-30% puidu kuivainest. [5] Hemitselluloosid koosnevad peamiselt heteropolüsahhariididest, nagu heksoosid (D-glükoos, D-mannoos, D-galaktoos) ja pentoosid (D-ksüloos ja L-arabinoos). [6]

1.1.3 Ligniin

Ligniin on molekulaarselt amorfne, isotroopne ja väga keerulise struktuuriga keemiline ühend. [2] Ligniin on termoplastne aine, st on „külmana kõva“, kuid soojenedes pehmeneb. Sellel omadusel põhineb puidu plastiline painutamine. Rakkude puitumisel koondub ligniin rakuseintesse. Vahelamellis, kus ligniini on kuni 80%, kleepuvad rakud selle tõttu üksteise külge, rakustruktuur tugevneb ning rakkude vastupanu survejõududele suureneb. [7] Ligniin on kolme-dimesiooniline polümeer, mis koosneb valdavalt C-O-C ja C-C sidemetest. Ligniine võib olla erinevaid tüüpe, nagu näiteks:

- Ligniin lehtpuudes
- Ligniin okaspuudes
- Ligniin rohttaimes

Ligniin on üldnimetus suurele grupile aromaatsetele polümeeridele. [8] Ligniin laguneb termiliselt väga suures temperatuurivahemikus, kuna aine struktuuris olevatel mitmesugustel hapnikku sisaldavatel funktsionaalrühmadel on erinev termiline stabiilsus, mistõttu toimub nende lõhestumine erinevatel temperatuuridel. [9] Ligniin on termiliselt stabiilne suures temperatuurivahemikus 100 °C kuni 900 °C. Seega torrefitseerimisprotsessis ligniin oluliselt ei muutu. [1] Ligniin on sideaine, mis annab puidule liimitavuse. See on väga tähtis komponent edasisel puidu töötlemisel, näiteks pelletiteks või briketiks.

2 TORREFITSEERIMISE ALGTÕED

2.1 Torrefitseerimise kasutusvaldkonnad

Biomass võib olla lähteaineks energia-, metalli- ja keemiatööstuses, nt tahkes, vedelas või gaasilises olekus. [3]. Torrefitseerimine on saanud oma nime kohviubade röstimisest, mis küll tehakse madalamal temperatuuril ja hapniku juuresolekul. Torrefitseerimise kohta öeldakse tihti, et see on biomassi eeltöötlus tulevaseks kasutamiseks. Torrefitseeritud biomass leiab kasutust [3]:

- koos kivisöega põletamisel elektrijaamades;
- kütusena kaugküttekatalamajades;
- kütusena gaasistamisel;
- potentsiaalse toorainena keemiatööstuses;
- ahjudes, kaminates ja väikekateldes.

Torrefitseerimine on aeglane ja madalatemperatuuriline pürolüüs, tihti kutsutakse seda ka pehmeks pürolüüsiks. [10]

Tabel 2.1 on välja toodud torrefitseerimise peamised eelised, miks sellega tuleks tegeleda, ja puudused, millega tuleb arvestada.

Tabel 2.1 Torrefitseerimise eelised ja väljakutsed

Eelised	Puudused ja peamised arendamise suunad
Kütteväärtuse tõus	Investeeringukulud
Vähendatud hapnikusisaldus	Tegevuskulud
Hüdrofoobne	Energiakadu
Vähendatud kloori sisaldus	Ladestamise probleemid
Kvaliteedi tõus ja homogeenne toode	Pole veel väga kättesaadav
Puhtam põlemine	Protsess ega toode ei ole kasumlikkust veel tööstuslikult tõestanud
Lihtsam jahvatada	

2.2 Torrefitseerimist mõjutavad parameetrid

Lühidalt on torrefitseerimine termokeemiline meetod, mis viiakse läbi temperatuurivahemikus 200-300 °C hapniku juuresolekuta ja atmosfäärirõhul. [11] Erinevad allikad pakuvad erinevaid temperatuure, aga need ei ületa 300 °C (Tabel 2.2). [3]

Tabel 2.2 Erinevate allikate torrefitseerimise temperatuurid

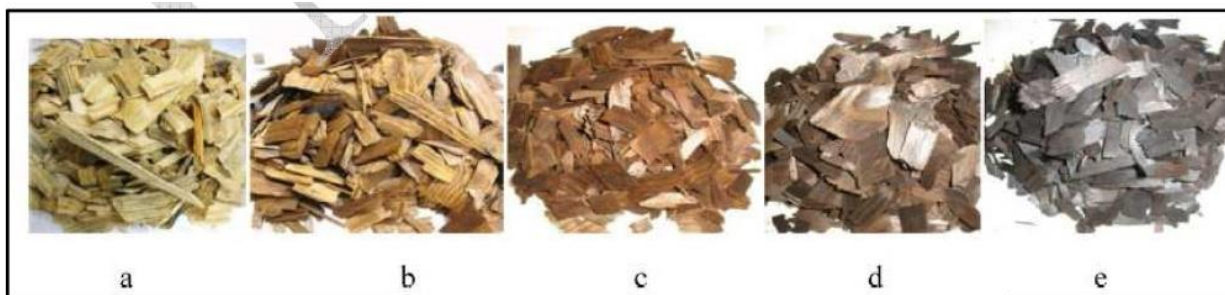
Uurijad	Temperatuurivahemik (°C)
Aries et al. (2008)	220-300
Chen and Kuo (2010), Prins (2005), Zwart et al. (2006)	225-300
Pimchuai et al. (2010), Prins et al. (2006)	230-300
Bergman et al. (2005), Tumuluru et al. (2011), Rouset et al. (2011), Sadaka and Negi (2009)	200-300

Torrefitseerimise tulemusena saadud torrefitseeritud materjali omadusi mõjutavad torrefitseerimise temperatuur, reageerimise aeg ja biokütuse omadused. [11] Sele 2.2 on välja toodud, kuidas saagis on torrefitseerimise ajal jaotatud. [12] Mida kõrgem on torrefitseerimise temperatuur, seda rohkem eraldub lendosi ja tahke saagise kogus väheneb.

2.2.1 Temperatuur

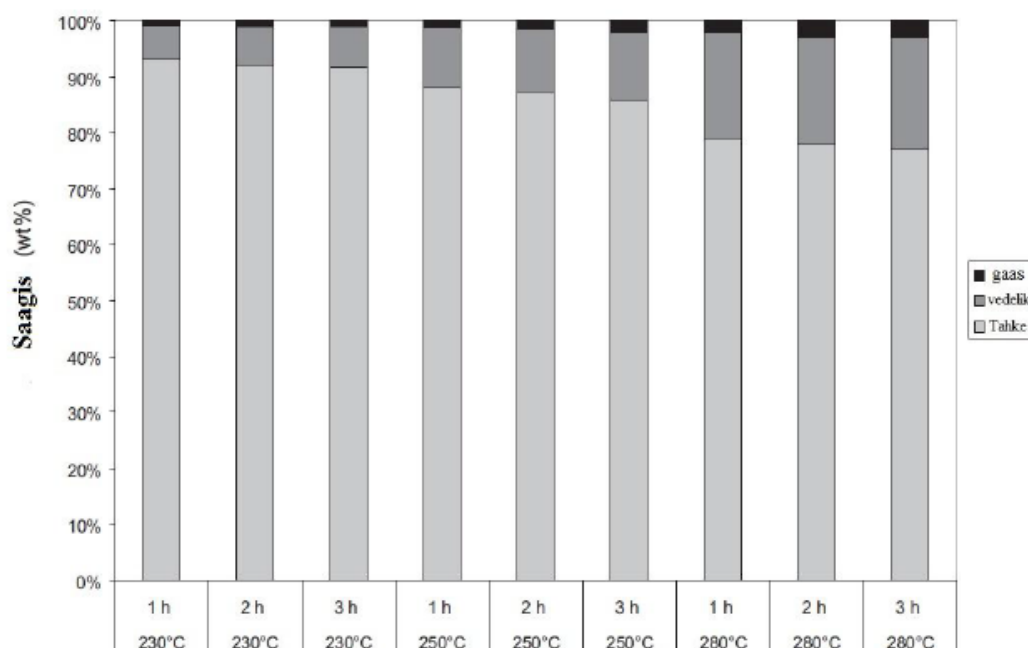
Torrefitseerimisprotsesse võib jagada kergeteks, pehmeteks ja rasketeks, sõltuvalt temperatuurivahemikust, mis jääb 230 °C, 260 °C ja 290 °C ümbrusesse. Temperatuur mõjutab toote kvaliteeti. [1]

Torrefitseerimisel üle 300 °C kiireneb lenduvate osakeste eraldumine ja materjali karboniseerumine, mis kahandavad lõpp-produkti energiasaldust. Samuti laguneb kõrgemal temperatuuril ligniin, mis on sideainena vajalik pelletite tootmiseks. Lisaks eeltoodule kaasneb kiire tselluloosi termolagunemisega 300-320 °C kraadil tõrva tekkimine. Nendel põhjustel on kujunenud torrefitseerimise temperatuuripiiranguks 300°C. [3] Biomassi värvus muutub protsessi jooksul vaba vee ja lenduvate gaaside eraldumisele tõttu erinevates etappides. Näiteks muutub värvus pruunikast mustaks, kui aeg ja temperatuur muutuvad. [1] Sele 2.1 on näha, kuidas värvus muutub temperatuuri tõusuga. [13] Temperatuur on üks tähtsamaid parameetreid torrefitseerimise erinevates etappides. Alguses kütuse kuivatamisel, hiljem torrefitseerimisel ja lõpuks jahutamisel omab temperatuur väga suurt mõju kogus protsessis.



Sele 2.1 Temperatuuri mõju torrefitseeritud männilaastule. (a) Toores puit, (b) 225 °C, (c) 250 °C, (d) 275 °C ja (e) 300 °C.

Mida kõrgem on torrefitseerimise temperatuur, seda rohkem lenduvaid ühendeid tekib. Sele 2.2 kujutab torrefitseerimisel saadud saagise jaotumist.



Sele 2.2 Kase torrefitseerimisel saadud saagise jaotumine

Lisaks tahkele jäägile tekivad torrefitseerimisel kondenseeruvad ja mitte-kondenseeruvad gaasid. Äädikhape (CH_3COOH) ja veeaur on peamised kondenseeruvad gaasid, väiksemas mahus tekib tõrvakomponente, sipelghapet (HCOOH), metanooli (CH_3OH), piimhapet ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$), fenooli ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$). Mittekondenseeruvad gaasid on CO ja CO_2 . [11]

2.2.2 Hapniku kontsentratsioon

Teine tähtis aspekt torrefitseerimisel on hapniku kontsentratsioon reaktsiooni käigus. Hapniku protsent torrefitseerimise käigus suurendab põlemise reaktsioone, kus süsinik

muutub suitsugaasideks selle asemel, et jääda tahkesse vormi. Lisaks tõstab see protsessi temperatuuri, mistõttu on vajalik välistada hapniku ligipääs torrefitseerimisprotsessile. [1]

Mõned uuringud näitavad, et protsessi toimumine täiesti hapnikuvabas keskkonnas ei ole oluline. Tuuakse välja, et see võib isegi torrefitseerimisele kasuks tulla. [3] Hapniku kontsentratsioon mõjutab torrefitseerimisprotsessi temperatuuri ning lõppsaagise omadusi. Enamasti torrefitseeritakse hapniku juuresolekuta, et vältida temperatuuri tõusu, mille tõttu ei jää kütus tahkesse vormi.

2.2.3 Protsessi ajakulu

Lähteaine viibimisaeg reaktoris on tähtis parameeter reaktori projekteerimisel. Võrreldes teiste termokeemiliste protsessidega, nagu näiteks põlemine, gaasistamine või pürolüüs, kestab torrefitseerimisprotsess suurusjärgu võrra kauem [1] Tüüpiline kuumutamisaeg torrefitseerimisel on väiksem kui 50 °C/min. [3]

Võrreldes temperatuuriga, ei ole aeg samavõrra oluline parameeter, kuid ta mõjutab siiski torrefitseerimisprotsessi tulemust, nagu illustreerib Sele 2.2. [1] Torrefitseerimisel muutub materjali struktuur, mille tulemusena on ta rabedam ja hapram, tulenevalt hemitselluloosi depolümeerisatsioonist. See võimaldab kergemini ja väiksemate energiakuludega materjali peenestada. [11] Protsessi ajakulu määrab torrefitseeritud biokütuse süsinikusisalduse ja hüdrofoobsuse. Mida pikemat aega torrefitseerida, seda rohkem kütus hakkab sarnanema kivisöele. Samuti kui soovitakse biomassile hüdrofoobseid omadusi, siis tuleb kütust kauem torrefitseerida. Kui see ei ole eesmärk, siis piisab ka lühemast ajast.

2.2.4 Osakeste suurus

Soojusallikat on vaja, et eelkuumendada, kuivatada ja vähendada lenduvust enne torrefitseerimist. Vajalik soojushulk sõltub biokütuse osakeste suuruselt, kujult ja omadustest. Kõik need parameetrid mõjutavad konvektiivset kui juhtivat soojusülekannet nii reaktorilt biokütusele kui ka biokütuse sees. Mida väiksem tükisuurus, seda kiiremini osakene kuumeneb ja saavutab soovitud temperatuuri. Tolmuks jahvatatud tükisuuruse korral ei ole osakese pinnal ja tsentris toimuvatel protsessidel olulist ajalist vahet, halupuidu korral on

pealne pind juba põlenud, kui sisemine osa anisotroopsete ja heterogeensete omaduste tõttu alles kuumeneb. [1]

Väikesed osakesed kuumenevad torrefitseerimisel kiiremini ja võrreldes suuremate osakestega, on ka nende massikadu suurem, sest protsessi kiirem kulgemine põhjustab lenduvate ainete intensiivsema eraldumise.[1] Tabel 2.3 kujutab protsessi kestuse lühendamist hapnikurikka keskkonna mõjul.

Tabel 2.3 Protsessi kestuse lühendamine hapnikurikka keskkonna mõjul

	Hapniku kontsentratsioon keskkonnas (vol. %)				
	0	3	6	10	21
Aeg, kui lõppsaagiseks on 70% tahket ainet (sek)	2640	1690	1540	1260	840
Tahke aine sisaldus 2640 sekundil (%)	70	61,4	56,8	48,6	42,4

2.2.5 Reaktori tüüp

Torrefitseerimisseadmed jaotatakse kahte klassi:

- Otsene kuumutamine
- Kaudne kuumutamine

Kõige levinumad reaktoritüübid on:

- Liikuva kihiga reaktor
- Tigukonveieriga reaktor
- Mikrolainereaktor
- Keevkihtreaktor
- Hüdrotermiline reaktor
- Pöörleva trumliga reaktor

Kütuse liikumine, keskkonna ja soojusülekanne mehhanismid on reaktorite korral kõige olulisemad eristustunnused. Need omadused määravad torrefitseeritud toote iseärasused ja ka torrefitseerimise kestuse. [1] Reaktorite eelised ja piirangud on toodud Tabel 2.4.

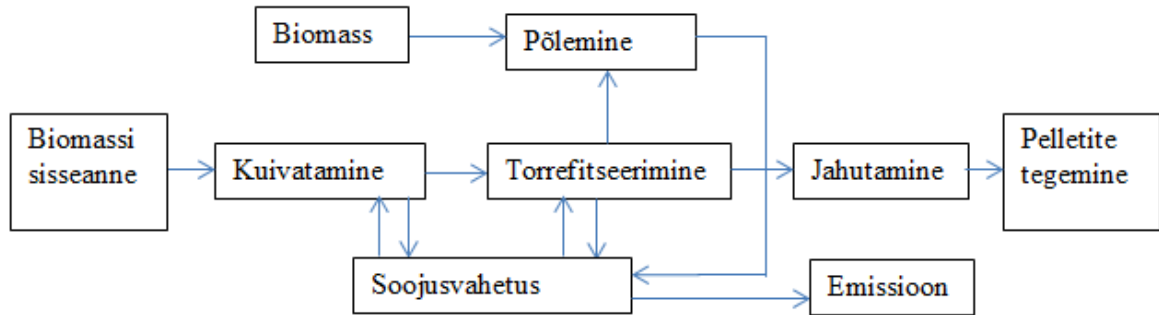
Tabel 2.4 Eelised ja puudused erinevatel torrefitseerimise reaktoritel

Reaktori tüüp	Eelised	Piirangud
Pöörlev trummel	• Lihtne tehnika	• Madal soojusülekanne

	<ul style="list-style-type: none"> • Madal rõhulang • Võimalik nii otsene kui ka kaudne küte 	<ul style="list-style-type: none"> • Keeruline mõõta ja kontrollida temperatuuri • Väiksem kolbvool võrreldes teiste reaktoritega • Suurem süsteemi suurus • Vajalik on trumli tihend • Süsteemi on raske suurendada
Liikuva kihiga	<ul style="list-style-type: none"> • Lihtne reaktor keerukuseta ehitus • Väga hea soojusülekanne • Suur kihi tihedus 	<ul style="list-style-type: none"> • Oluline rõhulang • Raske kontrollida temperatuure
Kruvi tüüpi reaktor	<ul style="list-style-type: none"> • Võimalik saavutada kolbvoolamine • Hea tehnoloogia 	<ul style="list-style-type: none"> • Ainult kaudne kuumutamine • Ebaühtlane kuumutus • Madal soojusülekanne • Süsteemi raske suurendada • Vajalik võlli tihendamine
Herreshoffi ahi	<ul style="list-style-type: none"> • Tõstatud seadme disain • Võimalik süsteemi suurendada • Lähedane kolbvoolule • Hea temperatuuri- ja ajakontroll • Võimalik lisada lisandeid peenestatud kujul 	<ul style="list-style-type: none"> • Madalam soojusülekanne võrreldes teiste otsekuumutusreaktoritega • Suhteliselt suured reaktorid • Vajalikud on võlli tihendid
Keevkiht	<ul style="list-style-type: none"> • Suhteliselt hea soojuslähikanne võrreldes teiste reaktoritüüpidega • Lihstalt reguleeritav 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaja väiksemaid osakesi • Vajab toetavat gaasisüsteemi, mida kasutatakse keevkihi tekitamiseks • Võimalik osakeste peeneks jahvatamine keevkihis • Rakse saavutada kolbvoolamist
Toroidkihtreaktor [19]	<ul style="list-style-type: none"> • Puuduvad liikuvad osad • Võimalus kontrollida toodetavad toodangut • Skaleeritav tehnoloogia • Lühikene protsessi ajakulu 	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrge temperatuur • Mahulise reaktori võimsus on piiratud

2.3 Torrefitseerimisprotsessi diagramm

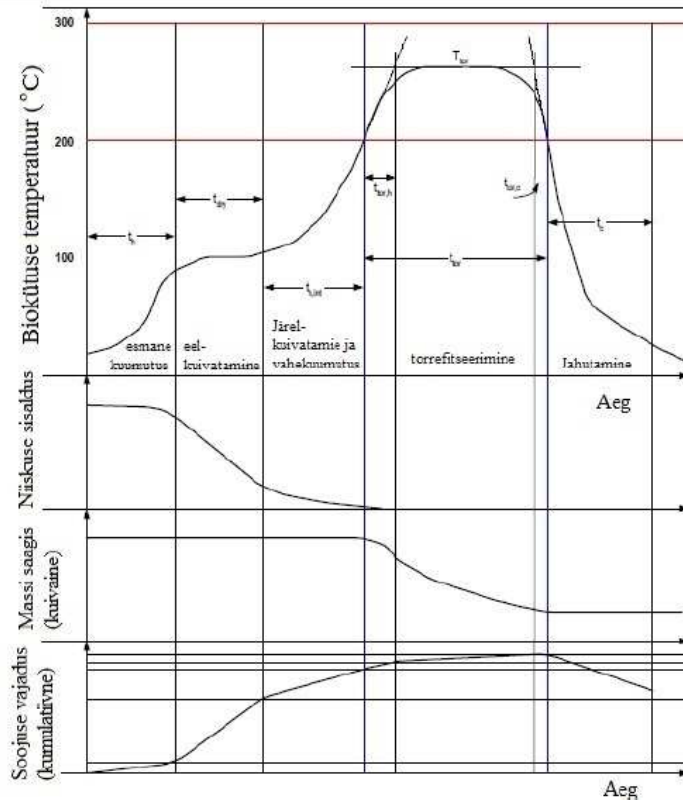
Kuigi on erinevaid võimalusi protsessi läbiviimiseks sõltuvalt seadetest, siis põhilised ideed torrefitseerimiseks on samad ja toodud Sele 2.3. [15] Esimene etapp peale kütuse etteannet on biomassi kuivatamine, mille käigus eemaldatakse suuremosa niiskusest. Sealt liigub kütus torrefitseerimisreaktorisse, kus parandatakse kütuse omadusi. Viimane etapp on biokütuse jahutamine.



Sele 2.3 Ülevaade torrefitseerimisprotsessi diagrammist

Torrefitseerimisprotsessi võib jagada viide etappi. [2] Graafiliselt on toodud viis etappi Selel 2.4:

1. Esmane kuumutamine: biomassi kuumutatakse, kuni algab kuivamine ehk selle faasi jooksul tõstetakse temperatuuri, kuni niiskus hakkab aurustuma. [11] Mõne reaktori puhul võib kuivatamisprotsessi vahele jätta, kuna see toimub torrefitseerimisprotsessi ajal. Selliseks on Wyssmonti protsess, kui kuivatamist ei toimu.
2. Eelkuivatamine: 100 °C juures aurustub nn vaba vesi konstantsel temperatuuril.
3. Järelkuivatamine ja vahekuumutus: biomassi temperatuuri tõstetakse kuni 200 °C-ni. Füüsiliselt seotud vesi vabaneb. Selle faasi jooksul võib ka toimuda kergemate fraktsioonide lendumine.
4. Torrefitseerimine: selle faasi juures toimub torrefitseerimine ise. Torrefitseerimine algab 200 °C juures ja lõpeb, kui jahutamise tulemusena on temperatuur langenud uuesti 200 °C-ni.
5. Tahke produkti jahutamine: Torrefitseeritud kütus jahutatakse maha 200 °C juures soovitud temperatuurini, milleks on üldjuhul ruumitemperatuur. [11]



Sele 2.4 Torrefitseerimise kuumutusfaasid ja jahutamine.

2.3.1 Kuivatamine

Eelkuivatamine

Eelkuivatamine on esimene etapp protsessis, kus biomass kuumutatakse toatemperatuurilt kuivatamistemperatuurile, mis on ligi 100 °C. See temperatuur saavutatakse aeglases tempos. [3] Paralleelselt toimub järkjärguline massi (märja massi) kahanemine tulenevalt niiskuse eemaldumisest. Temperatuuri mõõdetakse biokütuse tuumast, kuid väliskihid kuumenevad ja kuivavad kiiremini. [16]

Kuivatamine

Kuivatamine on kõige energiakulukam etapp torrefitseerimisel, eriti kõrge niiskusega biokütuse korral, kuna selles etapis toimub niiskuse aurustumine. Selles etapis muutub temperatuur vähe. Temperatuur on konstantne, kuni pinnaniiskus või vaba vesi on ära aurustunud. Pärast seda hakkab temperatuur tõusma. Mida kõrgemale temperatuur tõuseb, seda vähem niiskust jääb kütusesse. Etapi läbimisel on kütus täielikult kuivanud. [3] Olenevalt kütuse niiskusesisaldusest nõuab see etapp kõige suuremat soojuskoormust. [16]

Järelkuivatamine

Peale biomassi kuivatamist on seda vaja kuumutada torrefitseerimistemperatuurini. Selleks on enamasti 200 °C, kuna madalamal temperatuuril ei toimu biokütuses muutusi. Etapi jooksul eraldub biomassist kogu füüsiliselt seotud niiskus koos väiksemate fraktsioonidega. [3]

2.3.2 Torrefitseerimine

Torrefitseerimise etapp on peamine etapp kogu protsessi juures, kus toimub põhiosa depolümeerisatsioonist. Teatud aja tagant tuleb tagada nõutav temperatuur depolümeerisatsiooni jaoks. Torrefitseerimise tase sõltub nii reaktsiooni temperatuurist kui ka ajast, mille jooksul biokütus läbib torrefitseerimisprotsessi. Mida lähedasem on temperatuur 300 °C-le ja pikem on aeg, seda paremad omadused kütus saavutab. Seda aega kutsutakse protsessi ajakuluks. [3]

Torrefitseerimise algusaega tuleks hakata lugema hetkest, kui biokütuse temperatuur tõuseb 200 °C-ni. Madalamal temperatuuril toimub ainult kütuse kuivamine. Torrefitseerimisprotsess on eksotermiline 250-300 °C juures. Kui soojuskadu mitte arvestada, nõuab torrefitseerimise protsess väga vähe energiat. Praktikas võib tekkida vajadus lisasoojuse järele, et kompenseerida vältimatut soojakadu reaktoris. [3]

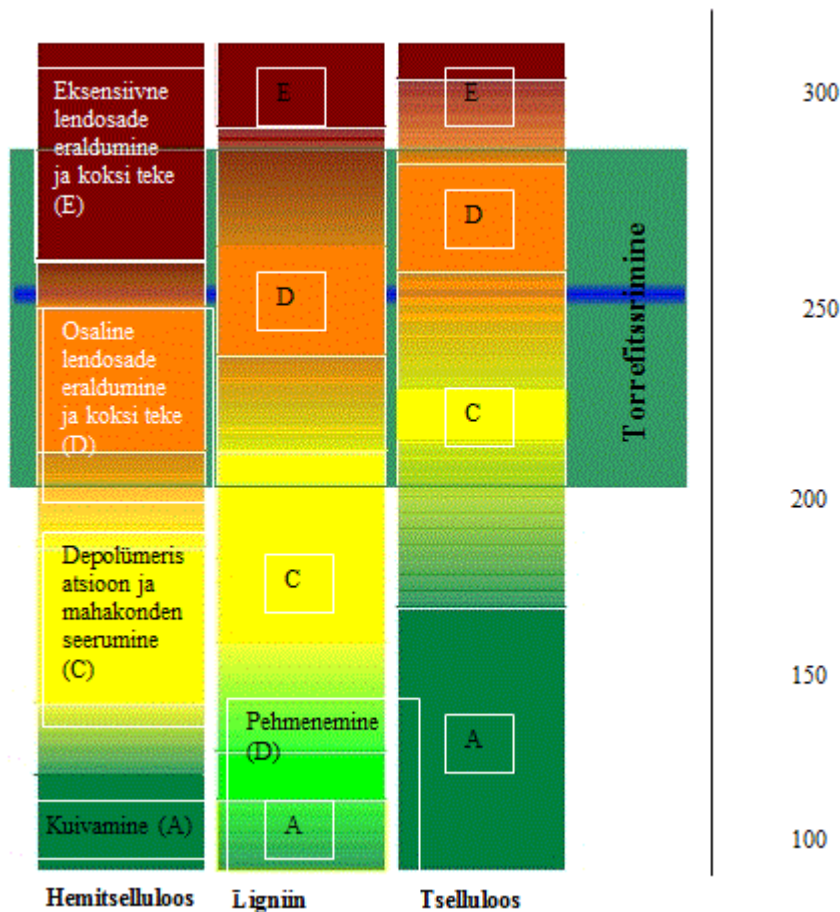
2.3.3 Jahutamine

Biomass väljub seadmest torrefitseerimistemperatuuril, mis ületab vähesel määral vastava kütuse süttimistemperatuuri. Kuuma biomassi käsitlemine on ohtlik ning see võib kokkupuutel õhuga süttida. [3] Järgnevate protseduuride teostamiseks peab produkt jahtuma vähemalt 80 °C-ni. [16] Mikrolainetel töötaval reaktoril ei ole jahtumine vajalik, sest toode väljub protsessist juba piisavalt madalal temperatuuril.

2.4 Torrefitseerimise mehhanism

Puitunud ja rohtne biomass koosneb kolmest polümeersest struktuurist, mis kokku moodustavad lignotselluloosi: tselluloos, hemitselluloos ja ligniin. Torrefitseerimise käigus toimuvad lähteaines erinevad keemilised reaktsioonid. [17] Sele 2.5 on kujutatud füüsikalise-keemilised nähtused lignotselluloosse materjali kuumutamisel torrefitseerimisel kasutatavatel temperatuuridel. Termokeemilised muutused biokütuses torrefitseerimisel võib jagada viide režiimi. [3]

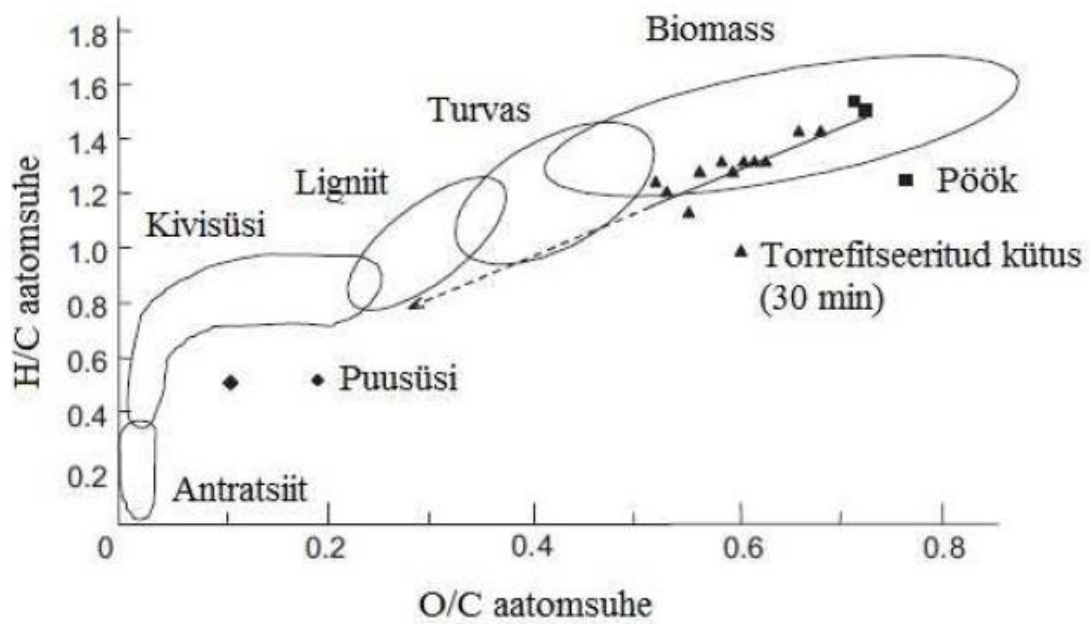
1. Režiim A (50-120 °C) – Mittereaktiivne kuivamine, kus aurustub kogu füüsiline niiskus biokütusest, aga keemiline koostis ei muutu. Kütus tõmbub kokku, aga kokkupuutel niiskusega võib taastuda endine mahulisus.
2. Režiim B (120-150 °C) – Režiimis eraldatakse ligniin, mis on läbinud pehmendamise ja millest on saanud sideaine.
3. Režiim C (150-200 °C) – Reaktiivse kuivamise režiim, mis põhjustab biomassis pöördumatuid struktuuri deformatsioone. Selles etapis purunevad vesiniku ja süsiniku sidemed ning algab hemitselluloosi depolümerisatsioon. [17]
4. Režiim D (200-250 °C) – Tuntakse nime all „hävitav“ kuivatamine. Režiim D ja E kujundavad torrefitseerimispiirkonna hemitselluloosile. Seda režiimi iseloomustab hemitselluloosi piiratud aurustumine, mille tulemusena laguneb inter- ja intramolekulaarne vesinik ning C-C ja C-O sidemed moodustavad kondenseerunud vedelikud ja mitte-kondenseeruvad gaasid. [5]
5. Režiim E (250-300 °C) – Viimane režiim torrefitseerimisprotsessis. Toimub hemitselluloosi lagunemine lenduvateks ja tahketeks osadeks. Ligniin ja tselluloos lagunevad ainult piiratult lenduvateks osadeks ja karboniseeruvad. Selle tagajärjel on biomassi struktuur täiesti lõhutatud, mis muudab biokütuse rabedaks ja kiuliseks.



Sele 2.5 Füüsikalised-keemilised nähtused lignotselluloosse materjali kuumutamisel torrefitseerimisel kasutatavatel temperatuuridel

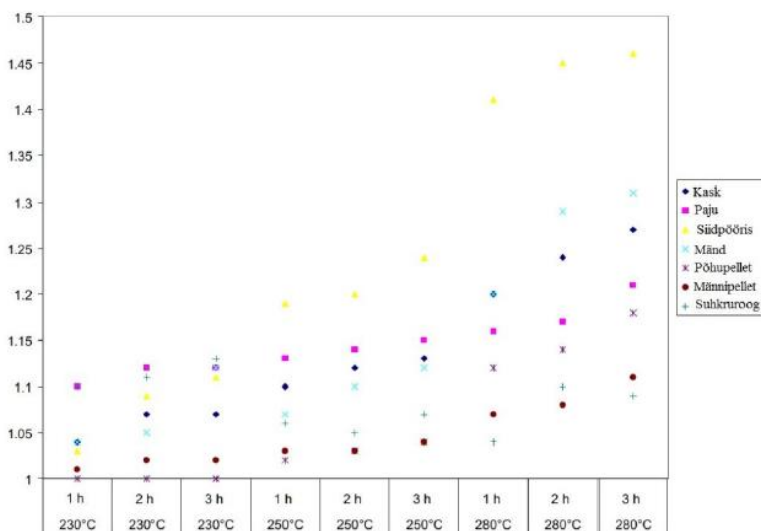
2.5 Massi ja energia bilanss

Torrefitseerimise tulemusel saadud tootel võivad olla erinevad omadused, olenevalt torrefitseerimise tingimustest, nagu näiteks temperatuur, protsessi ajakulu ja kasutatud kütus. Sele 2.6 kujutatakse mõningaid enamkasutatud taastuvaid ja taastumatu kütuseid. [18] Van Kreveleni diagramm annab informatsiooni keemilise koostise muutustest. On selge, et biomass sisaldab rohkem hapnikku kui fossiilsed kütused. Sele 2.6 võib näha, et torrefitseerimise käigus muutuvad biomassi omadused kivisöe omaduste suunas. [11] Torrefitseerimisel on suur mõju, kuna sellega eraldatakse hapnik tahkest biomassist. On näha, et biomass kaotab rohkem hapnikku ja vesinikku ning süsiniku kontsentratsioon suureneb. [18] Torrefitseerimisel suureneb materjali energiatihedus ja alaneb O/C ja H/C suhe. [11]



Sele 2.6 Van Kreveleni diagramm

Lendosade eraldumise käigus materjali energiatihedus suureneb selle tõttu, et massikadu on energiasisalduse kaoga võrreldes suurem. Seda on kujutatud Sele 2.7.

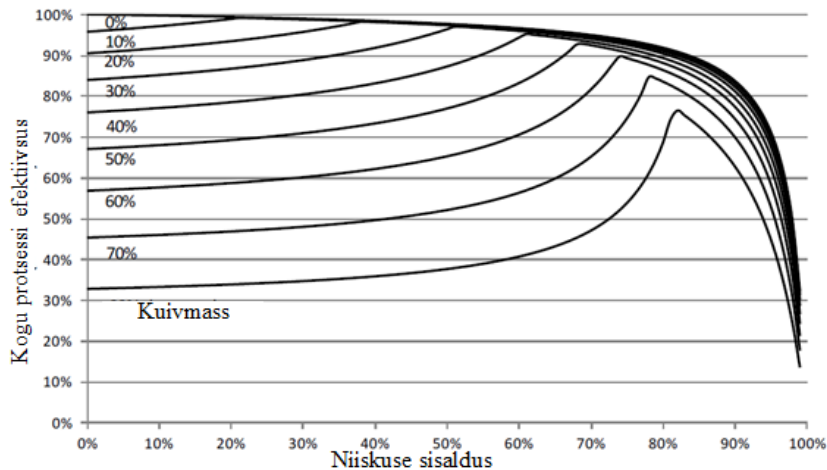


Sele 2.7 Erinevate biomasside energiatiheduse tegurid pärast torrefitseerimist

2.6 Soojuse bilanss

Termilise protsessi tõhusus sõltub lenduvate ainete eemaldamisest ja niiskusesisaldusest biomassis. [15] Sele 2.8 iseloomustab torrefitseerimisprotsessi termilist kasutegurit eeldusel, et torrefitseerimise käigus vabanenud lenduvad gaasid süüdatakse sisendbiomassi

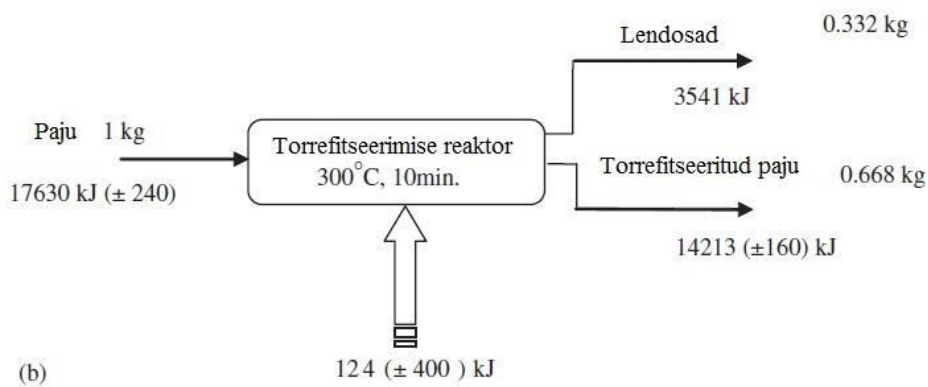
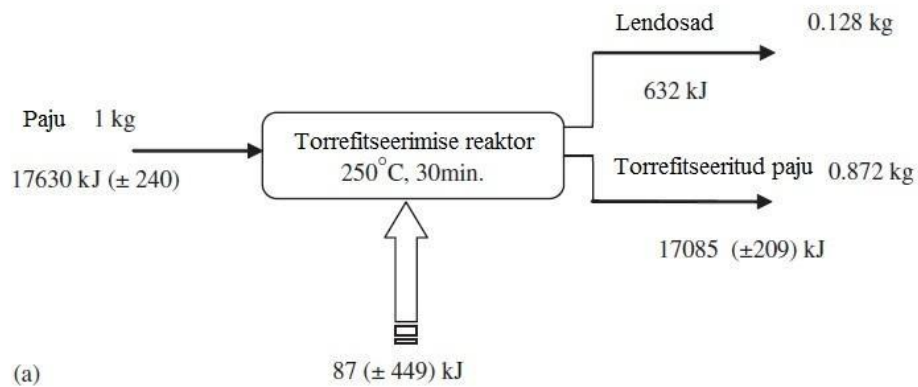
kuivatamiseks. Sele 2.8 näitab, et tüüpilistel tingimustel eemaldatakse ligikaudu 20% kuivast ainest lenduvate gaasidega. Protsessi kasutegur langeb kõrgema lenduvustaseme (üle 20-30%) ja madalama niiskusesisalduse tingimustes, kuna kuivatamiseks kulub vähem energiat ning suur osa lenduvates ainetes sisalduvast energiast jääb kasutamata.



Sele 2.8 Integreeritud torrefitseerimisprotsessi teoreetiline termiline kasutegur, lähtematerjal on puit (tuhasus 0,5%) ja soojusevajadus kuivatamiseks on 2,9 MJ 1 kg vee kohta. (Kuivati efektiivsus on 75%)

Protsessi kasutegur on madalam ka väga märja biokütuse puhul tulenevalt ebaefektiivsest ja täiendavat energiat vajavast kuivatamisprotsessist.

Eeltoodud üldistades on tüüpiline energia- ja massibilanss järgmine: 70% allesjäävast massist sisaldab 90% esialgsest energiasisaldusest. See tähendab, et energiasaagikus on 90% ja massisaagikus on 70%. Kaotatud 30% massist, mis muudetakse gaasiks, sisaldab 10% esialgsest energiast. Energiatiheduse tegur on tüüpiliselt 1,3. [11] Sele 2.9 on toodud näide üldisest torrefitseerimise massi ja energia bilansist.



Sele 2.9 Üldine torrefitseerimise massi ja energia bilanss

3 TORREFITSEERIMISE EELISED

Torrefitseerimise tulemuseks on kõrge kvaliteediga kütus või tooraine, mille omadused on võrreldavad kivisöega (Tabel 3.1). Biomassi kütteväärtuse tõus tuleneb sellest, et kütusest on kõrvaldatud niiskus ja teatud orgaanilised ühendid. Põhiline erinevus puusöega on lenduva aine kontsentratsioon. Torrefitseerimisprotsessi eesmärk on säilitada võimalikult palju lenduvat ainet kütuses.

Torrefitseeritud kütuste eelised võrreldes torrefitseerimata kütusega: [11]

- Madalam O/C suhe – kõrgem gaasistamise efektiivsus [19]
- Tükisuuruse vähendamiseks kuluv energia on väiksem (50–85%) [20]
- Põlemisgaasid on puhtamad (vähem tahma, happelisi komponente)
- Gaasistamisel saadava generaatorgaasi suurem kütteväärtus
- Väiksem vee absorbeerimise võime
- Kõrge energiasaldusega pelletite tootmise võimalus
- Erinevad lähtematerjalid omavad pärast torrefitseerimist küllalt sarnaseid füüsikalisi ja keemilisi omadusi. [12]

Tabel 3.1 Valik kütuseid, mis sobivad biokütusega koospõletamiseks.

	Puit	Puidu pelletid	Torrefitseeritud pelletid	Puusüsi	Süsi
Niiskuse sisaldus (% wt)	30-45	7-10	1-5	1-5	10-15
Alumine kütteväärtus	9-12	15-18	20-24	30-32	23-28
Lenduv aine (% db)	70-75	70-75	55-65	10-12	15-30
Süsiniku sisaldus (% db)	20-25	20-25	28-35	85-87	50-55
Puistetiheus (kg/l)	0,2-0,25	0,55-0,75	0,75-0,85	~0,20	0,8-0,85
Energiatihedus (GJ/m³) (puiste)	2,0-3,0	7,5-10,4	15,0-18,7	6-6,4	18,4-23,8
Tolm	Keskmine	Piiratud	Piiratud	Kõrge	Piiratud
Bioloogiline lagunemine	Jah	Jah	Ei	Ei	Ei

Hüdroskoopsed omadused	Hüdrofiilne	Hüdrofiilne	Hüdrofoobne	Hüdrofoobne	Hüdrofoobne
Peenestatavus	Kehv	Kehv	Hea	Hea	Hea
Käsitlemine	Eriline	Eriline	Hea	Hea	Hea
Kvaliteedi erinevus	Kõrge	Piiratud	Piiratud	Piiratud	Piiratud

Torrefitseerimise ajal jäävad kloriidi ja väävelühendite kontsentratsioonid enam-vähem samale tasemele, kuna need ühendid ei vabane nii madalal temperatuuril kui torrefitseerimisprotsess toimub. Tuhasisaldus suureneb mõnevõrra, kuna osa kuivainest läheb kaotsi protsessi käigus. Torrefitseeritud toote üks eelis on hüdrofoobsus, kuid keemiatööstus väldiks seda omadust, kuna sel juhul on lihtsam paremate omadustega kütust töödelda. Selle saavutamiseks torrefitseeritakse biomassi lühemat aega.

3.1 Alternatiivne lähteaine

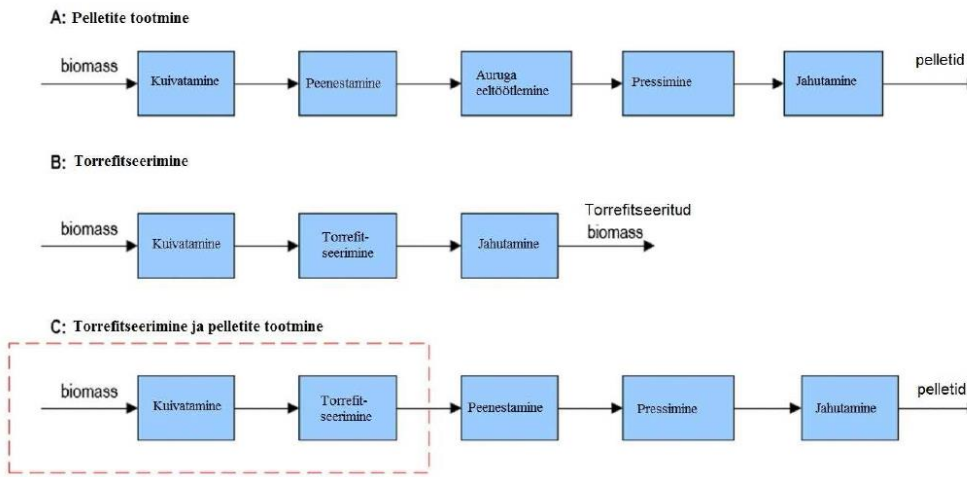
Enamikus biokütustes sisaldub hemitselluloosi ja tselluloosi polümeere. Sellepärast on võimalik torrefitseerida igasugusest lignotselluloosi sisaldavat biomassi ja mittehomogeense lähtematerjali kasutamisel saadakse suhteliselt ühtlaste omadustega toodang. Erinevate projektide käigus on testitud uusi kütuseid, mida kasutada. Hetkel proovitakse võtta kasutusele teeäärne umbrohi, põhk, hein ja muud põllumajanduslikud jäägid. Kuna kokkupuude vähem kasutatud materjalidega on väike, siis läheb nende turule toomisega aega. [15] Peale selle, et torrefitseeritud kütusest toodetakse pelletteid, võib seda kasutada keemiatööstuses lähteainena, näiteks bioetanooli tootmiseks.

3.2 Pelletite tootmine

Torrefitseeritud materjalist pelletite tootmise tingib kõrgem kütteväärtus, paremad peenestamise omadused, väiksemad ladustamis- ja transpordikulud. [11] Mahuline energiasisaldus torrefitseeritud biomassil on enam-vähem sama mis lähtematerjalil. Kokkusurumisel suureneb mahuline energiasisaldus 4-8 korda, tänu sellele saab kokku hoida transpordis ja hoiustamises. [15] Võrreldes torrefitseerimata materjalist toodetud pelletitega, imavad torrefitseeritud materjalist pelletid vähem niiskust ja omavad paremaid tugevusomadusi ning on ka suurema tihedusega. [11] Pelletiks tehtud toode tekitab vähem tolmuheitmeid, seda saab pneumaatiliselt transportida vaheladudes või kütuse

etteandesüsteemides ning võrreldes laastude ja peenestatud kütustega, on pelletid ka vähem lagunevad ja niiskust imavad. [15]

Pelletite tootmise kombineerimist torrefitseerimisega illustreerib Sele 3.1. Kombineerimise tulemusena lisandub tavapärasele pelletite tootmisele torrefitseerimise etapp ning jääb ära auruga eeltöötlemine. Torrefitseeritud pelletite energiatihedus on hinnanguliselt 1,5 kuni 2 korda suurem tavaliste pelletite energiatihedusest. [11]



Sele 3.1 Pelletite tootmine ja torrefitseerimine

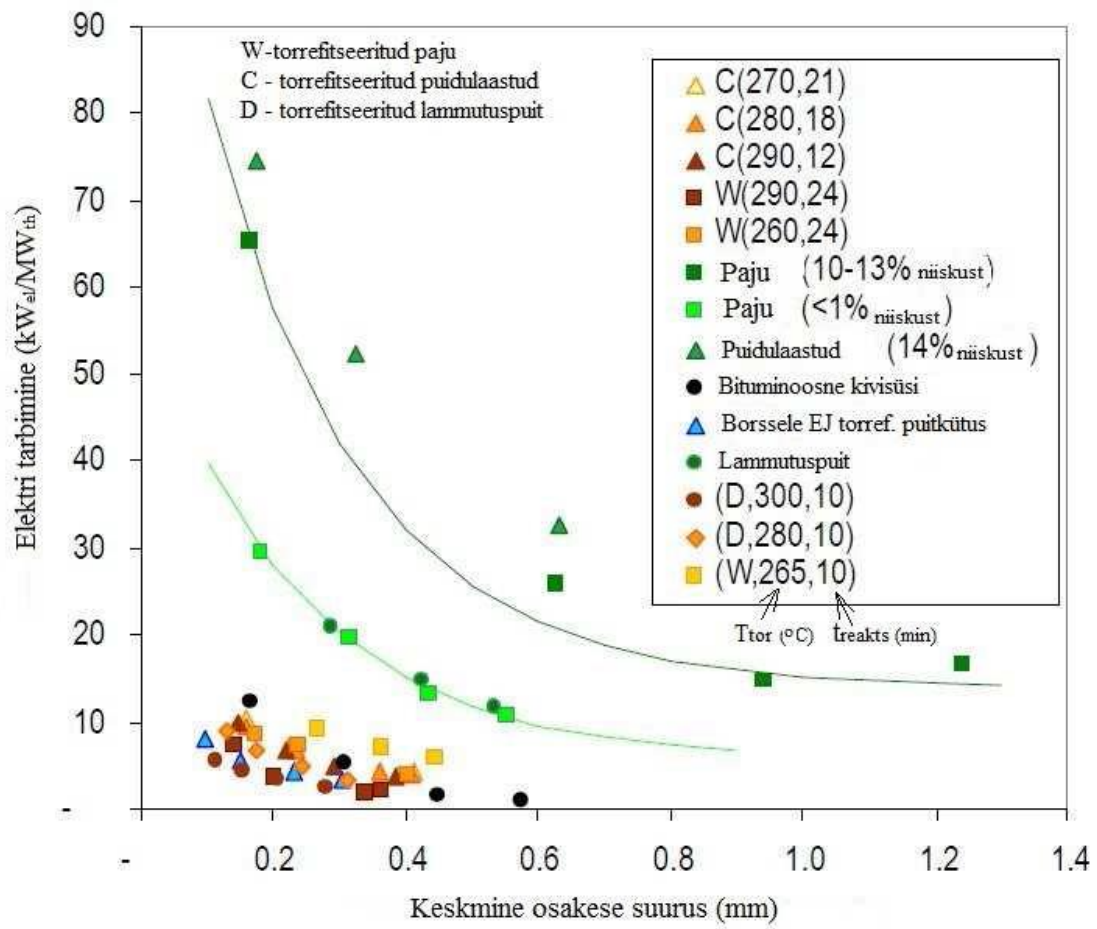
3.3 Transport

Torrefitseerimise käigus kaob põhiosa tihedusest massi vähenemise tagajärjel (emaldub niiskus ja lenduvad ained), kuid mahulisus säilib peaaegu endisel kujul. Tihendamata kujul on torrefitseerimise läbinud materjali käitlemine problemaatiline ja kulukas, peamiselt madala energiatiheduse (3 kuni $3,3 \text{ GJ/m}^3$) ja kõrgendatud tolmuemissiooni tõttu. Taolisest materjalist pelletite valmistamine leevendab neid probleeme ning muudab toote transpordi pikemate vahemaade vahel lihtsamaks. Torrefitseeritud pelletite energiatihedus on $15 - 18 \text{ GJ/m}^3$, mis on nähtavalt suurem puidupelletite vastavast näitajast $8 - 10 \text{ GJ/m}^3$. Lisaks lagunevad värskelt pressitud torrefitseeritud biomassi pelletid vähem kui puidupelletid ja oht isesoojenemisele või süttimisele on madalam. Puuduseks jääb kõrge lagunemisrisk külmutus-sulatustsüklite läbimisel.

Lähtudes praegusest majandusregulatsioonist puidupelletite turul – lisaraha, mis kulub pelletite tootmisele, kompenseeritakse transpordikulude kokkuhoiust. Põhjus on selles, et pelletid on väiksemõõtmelised, tänu millele on neid lihtsam suuremas koguses transportida. Antud probleemi ei esine juhul, kui biokütus on saadaval elektrijaama läheduses. Transportimiseks kuluv aeg ja vahemaa on seega faktoriks, kujundamaks torrefitseerimistehast. [15]

3.4 Kütuse peenestamine

Paljud ettevõtted plaanivad asendada elektrijaamades kivisöe torrefitseeritud biomassiga. Üks suurimaid väljakutseid on biomassi kasutamine koospõletamises, et tagada nõudlusele vastav võimsus olemasolevatel jahvatusseadmetel. Sobiva peenestusastme saavutamine on biomassi puhul tulenevalt tema iseloomulikust struktuurist raskendatud. Olemasolevate masinate kasutamiseks peaks biomassi energiatihedus ja peenestatavus olema sarnane kivisöele. [16] Uuringud on näidanud, et energiavajadus torrefitseeritud kütuse peenestamiseks on 80-90% väiksem võrreldes töötlemata biokütusega, see on kujutatud Sele 3.2. [11] Tavalise biokütuse peenestamiseks kasutatakse haamerveskeid, aga torrefitseeritud biomassi saab peenestada lihtsamate seadmetega. [16]



Sele 3.2 Tükisuuruse vähendamise tulemused

4 TORREFITSEERIMISE TEHNOLOOGIAD

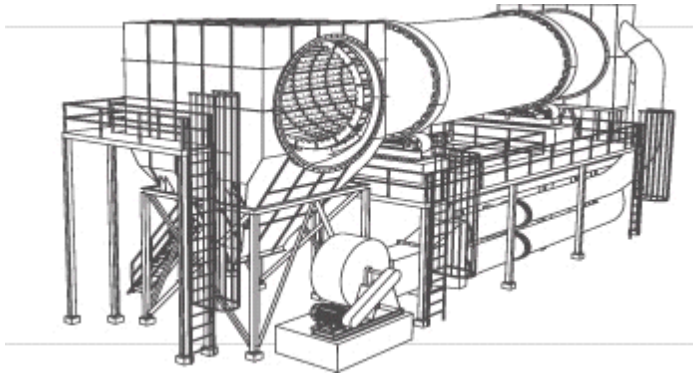
Torrefitseerimisreaktoreid on väljatöötamisel palju. Õige reaktori valik sõltub erinevatest parameetritest: tootlikkus, energiakulu ja protsessi kestvus. Tabel 4.1 toob välja ligikaudsed erinevad toodangumahud eri tüüpi reaktoritel. [14]

Tabel 4.1 Ülevaade erinevatest torrefitseerimisreaktoritest ja nende toodangumahust.

Reaktori tüüp	Reaktori tehnoloogia	Plaanitud toodang
Lintkuivati	Torr-Tech	5 t/h
	Stramproy	38 kt/a
	Eco-Pyrovac	2 t/h
Pöörlev trummel	Torr-coal	35 kt/a
	Andritz	50 kt/a
	Torkapparater	100 kt/a
Kruvikonveier	BO ₂ /ECN	5-10 kt/a
	BTG	5 t/a
Herreshoffi ahi	Wyssmont	50 kt/a
Toroidkihtreaktor	Torbed	60 kt/a
Mikrolainetel töötav reaktor	Rotawave	110 kt/a
Keevkihtreaktor	-	6 t/h

4.1 Pöörlev trummel

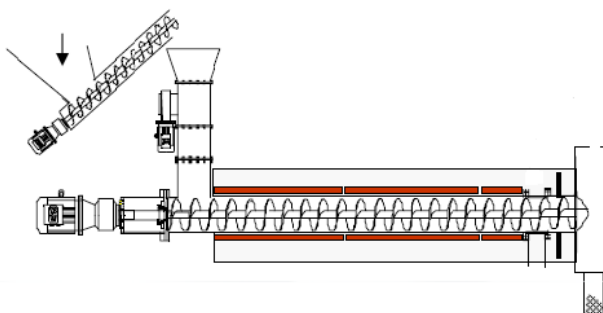
Pöörleva trumliga reaktor on torrefitseerimiseks laialdaselt kasutatud tehnoloogia. [1] Seda tüüpi reaktor koosneb pöörlevast trumlist, mis segab kütust kogu protsessi vältel kuumas inertses gaasis. Trumli pöörlemine aitab kaasa kütuse korralikule segunemisele ja soojusvahetusele, samas kütuse hõõrdumine trumli seinaga aitab kaasa peenema fraktsiooniga kütuse tekkele. Sele 4.1 kujutab pöörleva trumliga reaktori ehitust. Pöörlevat trumlit saab kuumutada kahel viisil: juhtides läbi reaktori kuuma gaasi või kuumutades trumli seinu. [22] Biomass kuumenebki trumli seintest kanduva soojuse või siis trumli sisemuses oleva kuuma soojuskandja mõjul. Soojusülekanne seinalt kütuseosakestele on peamine kontrolliv tegur, kuigi sageli arvatakse, et peamine tegur on soojusülekanne gaasilt kütuseosakestele. Biomass kuivatatakse tavaliselt eraldi kuivatis. [3] Kõige enam kasutatud pöörleva trumli reaktor on otsese kuumutamise reaktor, kus kuum gaas või aur on kokkupuutes biomassiga. Eeldusel, et reostusohut on välistatud, saab reaktorisse täiendava energiaallikana suunata ka kuumad lõõrigaasid. [5]



Sele 4.1 Pöörlev trummel reaktor

4.2 Kruvi tüüpi reaktorid

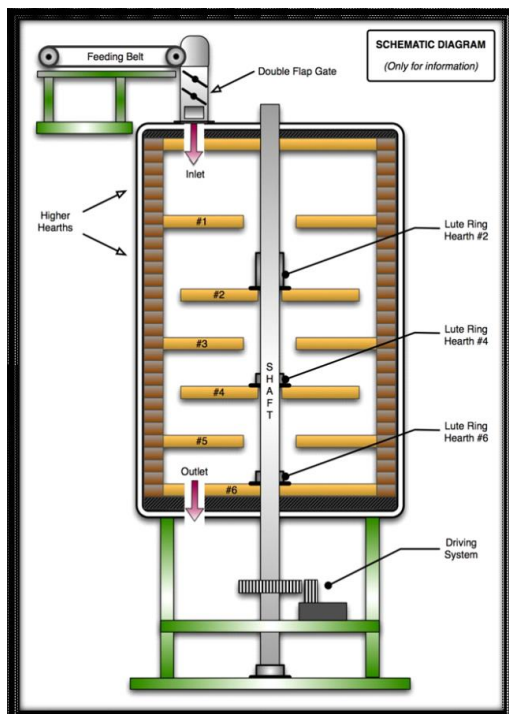
Need torrefitseerimisseadmed on statsionaarsed. [15] On ehitatud mitmesuguseid kruvi tüüpi reaktoreid erinevate materjalide ja voolukiiruste tarbeks. [5] See tehnoloogia on ennast tõestanud nii, et seadmed paigaldatakse horisontaalselt, vertikaalselt või isegi nurga all. Reaktorit kuumutatakse tavaliselt väljastpoolt, et vältida kokkupuudet kuumade gaasidega. [15] Sele 4.2 kujutab kruvi tüüpi reaktori ehitust. Kuumus jõuab biomassini tänu reaktori seinte heale soojusjuhtivusele. Soojusülekanne kütusele toimub kokkupuutel reaktori seinaga. Keerlev kruvi segab ja liigutab biomassi läbi reaktori, suurendades soojusülekannet reaktori seinaga ja biomassi vahel. Protsessi ajakulu sõltub kruvi pikkusest ja pöörlemiskiirusest. [3] Kruvi reaktorid on suhteliselt odavad, kuigi mõõtude poolest limiteeritud, sest kruvi pindala ja reaktori ruumala suhe kahaneb suuremate reaktorite puhul. Seeski on projekteeritud hästi segavaid reaktoreid, parandamaks soojusülekannet, mis muudab suuremõdulised kruvireaktorid efektiivsemaks. [15]



Sele 4.2 Kruvi tüüpi reaktor

4.3 Herreshoffi ahi

Mitme koldega ahi ehk Herreshoffi ahi koosneb paljudest ümmargustest kolletest, mis on paigutatud üksteise kohale ja ümbritsetud tulekindla teraskestaga. Sele 4.3 kujutab Herreshoffi ahju ehitust. Vertikaalne pöörlev võll katla keskel on selleks, et segada ja liigutada kütust kolletes spiraalselt. [21] Iga kihiga suureneb temperatuur järk-järgult vahemikus 220 kuni 300 °C. Biokütus sisestatakse ülevalt horisontaalsele plaadile, kust see surutakse mehaaniliselt reaktorisse. Peale seda kukub kütus läbi augu teisele plaadile, kust jällegi surutakse see läbi, et kütus kukuks kolmandale tasandile. Protsessi korratakse nii mitmel tasandil, tagades ühtlase segunemise ja järkjärgulise kuumutamise. [15]

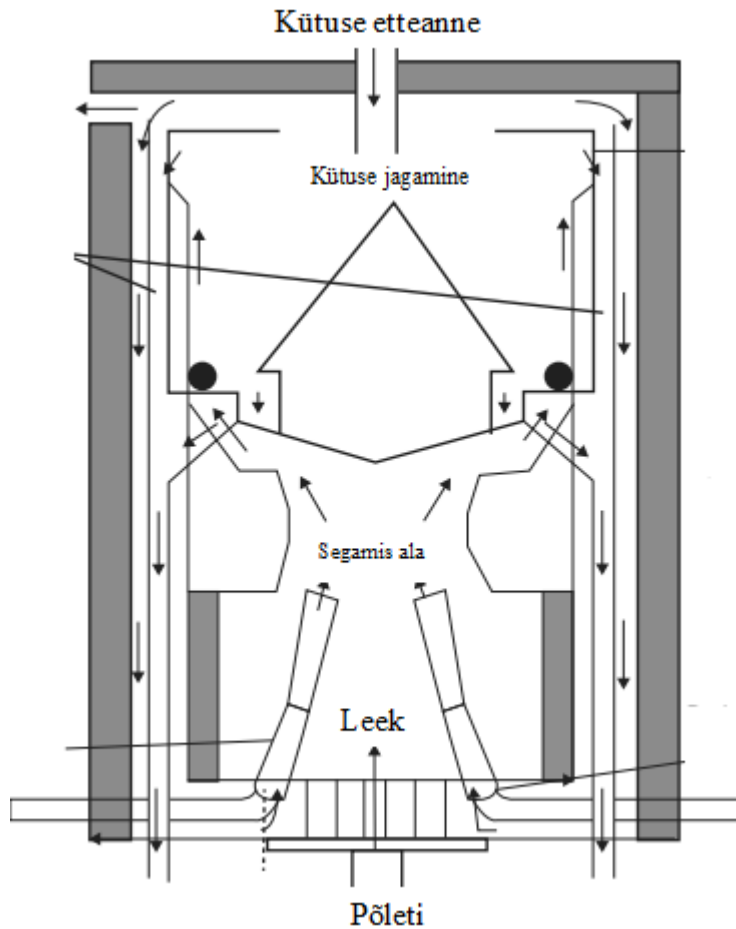


Sele 4.3 Herreshoffi ahi

4.4 Toroidkihtreaktor

Toroidkihtreaktori tehnoloogiat võib pidada ennast tõestanud tehnoloogiaks. Praeguseks on ehitatud juba 5- kuni 7-meetrise diameetriga reaktoreid. Veel hiljuti olid toroidkihtreaktorid väiksemõõdulised ja tehnoloogiat rakendati katseliselt väikeste partiidena (toodang 2 kg/h). Sele 4.4 kujutab toroidkihtreaktorlihtsustatud ehitust. Toroidkihtreaktor liigub soojuskandja suurel kiirusel (50-80 m/s) alt üles, möödudes statsionaarsetest nurga alla paigutatud labadest. See annab biomassi osakestele reaktoris nii vertikaalse kui ka horisontaalse liikumise,

tulemuseks on toroidne liikumine, mis kuumutab biomassi osakesi väljaspool reaktorit kiiresti. Suhteliselt intensiivne soojusülekanne võimaldab torrefitseerimist läbi viia lühema ajaga, umbes 80 sekundiga. Tänu sellele võib reaktor olla väikeste mõõtmetega. Intensiivne soojusülekanne võimaldab reaktorit kasutada ka tunduvalt kõrgemal temperatuuril (kuni 380 °C), mille tagajärjeks on suurem lenduvate ainete kadu. Pandlikku tehnoloogiat saab rakendada erinevate toodete valmistamisel sõltuvalt lõpptarbija vajadustest. [15]

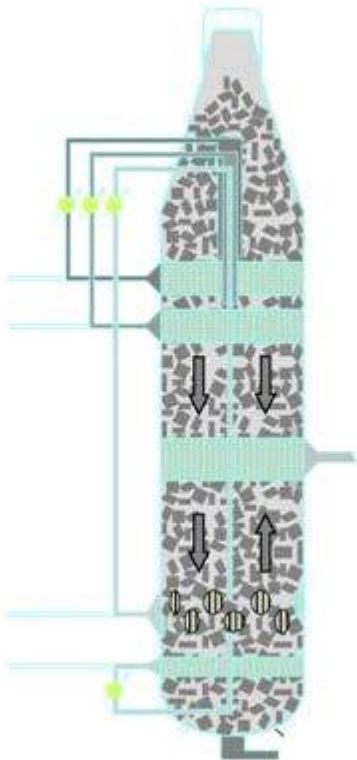


Sele 4.4 Toroidkihtreaktor

4.5 Liikuva kihiga reaktor

See on torrefitseerimiseks enim kasutatud reaktor. Reaktor koosneb kinnisest mahutist, kuhu biokütus siseneb ülevalt ja hakkab alla liikuma, samal ajal toimub torrefitseerimisprotsess reaktoris alt üles liikuva soojust kandva gaasilise aine toimel. Sele 4.5 kujutab liikuva kihiga

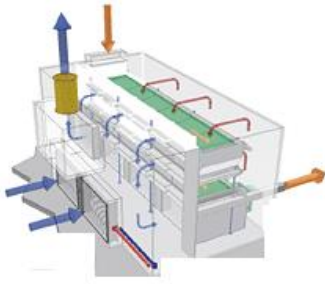
reaktorit. Reaktoril puuduvad liikuvad osad. Reaktori alt väljuvad torrefitseeritud saadused, mis jahutatakse maha. Katla ülaosast lahkuvad gaasilised lendosad. Protsessi tingimused on sarnased teiste sarnaste tehnoloogiatega. Kuluv aeg on 30-40 minutit ja temperatuur on umbes 300 °C. [15] Liikuva kihiga reaktorid on muutunud populaarsemaks tänu nende odavale maksumusele, madalale energiakulule, kõrgele soojusülekandele, temperatuuri stabiilsusele, madalale survele ja heale kolbvoolumisele. [5]



Sele 4.5 Liikuva kihiga reaktor

4.6 Lintkuivati

Lintkuivatit võib lugeda efektiivseks tehnoloogiaks biomassi kuivatamisel. Kui biokütuse osakesi transporditakse mööda linti, siis neid kuumutatakse otseselt kuumas gaasikeskkonnas. Lintkuivatireaktoris kasutatakse tavaliselt mitut linti, mis asetsevad üksteise kohal. Sele 4.6 kujutab lintkuivati ehitust. Kui biokütuse osakesed kukuvad ülemiselt korruselt alla, siis toimub kütuse segunemine, mis aitab kaasa homogeensema toote saamisele. [15]

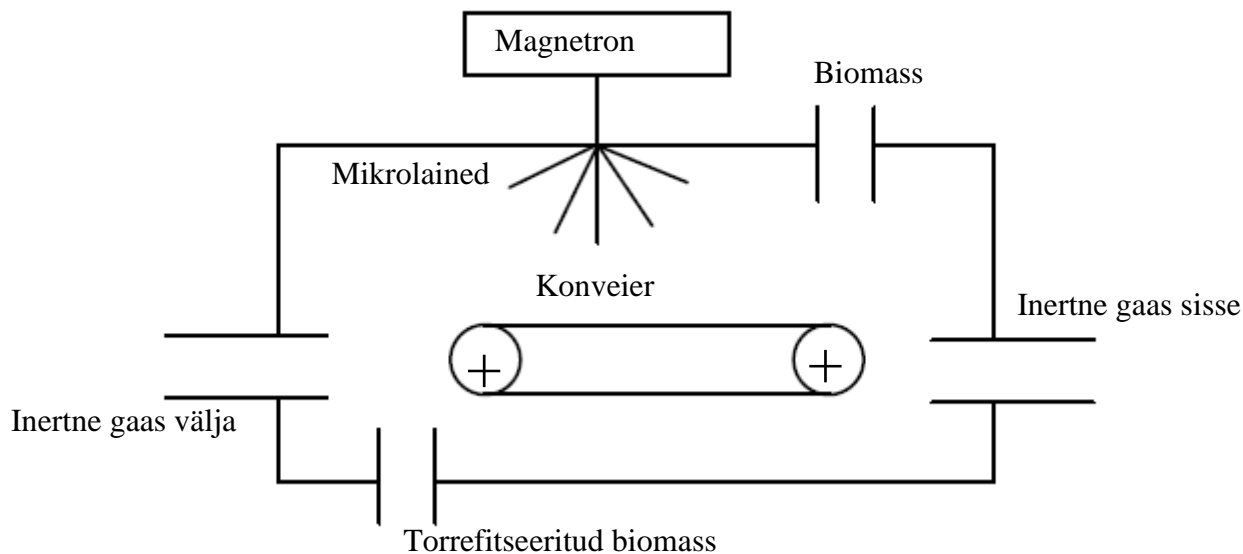


Sele 4.6 Lintkuivatireaktor

4.7 Mikrolainetel töötav reaktor

Alternatiivse võimalusena on proovitud mikrolaineid kasutades biokütuseid torrefitseerida. Sele 4.7 kujutatakse mikrolainetel töötava reaktori põhimõtteskeemi. Mikrolainetega kuumutamine on kõrge potentsiaaliga mitmesugustes keemilistes protsessides, kuna see on tänu kiirele sisemisele soojenemisele efektiivne ja sobib kasutamiseks isegi eksotermilistes tingimustes. Orgaaniliste ainete töötlemisel on mikrolainete kasutamisest saanud üks peamisi alternatiivseid energiaallikaid. Peamine puudus on see, et mikrolainete jaoks on vaja elektrit, mida ei pruugi olla võimalik toota vajalikus koguses torrefitseerimisel tekkinud gaasidest. [15] Võrreldes trummelreaktoriga, on antud reaktori energiakulu 5 korda väiksem. Eelisteks on see, et kütus väljub reaktorist 60 °C juures, seega ei ole vaja kütust peale torrefitseerimist jahutada. Protsessi eeliseks on reaktori võimekus torrefitseerida suuremõdulisi laaste.

Mikrolainetega kiiritamiseks kasutatakse elektromagnetlaineid, mis jäävad vahemikku 300 MHz kuni 300 GHz. Tüüpilised mikrolaineahjud või mikrolainereaktorid töötavad sagedusel 2,45 GHz. [1] Antud põhjusel nimetatakse seda volumeetrilise kuumutuse reaktoriks. Võrreldes tüüpiliste reaktoritega, on selle eelisteks ühtlasem kuumutamine, lühem kuumutamisaeg, kõrgem kuumutusefektiivsus, kompaktne ehitus ja parem kontrollitavus. [22]



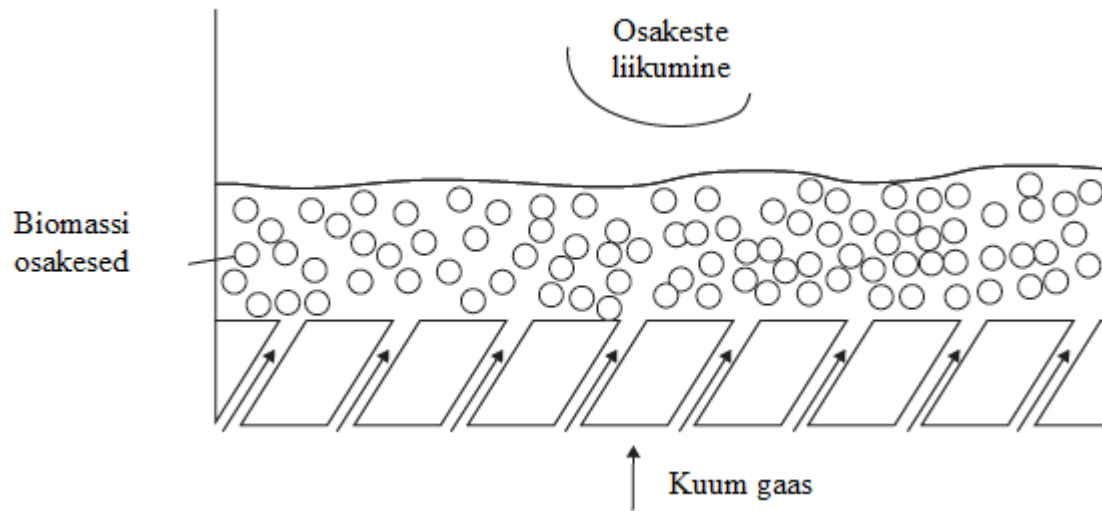
Sele 4.7 Mikrolainetel töötav reaktor

4.8 Keevkihtreaktor

Keevkihis toimub alt üles liikuva gaasi toimel tahkete osakeste kihi niinimetatud keemine – tekib pulseeriv aerodünaamiline süsteem. Sele 4.8 on toodud keevkihtreaktori põhimõtteskeem. Tüüpiliseks kihimaterjaliks on liiv. Keevkihtreaktoris puuduvad niinimetatud reaktsioonitsoonid. [11] Kui biokütuse osakesed on hästi läbisegatud, siis värske biokütus jõuab kiiremini torrefitseerimise temperatuurini. [3] Peamiseks eeliseks selle reaktori puhul on kõrge soojusülekanne koefitsient ja ühtlane temperatuur. Protsessi tulemusel saab ühtlase kõrge kvaliteediga biomassi. Mõned peamised väljakutsed sellel reaktoril on: [22]

- Biomassi osakeste keevkihistumine;
- Kihimaterjali eraldamine biomassist;
- Peente osakeste kaasahaaramine.

Keevkihi eelisteks võib lugeda kiiret kuivamist ning soojus- ja massiülekanne. Kiire kuivamine ei ole siiski alati eeliseks, kuna torrefitseerimine vajab aeglast ja kontrollitud kuivamist. [5]



Sele 4.8 Keevkihtreaktor

5 TORREFITSEERIMISE MAJANDUSLIK VÄÄRTUS

Torrefitseerimise kasumlikkuse hindamiseks peame vaatlema kogu väärtusahelat algusest lõpuni. Peamised majandusliku kasu allikad torrefitseeritud kütuste puhul on transport, ladustamine, CO₂ neutraalsus ja tootmisprotsess. Hüdrofoobsete omaduste tõttu on võimalik torrefitseeritud kütust ladustada välitingimustes. Puidupelletteid on samuti võimalik kuivas kliimas väljas hoiustada, aga torrefitseeritud pelletite eelis on see, et neid on võimalik hoiustada ka niiskemas kliimas.

Ladustamise käigus tekkiv kütusekadu vajab täiendavat uurimist, kuid selle esinemisvõimalus võib olla suurem välitingimustes. Võrreldes torrefitseeritud biomassi toore biomassiga, võib järeldada, et nende hoiustamiseks on vaja erinevaid ladustamistingimusi.

Kasutamise eelised on seotud suurema energiasisaldusega, madalama hapniku- ja niiskusesisaldusega. Võrreldes toore biomassiga, on torrefitseeritud biomassil paremad omadused põletamisel, gaasitamisel ja kütuse tootmisel. Kogu ahelas annavad kõige suurema kulude säästu täiustatud töötlemis- ja kasutusvõimalused (suurim sääst transpordikulude järel).

Torrefitseeritud biomass on kõrgekvaliteetne tahke kütus, mida saab tänu sarnastele omadustele kasutada paralleelselt kivisöega. Torrefitseeritud biomassi kasutades võimaldab teostatav gasifitseerimine lähteaine paremaid vooluomadusi, kõrgemat H₂ ja CO taset protsessist saadavas sünteesgaasis ja üleüldiselt kogu protsessi kõrgemat efektiivsust. Torrefitseerimine koos pelletiseerimisega tagab odavama kütuse nii energia kui ka teiste kütuste tootmiseks. Võrreldes biokütuse lihtsalt pelletiteks tegemisega, on kogu protsess 4-16% odavam. Torrefitseerimine võimaldab kasutada ka meritsi transporditavat biomassi – tarneahela ümberkohandamine ja toore lähteaine tsentraliseeritud töötlemine võimaldaks samuti 4-16% kokkuhoidu kogukuludes. Torrefitseerimine on lisaetapp biomassi kasutamise ahelas. Sellest lisanduv kapitali- ja opereerimiskulu, samuti töötlemiskaod on võimalik tasa teha tänu teistes etappides saavutatavale kokkuhoiule. Hiljutised uuringud näitavad, et kapitalimahutus autonoomse jaama rajamiseks võimsusega $75 \cdot 10^6$ t/aastas on vahemikus 6,1 – $7,3 \cdot 10^6$ V (V – turuväärtus). Eeldatud lähteaine on märg hakkpuit. Jaama sisseseades on biomassi kuivatamiseks kasutusel standardne pöördtrummel ning standardne peenestussüsteem koos pelletiliiniga. Kuluarvestuses ei käsitletud kuivatamiselset lähteaine ettevalmistamist (nt hakkimine). Toodangu mahul 75 kt/aastas on arvutuslikud tootmiskulud 37 V/t toodet (2,0 V/GJ), eeldusel, et kasutatakse 35% niiskusesisaldusega lähteainet. 50% ja

25% niiskusesisaldusega lähteaine kasutamisel on vastav näitaja 50 V/t (2,6 V/GJ) ja 34 V/ t (1,9 V/GJ). Niiskusesisaldus on torrefitseerimisprotsessi juures üks määravamaid parameetreid, kuna sellest sõltub suuresti protsessi energiavajadus. Siinkohal esitatud arvutuslikud kulud kehtivad torrefitseerimise puhul, kus ei ole vajalik biomassi ümber töödelda ja eelkuivatada. [5]

KOKKUVÕTE

Biomass koosneb kolmest põhilisest koostisosast: hemitselluloosist ja tselluloosist, mis annavad biomassile tugevuse, ja ligniinist, mis annab materjalile liimitavuse.

Torrefitseerimisprotsess on termokeemiline protsess, mis toimub 200-300 °C juures hapnikuvaeses keskkonnas ja atmosfäärirõhul. Torrefitseerimise võib jagada 3 järku. Esimene on kuivatamine, mis koosneb eelkuivatamisest, kuivatamisest ja järelkuivatamisest. Eelkuivatamine toimub 100 °C juures, siin eraldub pindmine niiskus. Kuivatamise protsessis tõuseb temperatuur paarkümmend kraadi ja selle eesmärk on eemaldada suuremas osas sisemine niiskus. Järelkuivatamise eesmärk on viia temperatuur torrefitseerimistemperatuurini. Teine etapp on torrefitseerimine, mille eesmärk on kütuse kütteväärtuse tõstmine ja jahvatatavaks muutmine. Kolmas etapp on jahutamine. Selles etapis jahutatakse biomass soovitud temperatuurini. Selle etapi puhul on oluline ohutusnõuete täitmine, sest lenduv tolm on kergesti süttiv.

Kütust torrefitseeritakse, kuna seda on lihtsam jahvatada ja pelletiteks teha ning odavam transportida. Kogu protsess sõltub reaktorite valikust. Torrefitseerimisreaktoreid arendatakse pidevalt ja proovitakse luua odavat tehnoloogiat, millel oleks vähe puudusi. Reaktoreid valitakse nende suuruse ja tootlikkuse järgi. Näiteks mikrolainetel töötav reaktor on kõrge tootlikkusega, aga tema hind on teistega võrreldes kallim.

Torrefitseerimine on kiirelt arenev biomassi töötlemise haru, millel on palju võimalusi. Suureks plussiks on kütteväärtuse tõus ja seda ka biomassidel, mida muidu nii ulatuslikult ei kasutata, nagu näiteks põhk ja pilliroog. Tänu sellele saab kütusele kuluva investeeringu viia alla, sest peale torrefitseerimist on kõigi kütuste omadused lähedased kivisöe omadustele. Arendamisel on peamiseks eesmärgiks tehnoloogia töökindluse suurendamine. Kui arendajad sellega hakkama saavad, siis on tõenäoline, et torrefitseerimine leiab laialdast kasutamist.

Bakalaureusetöö võib lugeda õnnestunuks, kuna korralikku ülevaadet torrefitseerimisest eesti keeles ei leidu. Lõputöö tulemusena võib järeldada, et torrefitseerimine on biomasside puhul hea väärtustamise viis, eriti madala kütteväärtustega kütustel. Edaspidi võib uurimistööd arendada reaktorite ja protsessi täpsema analüüsi suunas. Edasist uurimist vajab Eesti jaoks

sobivate seadmete väljaselgitamine koos kogu torrefitseerimist kasutava (tootmis)ahela tehnilis-majandusliku analüüsiga.

SUMMARY

Biomass consists of three major components: hemicellulose and cellulose, which provide strength, and lignin, which gives bondability. The last mentioned characteristic is very relevant for pelletizing because no additional binders are needed.

Torrefaction process is a thermochemical process that takes place at 200-300 ° C at atmospheric pressure in an oxygen-poor environment. Torrefaction can be divided into three phases. The first step is drying, which consists of predrying, drying and postdrying. Predrying takes place at 100 °C, most of the surface moisture is released here. Drying process takes place at a temperature that is a little bit higher and the goal is to remove most of the moisture inside. Post drying's goal is to bring the temperature close to torrefaction temperature. The second step is torrefaction, which is aimed to raising the calorific value of the fuel and give it grindability. The third step is cooling. At this stage, the biomass is cooled to the desired temperature. Safety requirements are essential for this step as the airborne dust is highly combustible.

Fuel is torrefied because it makes it easier to grind, turn into pellets and cheaper to deliver. The entire process depends on the choice of the reactor. Torrefaction reactors are constantly being developed to create a low-cost technology that would have fewer drawbacks. Reactors are selected according to their size and productivity. For example, microwave fueled reactor has a high throughput, but its price is more expensive compared to the others.

Torrefaction is a rapidly developing branch of biomass processing, which has a lot of options. The great advantage is the calorific value increase in biomass, which otherwise are not as widely used, such as straw and reeds. Thanks to that process costs can be reduced, because after torrefaction all fuels acquire properties similar to coal. The main development direction of this technology is to increase reliability. If this task can be handled then it is likely that torrefaction finds widespread use.

Bachelor's thesis can be considered a success, as a decent overview of torrefaction in Estonian has been lacking. The thesis leads to the conclusion that torrefaction is a good way giving value to biomass, especially for low calorific value fuels. Future research should

concentrate more on reactors and give a more thorough analysis about the torrefaction process.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Nhuchhen, D.R., Basu, P., Acharya, B. (2014) A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. - International Journal of Renewable Energy & Biofuels, Vol. 2014, 1-56
- [2] Saarman, E., Veibri, U. Puiduteadus. Tartu. Vali Press OÜ, 2006
- [3] Basu, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Practical Design and Theory. Elsevier, 2013.
- [4] Reiska, R. Tselluloosi tehnoloogia. Tallinn, 2011
- [5] Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, J.R., Wright, C.T., Boardman, R.D. (2011) A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications - Industrial Biotechnology, Vol. 7 No. 5, 384-401
- [6] Rowell, R.M. Handbook of wood chemistry and wood composites. Second Edition. CRC Press, 2013
- [7] Puidu keemiline koostis [WWW] <http://www.tallnerk.ee/?224> (01.05.2014)
- [8] Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., Boerjan, W. (2010) Lignin Biosynthesis and Structure – Plant Physiology, Vol. 153, 895-905
- [9] Brebu, M., Vasile, C. (2009) Thermal degradation of lignin – a review - Cellulose Chemistry and Technology, 44(9), 353-363
- [10] Dahlquist, E. Technologies for Converting Biomass to Useful Energy. Series: Sustainable Energy Developments 4. CRC Press, 2013
- [11] Link, S. Biomassi termokeemiline muundamine
- [12] M.J.C. van der Stelt, H. Gerhauser, J.H.A. Kiel, K.J. Ptasinski. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. Biomass and bioenergy 35 (2011)
- [13] M. Phanphanich, S. Mani. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. Bioresource Technology, 2011
- [14] B. Batidzirai, A.P.R. Mignot, W.B. Schakel, H.M. Junginger, A.P.C. Faaij. (2013) Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. – Elsevier., 1-19, [Online] Energy (15.05.2014)
- [15] Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S., Madrali, S. (2012) Status overview of torrefaction technologies. – IEA Bioenergy Task 32 raport, Final Report, 1-54
- [16] Dhungana, A. Torrefaction of Biomass. (2011)
- [17] Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R., Kiel, J.H.A. (2005) Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations

- [18] van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A., Ptasiński, K.J. (2011) Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. – *Biomass and Bioenergy*, Vol 35 (9), 3748–3762
- [19] Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. From coal to biomass gasification: comparison of thermodynamic efficiencies. In: Houbak N, Elmgaard B, Qvale B, Moran MJ, editors. *Proceedings of the 16th international conference on efficiency, costs, optimization, simulation and environmental impact of energy systems (ECOS 2003)*, Copenhagen, Denmark, 2003. p. 1097–103.
- [20] Bergman PCA, Boersma AR, Kiel JHA, Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. Torrefaction for entrained flow gasification of biomass. In: Van Swaaij WPM, Fjaellstroöm T, Helm P, Grassi A, editors. *Second world biomass conference*, Rome, Italy. ETA Florence and WIP-Munich, 2004. p. 679–82
- [21] Multiple Hearth Furnaces [WWW]
http://www.fgcgroupllc.com/multiple_hearth_furnaces.html (29.04.2014)
- [22] Luo, X. Torrefaction of biomass – A comparative and kinetic study of thermal decomposition for Norway spruce stump, poplar and fuel tree chips. SLU (2011)