

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma
Diplomityö

Hannu Sarvelainen

LÄMPÖYRITTÄJÄKONSEPTI BIOTUOTTEELLE

Työn tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen
 Dosentti Juha Kaikko

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Hannu Sarvelainen

Lämpöyrittäjäkonsepti biotuotteelle

Diplomityö

2011

81 sivua, 8 taulukkoa, 44 kuvaa ja 8 liitettä

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen
Dosentti Juha Kaikko

Hakusanat: torrefiointi, laboratoriokoe, liikeidea
Keywords: torrefaction, laboratory test, business idea

Fossiilisista polttoaineista aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä yritetään vähentää muun muassa lisäämällä uusiutuvien polttoaineiden käyttöä. Kiinteän biomassan ominaisuudet eroavat fossiilisesta kivihiilestä kuitenkin niin paljon, ettei biomassalla voida suoraan korvata kivihiiltä. Biomassan lämpökäsittely muuttaa sen ominaisuuksia kivihiilen kaltaiseksi, jolloin sillä on mahdollista korvata kivihiiltä. Tässä diplomityössä on tutkittu biomassan lämpökäsittelyä eli torrefiointia.

Työn lähtökohtana on luoda pohjaa liikeidealle, jossa torrefioitua biomassaa tuotetaan pienissä lämpölaitoksissa lämmöntuotannon ohella. Työ sisältää laboratoriokokeita, joissa tarkastellaan käytännön kokeilla biomassan torrefioinnissa tapahtuvia ominaisuuksien muutoksia. Biomassan torrefiointiin suunnitellaan lisäksi pientä koelaitetta, jonka kokoa on mahdollista suurentaa jatkossa lämpölaitoskokoluokkaan asti. Torrefioidun biomassan tuotantokustannuksia on tarkasteltu laiteinvestointien, raaka-aine- sekä käyttökustannuksien kautta.

Laboratoriokokeiden perusteella on saatu tuloksia optimaalisista toiminta-arvoista lämpökäsittelymenetelmille. Lämpöyrittäjälle on luotu perustoiminta-ajatus torrefioidun biomassan tuotannolle, jossa on tarkasteltu myös tuotannon kannattavuutta. Tämä työ antaa pohjaa aiheen jatkotutkimukselle ja -kehitykselle.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Energy Technology

Hannu Sarvelainen

Biomass Upgrading Concept for Heat Entrepreneur

Master's thesis

2011

81 pages, 8 tables, 44 figures and 8 appendices

Examiner: Professor, D. Sc. (Tech.) Esa Vakkilainen
Docent, D. Sc. (Tech.) Juha Kaikko

Keywords: torrefaction, laboratory test, business idea

Carbon dioxide emissions, which are caused by fossil fuels, is tried to reduce by increasing the use of renewable fuels. The physical properties of the solid biomass differ from the fossil coal so much, that biomass cannot directly replace coal. The heat treatment of biomass changes biomass properties to the coal-like, in which case it is possible to replace coal. This thesis deals biomass heat treatment, torrefaction.

The objective of the work is to create a base for a business idea, where torrefied biomass is produced in small heating plants in addition to heat production. The work includes laboratory tests, which examine the practical experiment with biomass torrefaction occurring changes in the properties. In addition there is a planning for a small test facility, whose size is possible to increase in future. The production costs of torrefied biomass have been considered from investment in equipment, raw material and operating costs.

Laboratory test gives results for optimal heat treatment methods. Heat entrepreneur has gotten the basic business idea for production of torrefied biomass, which also examines the profitability of production. This thesis gives the base of the topic for further research and development.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston BIOTULI-tutkimushankkeessa 21.12.2010–18.5.2011. Käytännön kokeet on suoritettu Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratoriossa.

Kiitän erityisesti työni ohjaajia professori Esa Vakkilaista Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta sekä lehtori Risto Korhosta Kymenlaakson ammattikorkeakoulusta.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani ja veljeäni taustatukena olemisesta.

18.5.2011

Hannu Sarvelainen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tausta	9
1.2 Tavoitteet ja rajaus	9
1.3 Työn toteutus	9
1.4 Työn rakenne	10
2 TAUSTAA HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖISTÄ	10
3 BIOMASSAN JALOSTAMINEN	12
3.1 Yleisimpiä Suomessa käytettäviä biomassoja	13
3.2 Biomassan koostumus ja ominaisuudet	17
3.3 Jalostamisen historiaa	19
3.4 Nykyaikaisia jalostustuotteita	21
4 TORREFIOINTI	21
4.1 Torrefioidun biomassan ominaisuuksia	21
4.2 Torrefioinnin tavoitteita	22
4.3 Biomassassa tapahtuvia reaktioita	23
4.4 Torrefiointimenetelmä	24
4.4.1 Suora kytkentä	25
4.4.2 Epäsuora kytkentä	26
4.5 Torrefioinnin etuja	27
4.6 Torrefioinnin haasteita	32
4.7 Kivihiilen ja biomassan ominaisuuksien vertailua	33
4.8 Laitteistoja maailmalla	36
5 TORREFIOINTIKOKEITA	39
5.1 Tarkoitus	39
5.2 Laitteet ja välineet	40
5.3 Koemenetelmät	44
5.3.1 Energiatiheyden määrittäminen	44
5.3.2 Kosteuden kertyminen	51

5.3.3	Lämmitysajan vaikutus massahäviöön	53
5.3.4	Vaihtoehtoisten biomassojen torrefiointi	54
5.3.5	Jauhautuvuus	55
5.4	Tulokset	57
5.5	Epävarmuuksia	57
5.6	Vertailua muihin vastaavanlaisiin tutkimuksiin	58
6	KOELAITTEISTO	59
6.1	KyAMK energiatekniikan laboratorio	59
6.2	Torrefiointilaitteen toiminta	59
6.3	Lämpöenergian hyödyntäminen olemassa olevasta biokattilasta	63
6.4	Perusteluja laitteen toimintaperiaatteen valinnalle	64
7	TORREFIOINTI LÄMPÖLAITOKSESSA	65
7.1	Lämpökeskus ja varusteet	65
7.2	Toiminta-ajatus	66
7.3	Kustannukset ja kannattavuus	70
7.4	Loppuhinnan muodostumisen herkkyyshanalyysi	73
7.5	Liikeidean analysointia	75
8	TULOKSET JA KEHITYSIDEAT	76
9	YHTEENVETO	77
	LÄHTEET	78

LIITTEET

- Liite 1. Lämpötilan seuranta (mittauspöytäkirja)
- Liite 2. Massahäviö (mittauspöytäkirja)
- Liite 3. Kalorimetriset lämpöarvot (mittauspöytäkirja)
- Liite 4. Kiintotiheys pelletöitynä (mittauspöytäkirja)
- Liite 5. Kosteuskertymä (mittauspöytäkirja)
- Liite 6. Erilaiset lämmitysajat (mittauspöytäkirja)
- Liite 7. Erilaiset biomassat (mittauspöytäkirja)
- Liite 8. Jauhatus (mittauspöytäkirja)

SYMBOLILUETTELO

Symbolit

c	investointikustannus	[€]
$c_{n/i}$	annuiteettitekijä	[-]
d	halkaisija	[m]
E	energiaosuus	[-]
E_a	vuotuinen energia	[MWh/a]
h	korkeus	[m]
h_{ka}	huippukäyttöaika	[h/a]
H	energiatiheys	[GJ/m ³]
H_{gr}	kalorimetrinen lämpöarvo	[MJ/kg]
H_{net}	tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
i	laskentakorko	[-]
k	kapasiteetti	[t/a]
m	massa	[kg]
M	massaosuus	[-]
n	tarkastelu-aika	[a]
P	huipputeho	[MW]
ρ	tiheys	[kg/m ³]

Alaindeksit

ast	astia
iso	iso laitos
k	kiinteä
kok	kokonais-
norm	käsitlemätön
m	muuttuva
pieni	pieni laitos
r	raaka-aine
torr	torrefioitu

1 JOHDANTO

Lähes kaikki energia maailmassa tuotetaan polttoaineita polttamalla. Polttoprosessien ympäristövaikutukset ovat aiheuttaneet huolta ja poltosta aiheutuvien kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi yritetään etsiä uudenlaisia vähemmän päästöjä aiheuttavia ja vähemmän ympäristöä kuormittavia polttoaineita.

Fossiiliset polttoaineet kuten kivihiili, öljy ja maakaasu ovat olleet teollisuusmaiden merkittävin energianlähde jo vuosikymmenien ajan. Näiden poltto on kuitenkin suurin ilmastonmuutosta aiheuttava tekijä, koska niiden sisältämän hiilen poltossa vapautuu hiilidioksidia ilmakehään. Hiilidioksidi on merkittävin ilmastonmuutosta aiheuttava tekijä. Fossiilisten polttoaineiden määrä on myös rajallinen ja ennen pitkää niiden käytöstä on luovuttava.

Bioenergia on eloperäisen luonnon kuten puiden ja kasvien hyödyntämistä energiantuotantoon. Biomassan polton ei katsota lisäävän hiilidioksidin määrää ilmakehässä, koska puut ja kasvit sitovat saman hiilimäärän kasvaessaan kuin ne poltettaessa vapauttavat. Suomessa bioenergian, kuten puun, käyttö on ollut jo tähän mennessä suurta suhteessa esimerkiksi Keski-Euroopan maihin. Biomassan ja esimerkiksi kivihiilen yleisimmät polttotekniikat eroavat kuitenkin niin paljon, etteivät kivihiiltä polttavat voimalaitokset pysty polttamaan käytännössä biomassaa.

Fossiilisten polttoaineiden käyttöä korvaavia energiantuotantotapoja ja energialähteitä tutkitaan jatkuvasti. Biomassan jalostaminen sellaiseen muotoon, että sitä voitaisiin käyttää esimerkiksi hiilivoimalaitoksissa, on yksi mahdollisuus. Eräs lupaava biomassan jalostusmenetelmä on biomassan torrefiointi. Prosessi perustuu biomassan paahtamiseen hapettomassa tilassa noin 250 °C lämpötilassa, jolloin saadaan aikaiseksi tuotetta, jota voisi olla mahdollista käyttää kivihiilen tavoin. Torrefioidun biomassan ominaisuudet vastaavat hyvin paljon kivihiilen ominaisuuksia.

Torrefioitua biomassaa voitaisiin tuottaa esimerkiksi lämpölaitoksissa lämmöntuotannon rinnalla silloin, kun laitoksen lämmöntuotannon tarve on matala. Torrefiointia varten ei siis tarvittaisi erillistä laitosta, vaan olemassa olevilla laitteilla voitaisiin pienin investoinnein tuottaa sivutuotteena torrefioitua biomassaa.

1.1 Työn tausta

Syksyllä 2010 alkaneessa Lappeenrannan teknillisen yliopiston vetämässä BIOTULI-hankkeessa on tavoitteena etsiä uusia tuotekomponentteja metsäteollisuuden tuotteista. Tällaisilla tuotteilla on moninkertainen yksikköhinta tähänhetkisiin kemiallisesti tuotettujen metsäteollisuuden tuotteisiin verrattuna.

Tämä diplomityö on tehty osana BIOTULI-hanketta. Hanke jakautuu pienempään työpakettiin, jossa tutkitaan uusia biomassasta jalostettuja komponentteja energian lähteenä. Työpaketissa ovat mukana Lappeenrannan teknillinen yliopisto sekä Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

1.2 Tavoitteet ja rajaus

Työssä selvitetään torrefioidun biomassan tuotannon mahdollisuutta lämpölaitoksessa sekä laitteistoja, joita tarvitaan biomassan torrefiointiin. Työn tavoitteena on luoda peruskonsepti torrefioidun biomassan tuotantoon eli millaisia muutoksia laitoksessa mahdollisesti joudutaan tekemään torrefiointiprosessia varten sekä miten ja milloin biomassan torrefiointia kannattaa tehdä.

Diplomityö on rajattu biomassan jalostusperiaatteiden tutkimiseen, joista keskitytään biomassan torrefiointiprosessiin lämpölaitoksessa. Käytännön osuutena työhön kuuluu laboratoriokokeet, joissa biomassaa torrefioidaan sekä yritetään optimoida torrefioidun biomassan laatua. Rajaus perustuu noin puolen vuoden työpanokseen tutkimushankkeen työpaketista.

1.3 Työn toteutus

Biomassan torrefioinnista on tehty jonkin verran aikaisempia tutkimuksia. Tässä työssä tehdyt ratkaisut laitteistoista ja laitekonsepteista perustuvat näihin tutkimuksiin. Laboratoriokokeissa erilaisista kiinteistä biomassoista otetaan näytteitä, jotka torrefioidaan lämpökäsittelyuunissa erilaisilla toiminta-arvoilla. Torrefioiduista näytteistä määritetään lämpöarvo pommikalorimetrillä. Tällä menetelmällä yritetään etsiä optimaalisia toiminta-arvoja biomassan torrefiointiin. Lisäksi työssä suunnitellaan laboratoriokokeiden pe-

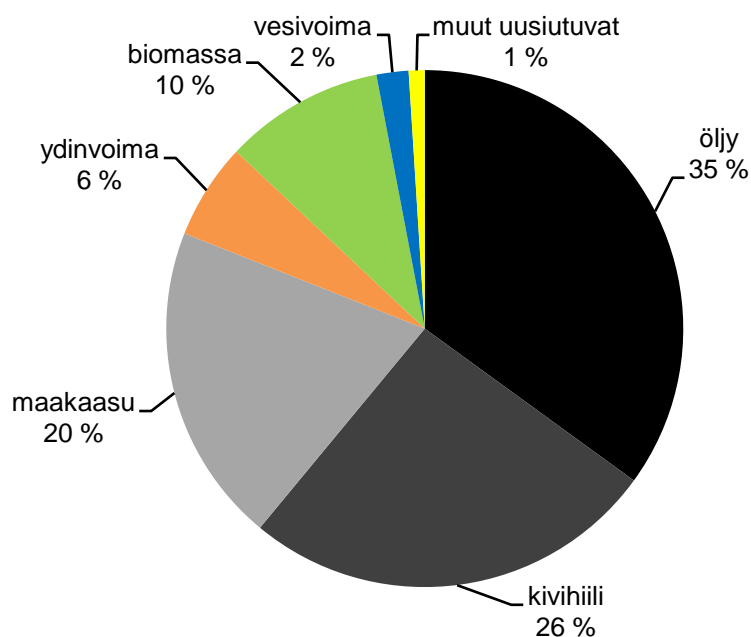
rusteella pieni koelaitteisto, jota käytetään jatkossa BIOTULI-hankkeessa. Koelaitteiston suunnittelu kuuluu osittain työhön, mutta diplomityön rajallisen aikataulun takia koelaitetta ei rakenneta vielä työn tekemisen aikana.

1.4 Työn rakenne

Työn alkuosassa (luvut 1-4) kerrotaan yleisiä tietoja biomassan ominaisuuksista ja jalostusperiaatteista. Luvussa 5 esitetään biomassan torrefioinnista tehtyjä laboratoriokokeita. Laboratoriokokeiden perusteella suunnitellaan koelaitteistoa Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratorioon (luku 6). Koelaitteella tehtyjen kokeiden perusteella laitteen mittakaavaa on mahdollista laajentaa tulevaisuudessa (luku 7).

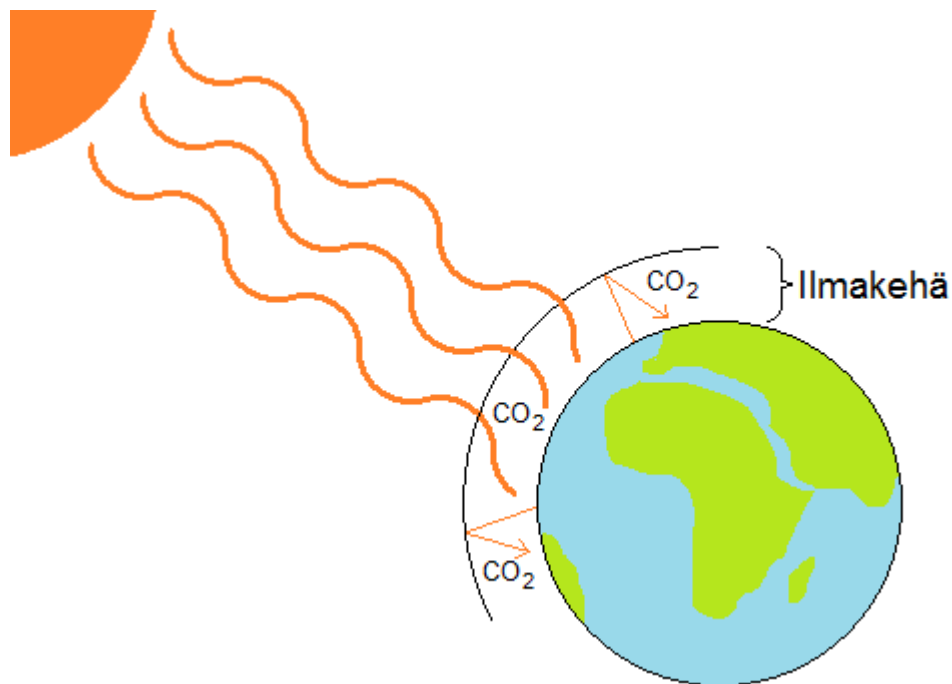
2 TAUSTAA HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖISTÄ

Hiilidioksidia syntyy aina, kun poltetaan ainetta, joka sisältää hiiltä. Hiiltä taas on kaikkialla, missä esiintyy orgaanisia yhdisteitä ja elämää. Jatkuvasti kasvava energiankulutus lisää hiilidioksidin määrää maapallolla, koska energiantuotanto fossiilisia polttoaineita polttamalla on yhä merkittävässä asemassa. Hiilidioksidi kertyy maapallon ilmakehään ja aiheuttaa kasvihuoneilmiötä. (Ilmatieteen laitos 2010)



Kuva 1. Energialähteiden käyttö maailmassa vuonna 2006 (Larjava 2009, 19)

Hiilidioksidin olemus kasvihuonekaasuna perustuu kaasumolekyylin kykyyn imeä auringon lämpösäteilyä tietyillä aallonpituuksilla. Kaasumolekyyli pystyy varastoimaan energiaa ja muuttamaan energian uudelleen säteilyksi, jolloin lämpösäteilystä osa palaa takaisin maan pintaan. ”Kasvihuoneen lasit” ovat siis maapallon tapauksessa ilmakehän kaasumolekyylejä, jotka lähettävät energiaa takaisin maan pintaan. (Ilmatieteen laitos 2010)



Kuva 2. Kasvihuoneilmion periaate

Kioton ilmastopimuksen mukaan teollisuusmaat ovat sitoutuneet vähentämään kasvihuonekaasupäästöjensä vuosina 2008–2012 viisi prosenttia vuoden 1990 tasosta. Tämän tavoitteen toteuttamiseksi on muodostettu niin sanottu päästökauppa, jonka avulla pyritään rajoittamaan haitallisia päästöjä. Euroopan Unionin jäsenmaille on asetettu yhdelle päästökauppakaudelle yhteinen hiilidioksidipäästöjen maksimimäärä. Hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärä jaetaan Euroopan Unionin jäsenmaille päästökauppaviranomaisten laatiman maakohtaisten kiintiöiden mukaisesti. Maksimimäärä on pienempi Euroopan Unionin nykyisiin päästöihin verrattuna, joten päästökaupassa olevat maat ja maiden yritykset eivät voi jatkaa päästöjen tuottamista samalla tavalla kuin ennen. (Energiateollisuus 2011)

Päästökaupassa eri yrityksille on jaettu tietty määrä päästöoikeuksia. Nämä oikeudet ovat kaupankäynnin kohteena, joten yritykset voivat ostaa tai myydä niitä. Joidenkin yritysten kannattaa tietyissä tapauksessa esimerkiksi vähentää päästöjään ja myydä päästöoikeuksia muille tarvitseville yrityksille. Hiilidioksidin päästöoikeuden hinta vaihtelee ja vuoden 2010 lopussa se oli noin 20 € hiilidioksiditonnilta (CO2 Prices.eu 2011).

Erilaisille polttoaineille on laskettu päästökertoimia, jotka määrittävät poltossa vapautuvan hiilidioksidin suhteessa energiayksikköön. Esimerkiksi turpeella päästökerroin on noin 380 kg_{CO2}/MWh ja kivihieillä noin 340 kg_{CO2}/MWh (Huhtinen 2008, 318). Kuitenkin biomassan eli puiden ja kasvien päästökertoimeksi on määriteltä nolla, vaikka niiden poltossa vapautuu hiilidioksidia. Biomassa sitoo kasvaessaan hiiltä ja näin sen katsotaan olevan neutraali hiilidioksidipäästöjen kannalta. Tämä lisää fossiilisia polttoaineita polttavien voimalaitosten halua siirtyä biomassan käyttöön.

3 BIOMASSAN JALOSTAMINEN

Biomassan jalostamisella pyritään muokkaamaan sitä haluttuun tarkoitukseen. Yksinkertainen esimerkki biomassan jalostamisesta on polttopuiden teko. Puu kaadetaan metsässä, karsitaan oksista, sahataan pienempiin osiin, pilkotaan haloiksi ja kuivataan puupinoissa. Näin saadaan metsässä kasvavasta puusta helposti käsiteltävää polttoainetta, jota voidaan polttaa tavallisissa tulisijoissa. Tällaista biomassan jalostamista kutsutaan mekaaniseksi jalostamiseksi (Bioteknologia.info 2011).

Kemiallisella jalostamisella biomassan koostumusta voidaan muuttaa siten, että biomassasta saadaan irrotettua käyttöön uusia ainesosia tai vaihtoehtoisesti voidaan poistaa käyttökeltottomia osia ja näin parantaa hyödynnettävien ainesosien suhteellista määrää biomassassa. Koska erilaiset biomassat sisältävät samoja ainesosia, niiden kemiallisessa jalostamisessa voidaan käyttää samoja periaatteita (Bioteknologia.info 2011).

3.1 Yleisimpiä Suomessa käytettäviä biomassoja

Seuraavassa on tarkasteltu erilaisten biomassojen perusominaisuuksia. Hake ja sahanpuru ovat peräisin puupohjaisista polttoaineista. Kasveja ovat muun muassa pelloilla kasvatavat rypsi ja ruokohelpi. Turvetta ei yleensä luokitella biopolttoaineeksi, mutta sen ominaisuudet kasvavana eloperäisenä maalajina vastaavat jossain määrin muita biomassoja. Eri biomassojen laatu ja ominaisuudet vaihtelevat paljon. Laatuun vaikuttavat esimerkiksi kosteuspitoisuus, tuhkapitoisuus ja irtotiheys.

Hake

Hake on polttoainetta, joka on tehty puusta hakkurin avulla. Tyypillinen hakkeen palakoko on 5–50 mm. Haketta voidaan tehdä esimerkiksi kokopuusta, jossa on puun runkoosaa ja oksia tai hakkuutähteistä, jossa voi olla puun lisäksi lehtiä ja neulasia. Yleensä hakkeen alkuperä tulee ilmi, kun sen alkuun liitetään sana, mistä se on valmistettu. Esimerkiksi metsätähteestä tehtyä haketta kutsutaan metsätähdehakeeksi.



Kuva 3. Haketta

Haketta voidaan käyttää polttoaineena monissa erikokoisissa käyttökohteissa. Pienet muutaman kymmenen kilowatin biomassakattilat on yleensä suunniteltu hakkeen polt-

toon. Suurissa monien satojen megawattien voimalaitoskattiloissa poltetaan myös haketta. Hakkeen laatu vaikuttaa etenkin pienissä kattiloissa merkittävästi laitteiston toimivuuteen. Kokopuusta tehty metsähake on ominaisuuksiltaan parasta energiakäytössä. (Bioenergia Suomessa 2011)

Puru, pelletti ja briketti

Sahanpurua ja höylänlastuja syntyy sahoilla puutavaran jalostuksessa esimerkiksi laudoiksi. Purut ja lastut ovat puujätettä, joten niiden käyttö energiatuotannossa on järkevää. Poltto-ominaisuuksien parantamiseksi nämä yleensä puristetaan pelleteiksi, jolloin tiheyttä saadaan kasvatettua. (Puhakka 2003, 14)



Kuva 4. Purua ja pellettejä

Puupelletti on ympäristöystävällinen polttoaine kuten myös hake, koska pelletin valmistukseen ei tarvita mitään lisäaineita. Pelletti on normaalisti huomattavasti kuivempaa kuin hake, jolloin sen energiasisältö on haketta korkeampi. Pellettejä voidaan polttaa monissa erikokoisissa kattiloissa kuten hakettakin. (Arterm 2009. 4)

Puubriketti on myös purusta ja lastuista tehty yhtenäinen puriste, mutta kooltaan suurempi kuin pelletti. Sylinterimäinen briketti on noin 100–200 mm pitkä ja halkaisija 50–80 mm. Suuren kokonsa takia brikettejä poltetaan yleensä suurissa lämpölaitoksissa.

Kasvit

Kasveista yleisin polttoaine on ruokohelpi. Ruokohelpi on hyvin nopeasti kasvava kasvi ja sitä kasvatetaan pelloilla tai vanhoilla turvesoilla (Kara 2004, 124). Yhden hehtaarin alueelta saadaan käyttöön omakotitalon vuotuista lämmöntarvetta vastaava energiamäärä (VAPO 2004).



Kuva 5. Ruokohelpimursketta

Huonona puolena ruokohelvestä on matala tiheys, joka aiheuttaa suuria kuljetuskustannuksia suhteessa kuljetuskuorman energiasisältöön. Jos ruokohelvestä tehdään pellettejä, sen tiheyttä saadaan kasvatettua. Puupolttoaineisiin verrattuna ruokohelvestä on lähes kymmenkertainen määrä tuhkaa, jolloin sen käyttö lisää kattiloiden huolto- ja puhdistustyötä.

Turve

Turve luokitellaan yleensä uusiutumattomaksi eli fossiiliseksi polttoaineeksi, koska sen uusiutumisenopeus on hyvin hidas. Suomessa turvetta kuitenkin käytetään vähemmän kuin sitä syntyy, joten sen katsotaan olevan hitaasti uusiutuva polttoaine (Kara 2004, 72). Turpeessa on tyypillisesti runsaasti tuhkaa verrattuna puupohjaisiin polttoaineisiin. Kuvassa 6 on turpeen kaksi yleistä polttoainemuotoa, palaturve vasemmalla ja jyrshinturve oikealla.



Kuva 6. Palaturvetta ja jyrshinturvetta (VAPO)

Turve on hinnaltaan edullinen polttoaine puu- ja kasvipolttoaineisiin verrattuna. Jyrshinturve sopii isoihin voimalaitoskattiloihin polttoaineeksi ja palaturve voimalaitoskattiloihin pienempiin lämpölaitoskattiloihin. Turpeesta on myös mahdollista puristaa pellettejä, jolloin turvetta voidaan polttaa myös pienissä lämmityskattiloissa. Turpeen suuren tuhkapitoisuuden takia pienissä kattiloissa on yleensä ongelmana suuret lentotuhkapäästöt (Hellgrén & al. 1996, 23).

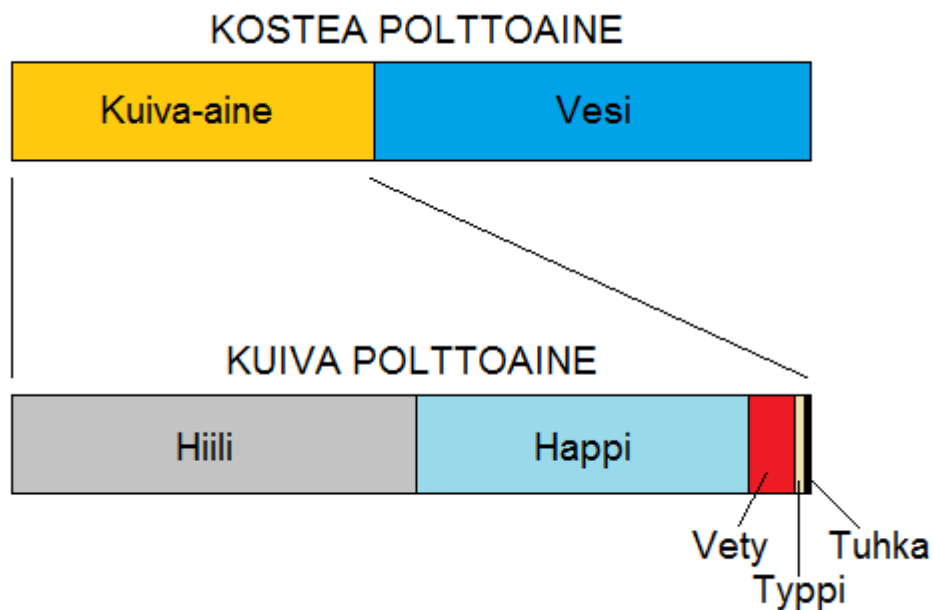
3.2 Biomassan koostumus ja ominaisuudet

Puu- ja kasviperäiset biomassat koostuvat seuraavista rakennekomponenteista.

- selluloosa
- hemiselluloosa
- ligniini

Selluloosa muodostaa solujen perusrungon ja tekee biomassan soluseinistä vahvoja ja jäykkiä. Puun kuivapainosta on selluloosaa noin 40–45 %. Hemiselluloosaa on puussa noin 25–40 % kuivapainosta ja sen tarkoitus on tehdä soluseinistä joustavia. Ligniini sitoo selluloosaa ja hemiselluloosaa toisiinsa ja vahvistaa puun kuitua. Sitä on puun kuivapainosta noin 25–35 %. Biomassaa, joka koostuu edellä mainituista ainesosista, kutsutaan lignoselluloosaksi. (Alakangas 2000, 35)

Alla olevassa kuvassa on eritelty puuperäisten biomassojen vesi-, kuiva-aine-, tuhka- ja alkuainekoostumuksia massasuhteissa. Kuiva polttoaine tarkoittaa kostean polttoaineen kuiva-ainetta, jolloin kosteasta polttoaineesta on haihdutettu vesi pois.



Kuva 7. Biomassan koostumus

Biomassan koostumus voidaan jakaa tämän perusteella kolmeen osaan: vesi, tuhka ja palava-aines. Biomassa sisältää yleensä hyvin paljon vettä, jopa 60 %. Jäljelle jäävä kuiva-aines sisältää pienen määrän tuhkaa, jota puupohjaisilla polttoaineilla on yleensä alle 1 %. Loput kuiva-aineesta on niin sanottua palavaa ainesta, joka on jakautunut seuraaviin alkuaineisiin:

- Hiili, C
- Vety, H
- Rikki, S
- Happi, O
- Typpi, N

Näistä hiili, vety ja rikki ovat palavia aineita, jotka reagoivat hapen kanssa muodostaen oksideja ja vapauttaen energiaa. Hiiltä on yleensä noin puolet kuiva-aineen massasta ja vetyä noin 6 %. Happi, joka sisältyy polttoaineeseen, osallistuu palamiseen ja vähentää näin palamisilman tarvetta. Happea on vähän alle puolet kuiva-aineesta. Typeä polttoaineissa on muutama prosentti. Puuperäiset polttoaineet eivät sisällä rikkiä käytännössä yhtään ja myös tuhkapitoisuus on hyvin pieni.

Alla olevassa taulukossa on Suomessa käytettävien polttoaineiden koostumuksia.

Taulukko 1. Polttoaineiden koostumuksia (Huhtinen 1994, 38)

Polttoaine	Hiili C	Vety H	Rikki S	Happi O	Typpi N	Tuhka
Puu (hake)	50,4	6,2	0,0	42,5	0,5	0,4
Ruokohelpi	46,9	5,5	0,1	41,0	1,0	5,5
Jyrsinturve	55,0	5,5	0,2	32,6	1,7	5,0

3.3 Jalostamisen historiaa

Biomassaa on lämpökäsitelty jo tuhansien vuosien ajan. Erilaisia käsittelymenetelmiä ja raaka-aineita on ollut monia erilaisia. Tuotteena jalostuksessa on saatu kiinteitä, neste-mäisiä ja kaasumaisia aineita. Seuraavassa on esimerkkejä vanhoista biomassan jalostustavoista ja -tuotteista.

Pyrolyysi

Pyrolyysi tarkoittaa kemiallista reaktiota, joka tapahtuu, kun puuta tai kasveja kuumentetaan hapettomassa tilassa. Tämä on eräänlainen tislausmenetelmä, jossa aineesta erotetaan eri lämpötiloissa pienempiä komponentteja. Pyrolyysiä nimitetäänkin tästä syystä kuivatuslaukseksi. Haihtuvina komponentteina orgaanisissa aineissa ovat muun muassa vesi, erilaiset hiilivedyt ja hiilimonoksidi. Tislaustuotteiksi jäävät esimerkiksi koksi ja terva. Pyrolyysireaktiot tapahtuvat yleensä 200–500 °C lämpötilassa. (Lehtonen 2001, 46)

Puuhiilen valmistaminen

Puun pyrolyysireaktiossa jäljelle jäävää kiinteää ainesosaa kutsutaan puuhiileksi. Puuhiilen valmistamista on tehty jo antiikin aikaan ja sitä on käytetty esimerkiksi.

- luolamaalauksissa
- sepän ahjossa polttoaineena
- ruudin valmistamiseen
- lannoitteena
- grillihiilenä
- aktiivihiilen raaka-aineena
- polttamalla energiaksi

Puuhiili sisältää alkuainehiiltä jopa 90 % ja sen kosteuspitoisuus on vain muutamia prosentteja. Puuhiiltä on tuotettu muun muassa hiiltouunissa tai maakuopassa eli miilussa.



Kuva 8. Puuhiiltä

Tervanpoltto

Nestemäisiä puun pyrolyysin jalostustuotteita on esimerkiksi terva. Tervanpoltto on ollut vanha tapa erottaa puusta ja erityisesti männystä tervaa. Puupilkkeet, jotka sisältävät paljon tervaa, kasataan suppilon muotoiseen tervahautaan. Puut peitetään turvekerroksella ja tiivistetään mullalla. Turvekasa sytytetään palamaan, jolloin kerroksen alla olevat puut hiiltävät palamisen aiheuttamasta lämmöstä ja terva irtoaa puista. Puiden sekaan ei pääse happea ja näin tapahtuu pyrolyysi. Tervahaudan pohjalla on laskuputki, jota pitkin terva virtaa haudasta pois. Sivutuotteena tervahaudan pohjalle jää puusta muodostunut puuhiili.

Puukaasu ja häkäpönttöauto

Pyrolyysissä vapautuvia pyrolyysikaasuja on hyödynnetty muun muassa polttomoottoreiden polttoaineena. Esimerkiksi sota-aikana käytettiin paljon niin sanottuja häkäpönttöautoja, joiden toiminta perustui puun vajaan palamiseen ja puukaasun syntymiseen. Hehkuvan puuhiilikerroksen läpi johdetaan ilmaa, mutta ei tarpeeksi täydellistä palamista varten. Tällöin savukaasuihin muodostuu hiilimonoksidia eli häkää, joka voidaan siir-

tää polttomoottorin polttoaineeksi. Häkäpöntöistä saadaan myös puuhiiltä sivutuotteena. (Hiittu 1996, 20).

3.4 Nykyaikaisia jalostustuotteita

Pyrolyysillä tehdyt vanhat hiilentuotantotavat ovat olleet hitaita prosesseja. Nykyaikaisilla laitteistoilla prosesseja on saatu nopeutettua ja tarvittaessa myös prosessin lämpötilaa on saatu nostettua. Nykyään pyrolyysiä käytetään yhä yhtenä biomassan jalostusmenetelmänä, mutta etenkin puunjalostuksessa on lisääntynyt huomattavasti pyrolyysiä alhaisempien lämpötilojen käyttö. Puun lämpökäsittelyssä alle 200 °C lämpötilassa voidaan parantaa puun lahoamiskestoa ja pienentää kosteuden aiheuttamaa elämistä. Lämpökäsiteltyä puuta eli lämpöpuuta käytetään esimerkiksi saunan sisustukseen ja puutarhakalusteisiin (Stora Enso 2011).

Metsäyhtiö UPM on viime vuosina tutkinut ja kehittänyt biodieselin valmistusmenetelmää jättebiomassasta. Menetelmänä on katalyyttinen kemiallinen reaktio, jota kutsutaan Fischer-Tropsch-kaasutusteknologiaksi. Tavoitteena on muodostaa hiilimonoksidista ja vedystä nestemäisiä hiilivetyjä, joita voisi käyttää esimerkiksi ajoneuvoihin soveltuvana nestemäisenä biopolttoaineena. Raaka-aineena valmistuksessa käytetään lignosellulosa sekä jätteiksi luokiteltuja aineita. (UPM 2010)

4 TORREFIOINTI

Edellisen luvun esimerkit pyrolyysimenetelmistä perustuvat korkeisiin lämpötiloihin. Torrefiointi eli paahtaminen on myös biomassan jalostusmenetelmä, mutta käsittelylämpötila on pyrolyysikäsitteilyä alhaisempi. Tässä luvussa tarkastellaan torrefioidun biomassan ominaisuuksia, esitetään torrefioinnin peruseriaate ja näytetään esimerkkejä olemassa olevista laitteistoista, joilla torrefiointia on mahdollista tehdä.

4.1 Torrefioidun biomassan ominaisuuksia

Torrefiointi voidaan ajatella kevyeksi pyrolyysiksi, joka tapahtuu 200–300 °C lämpötilassa (Bergman 2005c, 4). Edellisessä luvussa olevat jalostustuotteet ovat kaikki jalos-

tettu pyrolyysimenetelmällä, jossa lämpötila on noin 500 °C. Torrefioinnissa eli paahattamisessa biomassan ominaisuudet jäävät esimerkiksi puun tapauksessa tuoreen puun ja puuhiilen väliin.



Kuva 9. Torrefioitua haketta

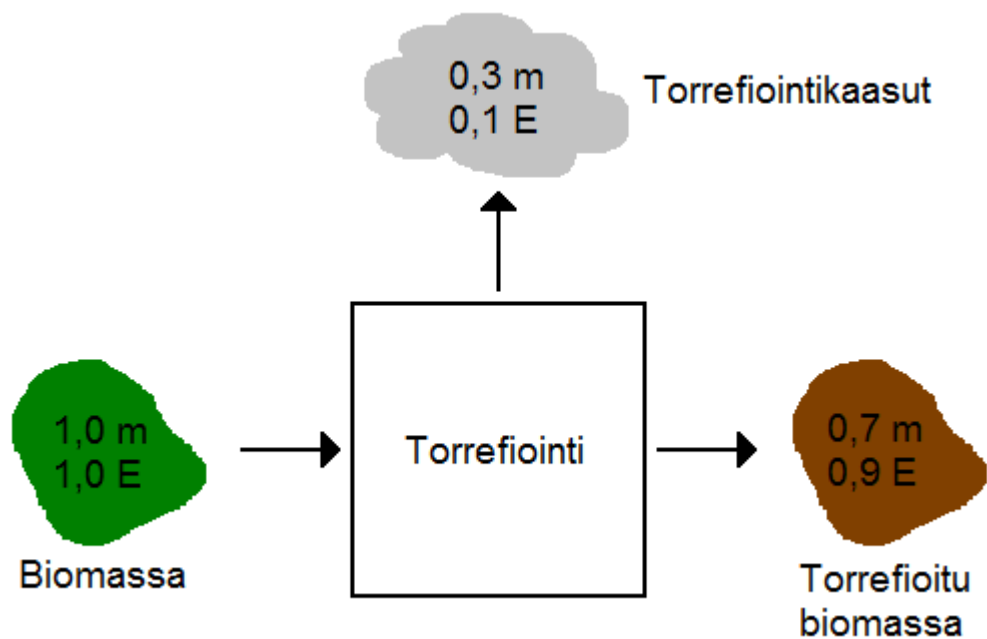
4.2 Torrefioinnin tavoitteita

Uusiutumattomien polttoaineiden hiilidioksidipäästöjen ja polttoaineiden rajallisen määrän takia tilalle etsitään jatkuvasti vaihtoehtoisia polttoaineita ja energiantuotantotapoja. Tämän vuoksi biomassa tulee olemaan tärkeä energianlähde tulevaisuudessa. Biomassan torrefiointikäsitteilyn avulla sitä on mahdollista käyttää hiilivoimalaitosten polttoaineena ja näin voidaan korvata fossiilisen kivihiilen käyttöä. Lisäksi torrefioitun biomassan poltto ei vaadi lisälaitteita hiilivoimalaitokseen. (ETPC 2011)

Biomassan eri ominaisuudet paranevat merkittävästi torrefioinnin avulla ja näin myös polttoaineen laatu paranee. Vaikka erilaisten biomassojen laatu ja käyttökelpoisuus vaihtelee paljon, voidaan biomassoja yhdenmukaistaa torrefioinnin avulla ja saada aikaan yhtenäinen torrefioitu massa. Näin saadaan käyttöön sellaisia biomassoja, joita olisi vaikea hyödyntää ilman esikäsitteilyä. (Agar 2011)

4.3 Biomassassa tapahtuvia reaktioita

Biomassan torrefiointi aloitetaan puhdistamalla biomassasta ylimääräiset ainesosat, kuten hiekka. Biomassa haketetaan tai jauhetaan riittävän pieneen palakokoon. Tällä pyritään tasalaatuiseen raaka-aineeseen. Torrefiointiprosessissa käytettävä 200–300 °C lämpötila nostetaan hitaasti alle 50 °C/min nopeudella tavoitelämpötilaan. Torrefioitava biomassa pidetään prosessin aikana hapettomassa ilmanpaineisessa tilassa. Biomassa hajoaa osittain erilaisiksi kaasumaisiksi yhdisteiksi, jolloin torrefioitavan kappaleen massa pienenee. Kuvasta 10 nähdään biomassan torrefiointin massa- ja energiatase. Prosessissa tuotteen massasta haihtuu kaasuina 30 %, mutta energiasta vain 10 %. Kaasut sisältävät muun muassa hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. (Bergman 2005b, 13)



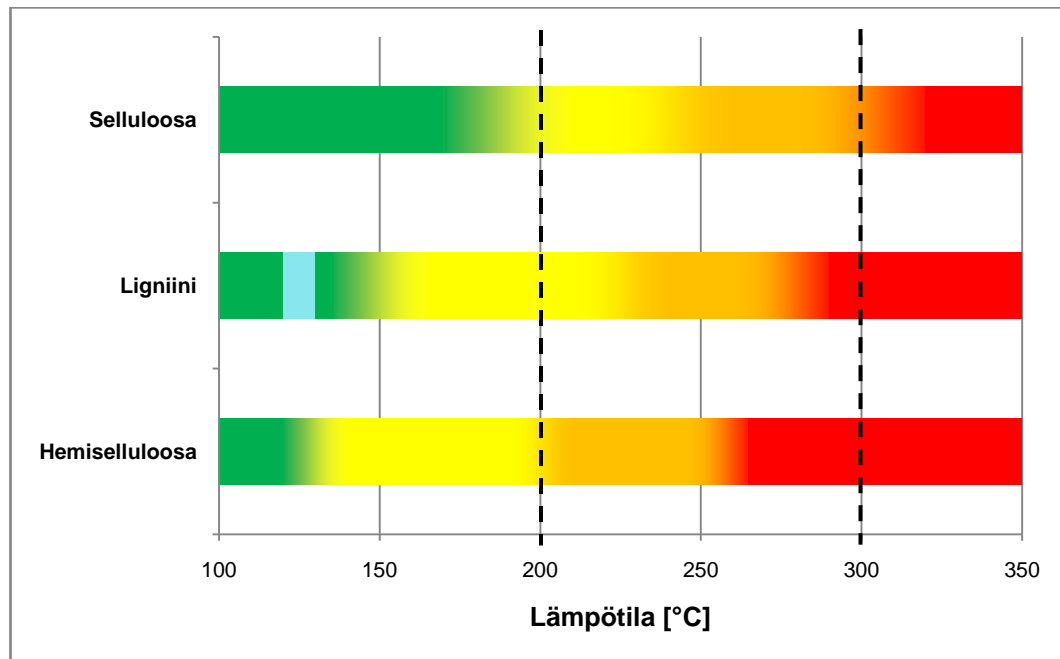
Kuva 10. Torrefiointin energia- ja massatase

Biomassasta haihtuu suhteellisesti enemmän happea ja vetyä kuin hiiltä. Tällöin biomassan energiasisältö kasvaa massaa kohti, koska tuotteessa on suhteessa enemmän palavaa ainesta jalostamattomaan biomassaan verrattuna.

Kuvassa 11 on esitetty biomassaa kuumennettaessa tapahtuvat rakenneosien muutokset. Lämpötilan kasvaessa jokaiselle rakenneosalle tapahtuu samankaltaisia reaktioita, mutta eri lämpötiloissa. Lämmityksen ensimmäisessä vaiheessa tapahtuu kuivuminen, joka

tarkoittaa molekyyliin sitoutuneen veden ja kaasujen poistumista. Tämä on kuvattu kuvassa vihreällä alueella. Ligniinin kuivumisen aikana tapahtuu lisäksi noin 130 °C lämpötilassa pehmeneminen, jolloin ligniini sitoo materiaalia. (Bergman 2005b, 14)

Kuivumisen jälkeen alkaa rakenneosien sidosten katkeaminen ja rakenneosien hajoaminen. Hajoaminen tapahtuu keltaisella alueella olevissa lämpötiloissa. Oranssilla värillä kuvatussa lämpötila-alueessa rakenneosat hiiltävät osittain ja lämpötilaa edelleen nostettaessa reaktiot muuttuvat eksotermisiksi. Torrefiointilämpötilassa biomassa ei vielä muutu täysin hiiltyneeksi ja näin torrefioidulle biomassalle tulee ominainen ruskea värisävy. Kuvassa torrefioinnissa käytettävä lämpötila-alue on katkoviivojen välissä. (Bergman 2005b, 14)



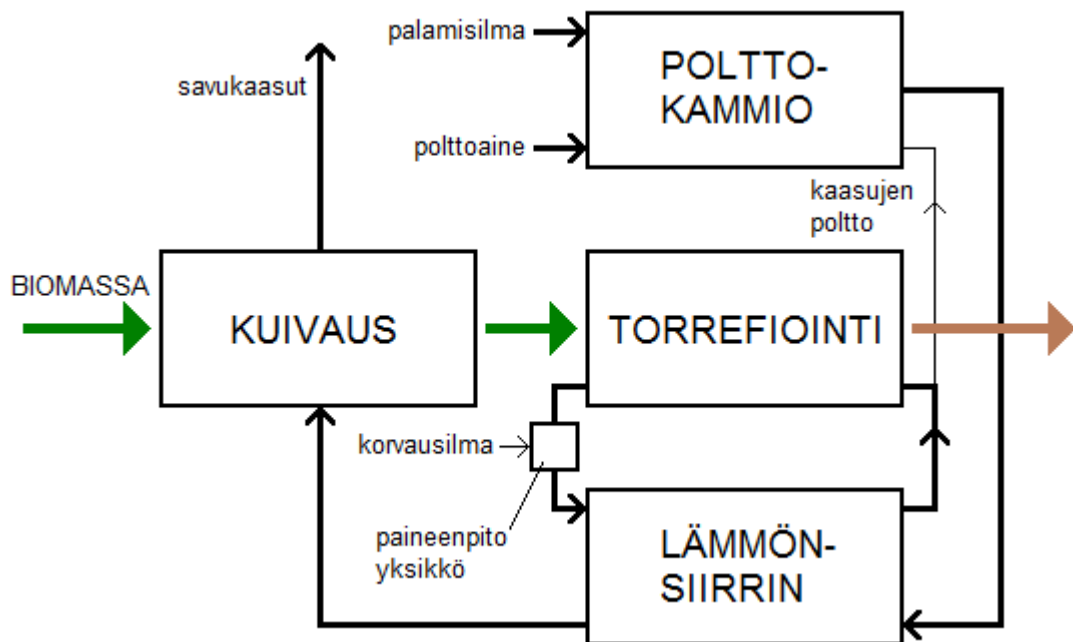
Kuva 11. Rakennekomponenttien reaktioita

4.4 Torrefiointimenetelmä

Torrefiointilaitteiston tarkoituksena on lämmittää biomassa vaadittavaan lämpötilaan ja pitää yllä saavutettua lämpötilaa tietyn ajan. Biomassan kosteus on ennen tätä laskettu sopivaan pitoisuuteen esikuivauksen avulla. Seuraavassa on esitetty kaksi mahdollista torrefiointimenetelmää, jotka toimivat samalla pääperiaatteella. Menetelmien ero on lämmönsiirtäjäaineissa.

4.4.1 Suora kytkentä

Suorassa kytkennässä biomassa on suorassa yhteydessä kaasumaiseen lämmönkuljettajaan. Lämmönkuljettajana toimii biomassasta haihtunut kosteus, joka on muuttunut tulistuneeksi höyryksi. Tämä on yleinen periaate muissakin prosesseissa, joissa kuivataan materiaalia. Torrefiointiprosessi suoralla kytkennällä voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 12 mukaisesti. (Bergman 2005b, 27)



Kuva 12. Torrefiointiprosessi, suora kytkentä

Energia prosessiin tuodaan polttoaineesta, jota poltetaan polttokammiossa. Polttokammioista lähtevät kuumat savukaasut kulkevat lämmönsiirtimen läpi, jolloin osa savukaasujen sisältämästä energiasta siirtyy lämmönsiirtimeen. Savukaasuissa jäljellä olevaa energiaa hyödynnetään lisäksi biomassan esikuivaukseen. (Bergman 2005b, 27–28)

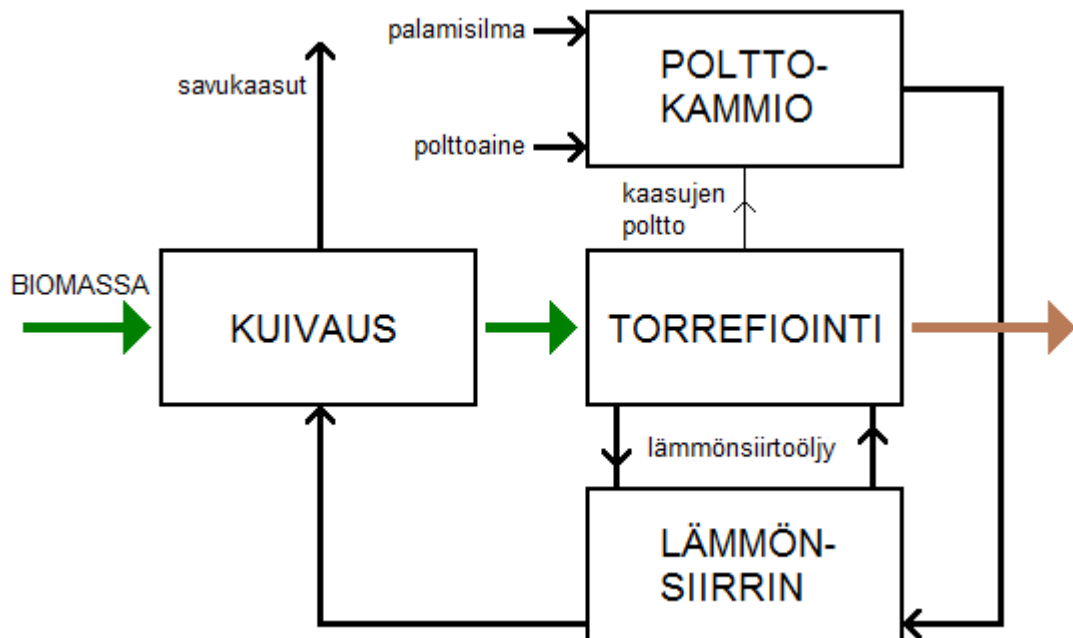
Biomassa syötetään kuivausosaan, jossa kosteuspitoisuus pienennetään prosessiin sopivaksi. Tästä biomassa siirretään torrefiointireaktoriin. Reaktorissa biomassasta haihtuu vettä ja kaasuuntuvia ainesosia. Haihtuvia osia kierrätetään lämmönsiirtimen läpi, jolloin biomassasta vapautuneet kaasut lämpenevät ja toimivat näin lämmöntuojana biomassalle. Osa torrefiointikaasuista johdetaan polttokammioon, jossa kaasuissa olevia

palavia komponentteja voidaan hyödyntää polttamalla energiaksi. Valmis torrefioitu biomassa poistetaan reaktorista. (Bergman 2005b, 27–28)

Kun kaasuja johdetaan polttokammioon, paine torrefiointipiirissä laskee. Tällöin on vaarana palavien kaasujen syttyminen ja virtaaminen polttokammioista torrefiointireaktoriin, koska polttokammion paine on suurempi kuin reaktorin paine. Ongelma voidaan ratkaista paineenpitoyksiköllä, jonka avulla varmistetaan torrefiointipiiriin ylipaine polttokammion paineeseen verrattuna. Paineenpitoyksikkö annostelee tarvittaessa reagoimattonta korvausilmaa torrefiointipiiriin, esimerkiksi typpeä tai hiilidioksidia, jolloin torrefiointipiirissä saadaan pidettyä jatkuva ylipaine. (Bergman 2005b, 27–28)

4.4.2 Epäsuora kytkentä

Epäsuorassa kytkennässä torrefioitava biomassa lämmitetään lämmönsiirtoöljyn avulla. Öljy ei ole kosketuksissa biomassaan, vaan lämpö johtuu biomassaa ympäröivistä seinämistä. Torrefiointikaasut poltetaan polttokammiossa, kuten suorassa kytkennässäkin. Kuvassa 13 on epäsuoran kytkennän toimintaperiaate. (Bergman 2005b, 28)



Kuva 13. Torrefiointiprosessi, epäsuora kytkentä

Epäsuoraan kytkentään ei tarvita paineenpitoyksikköä, koska torrefiointikaasut eivät kierrä reaktorin läpi. Lämmönsiirrin toimii kytkennässä myös ”tehokkaammin”, koska lämmönsiirto kaasusta nesteeseen mahdollistaa suuremmat lämpövirrat kuin suoran kytkennän kaasusta kaasuun lämmönsiirto. Epäsuoran kytkennän huonona puolena on kuitenkin heikompi lämmönsiirto torrefioitavaan biomassaan, koska suorassa kytkennässä kuumat kaasut ovat suorassa kosketuksessa biomassaan. (Bergman 2005b, 29)

4.5 Torrefioinnin etuja

Torrefioinnin avulla voidaan tietystä määrästä biomassaa ”poistaa” osa sen massasta, mutta säilyttää lähes kaikki kemiallinen energia, joka biomassassa oli ennen torrefiointia. Tällä tavalla saadaan aikaiseksi tuote, jonka massayksikön energiamäärä on kasvanut. Biomassan sisältämästä energiasta osa poistuu palavina kaasuina, jotka voidaan polttaa. Seuraavassa on selostettu muutamia etuja, joita torrefioinnilla voidaan saavuttaa.

Lämpöarvon kasvaminen

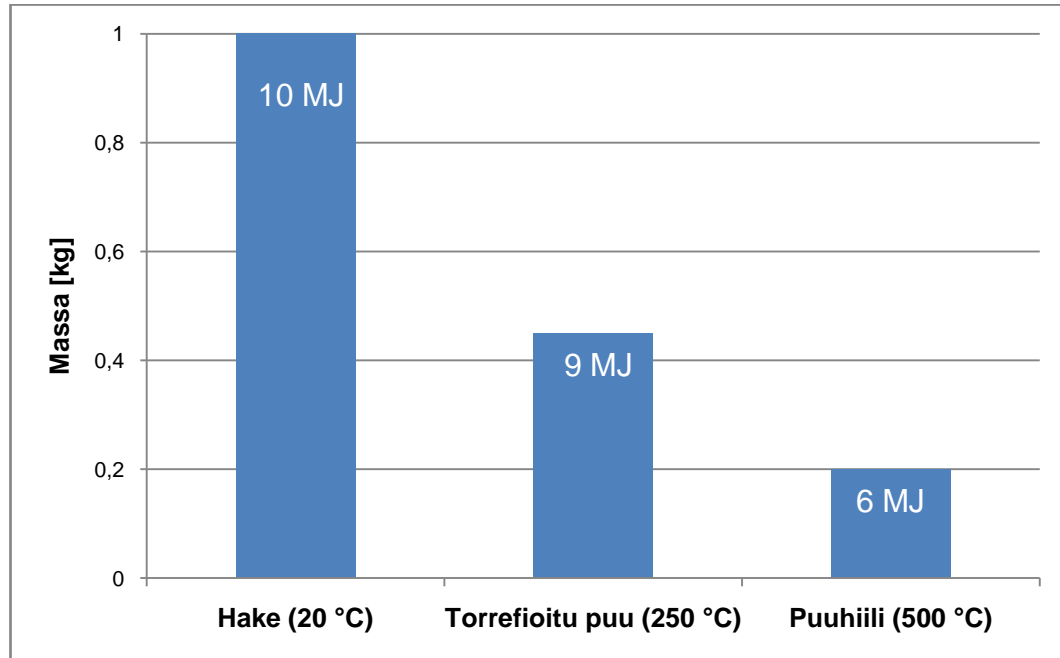
Torrefioinnin avulla voidaan kasvattaa biomassan energiatiheyttä, koska sen massa pienenee enemmän kuin energiasisältö. Tyypillinen puuhakkeen kosteuspitoisuus on noin 35 %, jolloin yhdestä kilosta haketta saadaan poltettaessa noin 10 MJ energiaa. Hakkeesta hyödyksi saatava energia eli tehollinen lämpöarvo on tällöin 10 MJ/kg. Kun haketta kuumennetaan 250 °C lämpötilaan, haihtuu hakkeesta ensin vesi ja myöhemmin muita haihtuvia aineita. Puun massa on tämän jälkeen noin 450 g, mutta energiaa on vielä 9 MJ jäljellä.

Torrefioidun puun tehollinen lämpöarvo olisi tässä tapauksessa 20 MJ/kg.

$$H_{net,torr} = \frac{9 \text{ MJ}}{0,45 \text{ kg}} = 20 \text{ MJ/kg}$$

Kuvassa 14 on esitetty hakkeen, torrefioidun puun ja vertailun vuoksi puuhiilen energiasisältöjä suhteessa massaansa. Puuhiilen lämpöarvo noin 30 MJ/kg vaikuttaa suurelta, mutta valmistusprosessissa on menetetty jo lähes puolet puun alkuperäisestä energiasi-

sällöstä. Torrefioinnin etuna on biomassan energiasisällön pysyminen lähes alkuperäisellä tasolla. Tämän takia prosessia ei välttämättä kannata jatkaa puuhiileen asti.



Kuva 14. Puun jalostamisen vaikutus energiasisältöön (Riikilä 2010)

Jauhautuvuus

Käsittelemätön biomassa on vaikea jauhaa jauheeksi, vaikka biomassa olisi kuivaa. Torrefioitu biomassa on sen sijaan haurasta ja se on helppo jauhaa jauheeksi (Ukranian bio-fuel portal 2010). Hiilivoimalaitosten käyttämää polttopapaa, jossa polttoaine jauhetaan jauheeksi, tarkastellaan myöhemmin.

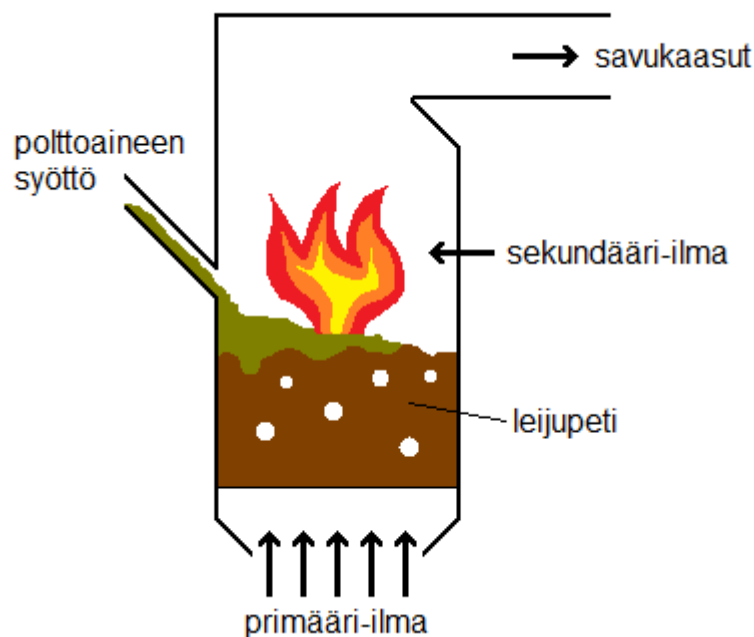
Kosteuden kertyminen ja biologinen hajoaminen

Torrefioitu biomassa on hyvin kuivaa, eikä se kerää kosteutta kovin helposti. Tällöin biomassa ei myöskään hajoa biologisesti (lahoa). Lahoaminen tarkoittaa biomassan hidasta palamista, jossa bakteerit ja sienet hajottavat sitä. Reaktiossa vapautuu hiilidioksidia. Lahoamista voi esiintyä vain, jos biomassan kosteusprosentti nousee yli 20 %:iin. Torrefioitua biomassaa voidaan säilyttää tämän takia hyvin ulkona ”säiden armoilla”. Lisäksi torrefioitu biomassa voidaan tarvittaessa palauttaa maaperään, jolloin biomassa pysyy maaperässä jopa tuhansia vuosia eikä ilmakehään pääse hiilidioksidia kuten normaalin puun lahoamisessa (Knaapi 2011, 112).

Leijukerrospoltoista pölypolttoon

Suomessa puun energiakäyttö on merkittävässä asemassa energiantuotannossa. Suuren metsäpinta-alan takia Suomi onkin yksi johtavimmista maista, jotka hyödyntävät puuta energiantuotantoon. Biomassa ei kuitenkaan ole koostumukseltaan tasalaatuista polttoainetta, koska esimerkiksi kosteuspitoisuus vaihtelee paljon. Sateisina kesinä biomassan kosteuspitoisuus voi olla yli 50 %, mutta talven yli kuivuneen hakkeen kosteus voi olla alle 20 %. Kosteaa biomassa asettaa vaatimuksia polttotekniikkaan ja tämän takia Suomessa suuret biomassaa polttavat kattilat ovat toimintaperiaatteeltaan leijupetikattiloita, jotka soveltuvat hyvin biomassan polttoon (Huhtinen 1994, 157–159).

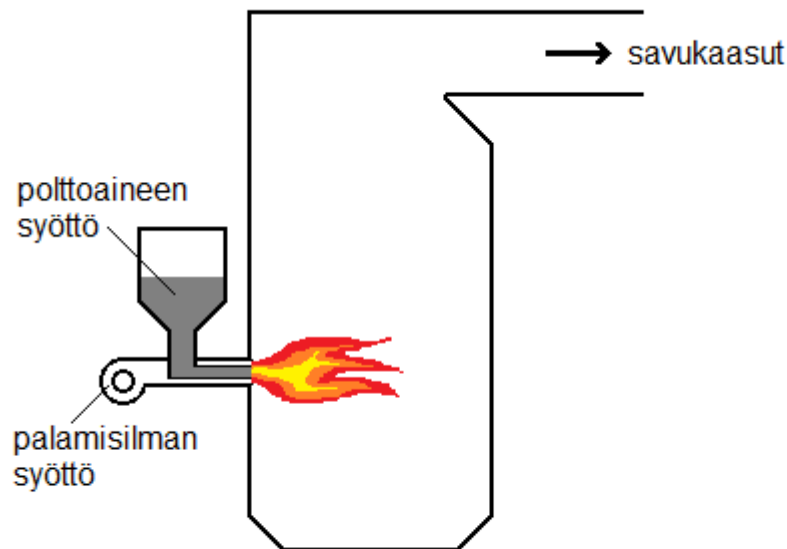
Leijupetikattilassa on hiekkapatja, joka toimii kattilan arinana. Hiekkapatjaan syötetään ilmaa kattilan pohjasta (primääri-ilma), jolloin hienojakoinen hiekka alkaa leijua. Ilma virtaa kuplamaisesti hiekkakerroksen läpi, kuten kiehuva vesi. Kuumen hiekan sekaan syötetään polttoainetta ja polttoaine sekä kuivuu että palaa. Hiekan avulla kattilan lämpökapasiteettia saadaan kasvatettua siten, että kattilaan syötettävä polttoaine ei tarvitse kuivausta. Polttoaineen haihtuvat komponentit palavat sekundääri-ilman avulla pedin yläpuolella (Perttula 2000, 177).



Kuva 15. Leijukerrospoltto

Suomessa suuren lämmöntarpeen takia leijupetikattilat ovat yleensä käytössä voimalaitoksissa, jotka tuottavat pääasiassa kaukolämpöä ja sivutuotteena sähköä. Keski-Euroopassa sähköntarve suhteessa lämmöntarpeeseen on kuitenkin suurempi kuin Suomessa ja voimalaitokset on optimoitu sähköntuotantoon. Pelkästään sähköä tuottavat niin sanotut lauhdevoimalaitokset käyttävät polttoaineenaan yleensä kivihiiltä.

Kivihiilen polttotapana käytetään yleensä pölypoltoa, jossa kivihiili jauhetaan hiilimyllyn avulla hienojakoiseksi pölyksi. Hiilipöly syötetään kattilaan palamisilman mukana, missä hiili palaa. Pölypolton avulla kattilasta on mahdollista saada suurempi teho kuin leijukerrospoltoista, koska hienojakoinen pöly palaa hyvin nopeasti ja näin luovuttaa lämpöä myös nopeasti. Pölypolton avulla kattilaan saadaan aikaan korkeampi lämpötila kuin leijukerrospoltoissa. Pölypolttokattilalla on mahdollista saada lopulta myös suurempi sähköteho kuin leijupetikattilalla, jos kattilat ovat samankokoisia (Huhtinen 1994, 141).



Kuva 16. Pölypoltto

Hiiltä polttavissa kattiloissa voidaan jauhaa ja polttaa pieniä määriä biopolttoaineita hiilen seassa, mutta seassa olevien biopolttoaineiden määrä on käytännössä vain muutamia prosentteja. Torrefioidun puun polttaminen olisi kuitenkin mahdollista hiilivoimalaitoksen polttoainekäsittelyjärjestelmän avulla, koska sen jauhautumisominaisuudet ovat

kivihiilen tapaiset. Jos torrefioitua puuta ei voisi polttaa kattilassa pelkästään, voisi torrefioidun puun määrä olla kivihiilen seassa ainakin merkittävästi suurempi verrattuna jalostamattoman biomassan määrään kivihiilen seassa.

Säilytys kivihiilen seassa

Tavallisen biomassan poltto kivihiilivoimalaitoksessa vaatii biomassalle erilliset käsittelyjärjestelmät kuten siilon, kuljettimen ja hakkurin. Torrefioidun biomassan säilytys voitaisiin toteuttaa parhaimmassa tapauksessa kivihiilen seassa, jolloin polttoaineen syöttöön ei tarvittaisi mitään muutoksia. (Bergman 2005a, 24)

Torrefiointikaasujen hyödyntäminen

Torrefiointikaasujen polttamisella on mahdollista saavuttaa teoriassa energiaomavarainen prosessi. Prosessiin ei tarvittaisi ulkopuolista energiaa, kun prosessi on saatu käyntiin jatkuvatoimisesti. Tarkastellaan seuraavanlaista esimerkkiä puun torrefioinnista.

- puu sisältää 20 % vettä
- kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 20 MJ/kg
- kuiva-aineen energiasta haihtuu 10 % palavina kaasuina
- puuta torrefioidaan 250 °C lämpötilassa

Jos otetaan 1 kg kosteaa puuta, tällöin kuiva-ainetta on 0,8 kg. Kuiva-aine sisältää energiaa lämpöarvon mukaan 16 MJ. Energiaa haihtuu tästä kaasuina 1,6 MJ, joka voidaan hyödyntää polttamalla energiaksi.

Kostean puun lämpötila on 20 °C ja puu on lämmitettävä 250 °C lämpötilaan. Puussa oleva vesi (0,2 kg) on ensin lämmitettävä 100 °C lämpötilaan. Vesi höyrystyy tämän jälkeen höyryksi. Lopuksi 100 °C höyry on lämmitettävä edelleen 250 °C lämpötilaan. Tähän 20 °C veden muuttamiseen 250 °C höyryksi kuluu energiaa taulukkoarvojen mukaan laskettuna noin 0,6 MJ. Puun kuiva-aineen lämmittäminen 250 °C lämpötilaan kuluttaa energiaa noin 0,4 MJ, kun puun ominaislämpökapasiteetiksi oletetaan 1,5 kJ/kg°C.

Tällöin puun lämmittämiseen kulunut kokonaisenergia olisi noin 1,0 MJ, joka on mahdollista saada palavien kaasujen sisältämästä energiasta (1,6 MJ). Jatkuvatoimisena tämä prosessi voidaan ajatella tuotantolinjaksi siten, että ”edellisen puumäärän” torrefiointikaasuja käytettäisiin ”seuraavan puumäärän” torrefiointiin.

Todellisuudessa energiaa kuluu kuitenkin lämpöhäviöinä sekä puun torrefioinnissa tapahtuvissa kemiallisissa reaktioissa. Palavien kaasujen hyödyntäminen parantaa joka tapauksessa laitteen hyötysuhdetta ja ulkopuolista energiatarvetta.

4.6 Torrefioinnin haasteita

Torrefioidussa biomassassa lähes kaikki ominaisuudet ovat parempia kuin käsittelemättömässä biomassassa. Ongelmia voi syntyä kuitenkin jonkin verran torrefiointiprosessin aikana. Torrefioinnin haasteita ja ongelmia on esitetty seuraavassa.

Matala energiatiheys

Biomassan torrefioinnissa osa energiasta poistuu kaasujen mukana, mutta kuitenkin biomassan tilavuus pysyy lähes muuttumattomana. Tämä tarkoittaa, että energiatiheys pienenee. Energiatiheyttä voidaan kuitenkin kasvattaa pelletöimällä torrefioitua biomassaa.

Tuotantokustannukset

Torrefioidun biomassan valmistaminen ja kuljettaminen kuluttaa aina energiaa, jolloin tuotannon kannattavuus on arvioitava tilanteen mukaan. Jos valmiin tuotteen hinta muodostuu ostajille liian kalliiksi tai raaka-aine on myyjälle kallista ostajien vaatiman hinnan mukaan, tällöin torrefioidun biomassan tuottaminen ei ole kannattavaa.

Prosessissa syntyvät vaaratilanteet

Hapettomassa tilassa syntyvät kaasut ovat herkästi syttyviä, joten laitteistoihin on suunniteltava turvajärjestelmiä. Tyypillinen tilanne voi syntyä esimerkiksi luvussa 4.4 esitetyissä kytkennöissä, kun polttokammion tuli tai ilman mukana tuleva happi pääsee etemään torrefiointireaktoriin.

Prosessissa syntyvät likaavat ainesosat

Torrefiointikaasut ovat pääosin hyvin palavia kaasuja, mutta kaasujen lauhtumisessa syntyy esimerkiksi tervaa ja hiilipölyä. Terva tukkii helposti putkistoja ja pöly likaa lämpöpintoja.

4.7 Kivihiilen ja biomassan ominaisuuksien vertailua

Seuraavassa tarkastellaan kivihiilen, puun ja torrefioidun puun ominaisuuksia. Polttoainneiden ominaisuuksia on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Torrefioitu pelletti on valmistettu torrefioidusta puusta.

Lämpöarvo

Lämpöarvo on polttoaineen ominaisuus, joka ilmaisee polttoainemäärää kohti vapautuvan energian polttoainetta poltettaessa. Kattilalaitoksien palamisprosesseissa lämpöarvona käytetään polttoaineen tehollista lämpöarvoa, johon on huomioitu palamisessa syntyneen vesihöyryn kulkeutuminen savukaasujen mukana taivaalle. Vesihöyryyn on sitoutunut energiaa, joka menetetään. Polttoaineen teholliseen lämpöarvoon vaikuttaa eniten polttoaineen kosteuspitoisuus sekä osittain vetypitoisuus. (Fortum Oyj 2002, 8)

Taulukossa 2 on esitetty erilaisten polttoaineiden lämpöarvoja. Kivihiilen ja kostean hakkeen lämpöarvot poikkeavat toisistaan, mutta hakkeesta tehdyn torrefioidun pelletin lämpöarvo on jo hyvin lähellä kivihiilen lämpöarvoa.

Tuhkapitoisuus

Suomessa käytettävän kivihiilen tuhkapitoisuus on hyvin suuri. Osa tuhkasta on peräisin hiiliesiintymien ympärillä olevista hiekka- ja savimaakerroksista. Tuhka pienentää polttoaineen lämpöarvoa, koska se ei osallistu palamiseen ja näin luovuta energiaa. Kattilassa tuhka likaa lämpöpintoja ja voi muodostaa pinnoille syövyttäviä kerrostumia. Polttoaineen käsittelylaitteet kuluvat tuhkapitoisten polttoaineiden käsittelyssä. Savukaasuihin muodostuva lentotuhka on puhdistettava. Puun ja myös torrefioidun puun tuhkapitoisuus on kivihiileen verrattuna hyvin pieni, jolloin niiden käytössä edellä mainitut ongelmat vähenevät.

Taulukko 2. Polttoaineiden ominaisuuksia

Polttoaine	Kosteus [%]	Tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]		Tuhka [%]
		kosteaa	kuiva	
Puu (hake)	35	10,5	17,7	1
Puupelletti	7	16,2	17,7	1
Torrefioitu puu	3	19,9	20,4	1
Torrefioitu pelletti	1	21,6	22,7	1
Kivihiili	9	26,0	28,8	10

Tiheys

Polttoaineen tiheydellä on vaikutusta kuljetuskustannuksiin. Jos tiheys on suuri, ovat kuljetuskustannukset pienemmät massayksikköä kohti. Taulukon 3 mukaisen kostean hakkeen tiheys on vain noin puolet kivihiilen tiheydestä. Puun tiheys pienenee entisestään torrefioinnissa, mutta pelletöimällä torrefioitua puuta sen tiheyttä saadaan kasvatettua huomattavasti.

Energiatiheys

Pelkästään tiheys ei ole ratkaiseva tekijä polttoaineiden kuljetuskustannuksissa, koska tiheys ei kerro suoraan polttoainemäärän sisältämää energiaa. Kun tarkastellaan kostean polttoaineen tehollisen lämpöarvon ja tiheyden avulla määritettyä energiatiheyttä, saadaan tulokseksi esimerkiksi yhdessä kuutiometrissä olevan polttoainemäärän energiasi-

sältö. Taulukosta 3 nähdään, että torrefioidun puun pelletointi lisää sen tiheyttä ja energiatiheys kasvaa jopa nelinkertaiseksi.

Rikkipitoisuus

Polttoaineiden sisältämä rikki on ongelmallinen, koska polttoaineen palaessa syntyy rikin oksideja SO_2 ja SO_3 . Rikkitrioksidia on yleensä vain muutamia prosentteja, mutta se reagoi savukaasujen veden kanssa ja muodostaa rikkihappoa H_2SO_4 . Jos rikkihappohöyry pääsee lauhtumaan kattilan lämpöpinnoille, aiheutuu syöpymistä. Rikkidioksidi hapettuu ilmakehässä vähitellen rikkitrioksidiksi ja aiheuttaa edelleen veden kanssa reagoissa happosateita. Kivihiilen rikkipitoisuus voi olla lähes 4 %, mutta puuperäisissä polttoaineissa rikkiä ei ole käytännössä yhtään. Näin myöskään torrefioidussa puussa ei ole rikkiä. Kivihiiltä korvaamalla voidaan estää rikin aiheuttamia ongelmia.

Jauhautuvuus

Eräs tärkeä ominaisuus polttoaineilla on niiden jauhautuvuus. Pölypolttoa käytettäessä polttoaine esikäsitellään jauhamalla se hienojakoiseksi (Raiko 2002, 455–456). Jauhautuvuus määritellään kuinka paljon tarvitaan sähkötehoa tietyn polttoainetehon aikaansaamiseksi. Biomassa jauhetaan yleensä pelletteinä. Taulukossa 3 on esitetty suhdelukuja jauhamisen vaatimaksi tehoksi. Tavallisten puupellettien vaatima teho on moninkertainen kivihiileen ja torrefioituun puuhun verrattuna ja lisäksi puupellettejä ei voida polttaa pölypoltossa suurta määrää kivihiilen seassa. Torrefioidun pelletin jauhaminen vaatii sen sijaan vähemmän energiaa kuin kivihiilen jauhaminen ja sitä voidaan myös polttaa hyvin pölypolttona.

Taulukko 3. Polttoaineiden ominaisuuksia (Bergman 2005a, 18) (Huhtinen 1994, 38)

Polttoaine	Tiheys [kg/m ³]	Energiatiheys [GJ/m ³]	Rikkipitoisuus [%]	Jauhamisen energia [kW/MW]
Puu (hake)	550	5,8	<1	
Puupelletti	650	10,5	<1	20
Torrefioitu puu	230	4,6	<1	
Torrefioitu pelletti	850	18,4	<1	1
Kivihiili	1100	28,6	<4	3

Koostumus

Polttoaineiden alkuainekoostumus vaihtelee paljon etenkin hiilen osalta. Yleisesti voidaan todeta, että luonnontilassa olevien polttoaineiden hiilipitoisuus kasvaa ajan kuluessa. Antrasiitti on iältään vanhinta kivihiiltä ja sen hiilipitoisuus on jopa 98 %. Kuivan puun hiilipitoisuus on noin 50 %, mutta torrefioinnissa hiilipitoisuus nousee 60 %:iin (Edward 2002). Taulukossa 4 on eri polttoaineiden alkuainekoostumuksia.

Taulukko 4. Polttoaineiden koostumuksia (Bergman 2005a, 18) (Huhtinen 1994, 38)

Polttoaine	Hiili C	Vety H	Rikki S	Happi O	Typpi N	Tuhka
Puu (hake)	50,4	6,2	0,0	42,5	0,5	0,4
Puupelletti						
Torrefioitu puu	59,7	5,6	0,0	32,9	0,3	0,6
Torrefioitu pelletti						
Kivihiili (puolalainen)	73,5	4,7	1,0	9,1	1,0	11,0

4.8 Laitteistoja maailmalla

Pieniä torrefiointikoelaitoksia on rakennettu jo ympäri maailmaa. Edelläkävijänä on Hollanti, jossa oli rakenteilla kolme laitosta vuonna 2010 (Fredriksson 2010, 8–9). Suomalainen metalliteollisuusyhtiö Metso on myös suunnitellut aloittavansa torrefiointilaitoksen rakentamista Ruotsiin (GoforWood.info. 2004). Seuraavassa on esitetty kolme erilaista laitetta tai järjestelmää, joilla biomassaa voidaan lämpökäsitellä. Laitteista ensimmäinen on tarkoitettu pelkästään torrefioidun puun tuottamiseen ja muut laitteet tuottavat joko pää- tai sivutuotteena puuhiiltä. Puuhiilen tuotanto toimii kuitenkin samoilla periaatteilla kun torrefioidun puun tuotantokin.

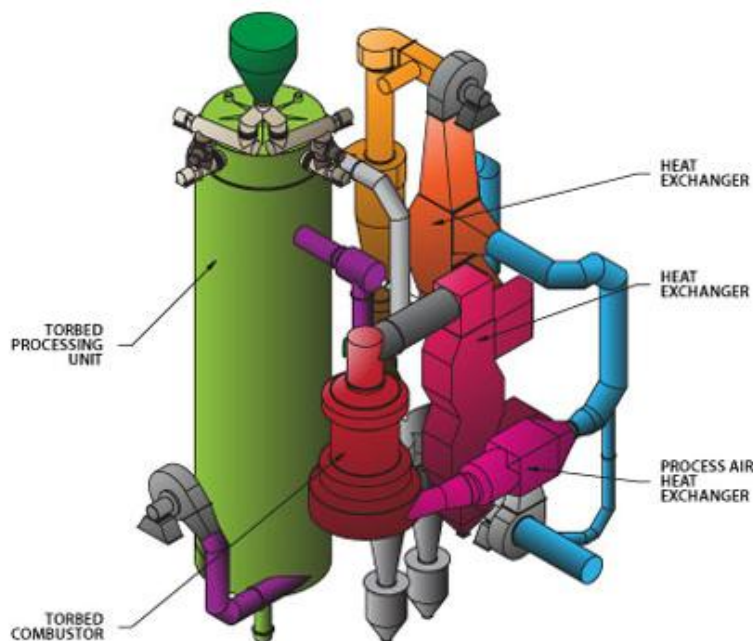
Topell Energy

Topell Energy on suunnitellut biomassan torrefiointiin laitteiston, jossa käytetään patentoitua Torbed-reaktoria. Reaktorin on kehittänyt Torftech Ltd vuonna 1998. Laitteen toiminta perustuu reaktorikammiossa pyörivään nopeaan kaasuvirtaukseen, joka siirtää tehokkaasti lämpöä reaktorin keskellä olevaan biomassaan. Reaktorin sisällä ei ole liikuvia osia. (Topell Energy 2011)



Kuva 17. Torbed reaktori (Topell Energy 2011)

Torrefointiprosessia on kehitetty reaktoria hyödyntäen ja tuloksena on saatu alla olevan kuvan mukainen prosessi. Laitteiston avulla lämmönsiirto saadaan erittäin tehokkaaksi, jolloin biomassan käsittelyajat pienenevät. Biomassojen laatu ja partikkelikoko voi vaihdella, eikä massoja tarvitse pienentää tiettyyn palakokoon. Lisäksi alhaisten painehäviöiden ansiosta laitteiston energiankäytön hyötysuhde on hyvä. (Topell Energy 2011)



Kuva 18. Prosessilaitteita (Topell Energy 2011)

Prosessia on testattu helmikuusta 2009 alkaen ja tänä aikana on tehty jo yli 800 torrefioitua biomassanäytettä. Laitetekniikkaa on kokeiltu erikokoisina järjestelminä pienistä koelaitteista laitoksiin asti. Eräs koelaitteisto sijaitsee tällä hetkellä Gaswärme tutkimuslaitoksessa Saksan Essenissä. Ensimmäinen kaupallinen torrefiointilaitos on rakenteilla Duivenissa Hollannissa. (Topell Energy 2011)



Kuva 19. Koelaitteisto (Topell Energy 2011)

Mikkelin ammattikorkeakoulu

Suomessa on poltettu puuta jo vuosisatojen ajan miilumenetelmällä ja saatu päätuotteena tervaa. Mikkelin ammattikorkeakoulun käyttämä laite ”hiiliretortti” on nykyaikainen miilu, josta saadaan nestemäisiä jalostustuotteita. Hapettomassa palamisessa syntyy sivutuotteena puuhiiltä, jota voidaan käyttää esimerkiksi grillihiilenä.

Raussi-yhtiöt

Sippolassa sijaitseva Raussi-yhtiöt valmistaa muun muassa koneita energiapuun tekoon ja turpeen tuotantoon. Yhtiö on suunnitellut ja kehittänyt lisäksi puuhiilen valmistukseen hiiliretortteja, joita tuotetaan myyntiin. Hiiliretortti täytetään kaseteilla, joihin on laitettu puupilkettä. Alla olevassa kuvassa on lieriön muotoinen retortti, jota voidaan siirrellä esimerkiksi kuvan mukaisesti traktorilla. Retorteilla on mahdollista valmistaa jopa 36 m³ puuhiiltä viikossa. (Raussi-yhtiöt 2011)



Kuva 20. Hiiliretortti (Raussi-yhtiöt 2011)

5 TORREFIOINTIKOKEITA

Tässä luvussa käsitellään laboratoriossa tehtyjä torrefiointikokeita.

5.1 Tarkoitus

Kokeiden tarkoituksena on havainnollistaa torrefioinnissa tapahtuvia biomassan muutoksia ja kokeissa on tehty joitain yksinkertaistuksia. Tuhkapitoisuuden vaikutusta ei ole

korjattu massahäviöihin. Lämpöarvoina käytetään kalorimetrisiä lämpöarvoja, koska näytteiden vetytitoisuutta ei ole selvitetty. Näytteistä puristetuista pelleteissä on käytetty kiintotiheyden arvoja.

5.2 Laitteet ja välineet

Seuraavassa on esitelty torrefiointikokeissa käytetyt laitteet ja välineet.

Kuivausuuni

Biomassanäytteet kuivataan kuivausuunissa. Uuni lämmitetään veden höyrystymispisteen yläpuolelle, jonka jälkeen uunin kautta kierrätetään ilmaa läpi. Ilma sitoo polttoaineesta irtoavaa vesihöyryä ja poistaa sen uunista. Ilman kierrätys perustuu joko luonnolliseen konvektioon kylmän ja kuumen ilman välillä, jossa kylmä ilma otetaan uunin alaosasta ja poistetaan yläosasta. Ilman kierrätyksessä voi olla apuna myös puhallin. Kokeissa käytettiin Digiheat DH 250–36 konvektiouunia näytteiden kuivaukseen.



Kuva 21. Kuivausuuni

Tarkkuusvaa'at

Koska näytteiden massat ovat hyvin pieniä, kannattaa kokeissa käyttää tarkkuusvaakoja. Alla olevassa kuvassa olevilla vaa'oilta voidaan punnita näytteitä tarvittaessa 0,00001 g tarkkuudella 2 kg asti.

Vaa'at vasemmalta oikealle:

- Precisa XR 205SM-DR
- Ohaus TS400D
- Precisa BJ 2200C



Kuva 22. Kokeissa käytettäviä vaa'koja

Lämpökäsittelyuuni ja kalorimetri

Lämpökäsittelyuuni sopii hyvin näytteiden lämmittämiseen, koska uuni voidaan tarvittaessa lämmittää jopa 1100 °C lämpötilaan erilaisia sovelluksia varten. Pommikalorimetrin avulla saadaan selvitettyä näytteen kalorimetrinen lämpöarvo, joka tarkoittaa täydellisessä palamisessa vapautuvaa energiamäärää. Kalorimetriseen lämpöarvoon on myös huomioitu polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa syntyvän vesihöyryn lauhduttaminen vedeksi.



Kuva 23. Pommikalorimetri Parr 6300 (vasemmalla) ja lämpökäsittelyuuni Nabertherm L5/11/P320 (oikealla)

Jauhin ja pellettiprässi

Lämpöarvon määrittystä varten näyte jauhetaan ensin tasalaatuisiksi jauhimen avulla. Näyte kaadetaan jauhimen vasemmassa yläkulmassa olevasta luukusta sisään, jonka jälkeen näyte painetaan jauhimen teriä vasten oikealla puolella olevalla puupalkilla. Jauhimen tehonkulutusta seuraamalla voidaan myös määrittää suuntaa-antavia arvoja polttoaineen jauhamiseen tarvittavasta energiasta.



Kuva 24. Jauhin Retsch SM 100 ja pellettiprässi

Jauhettu näyte puristetaan pelletiksi pellettiprässillä. Kalorimetrin oikeanlaisen toiminnan kannalta näyte on pelletoitävä. Pellettiprässi toimii samalla periaatteella kuin hydraulinen tunkki ja sitä voidaan ohjata paineilmalla.

5.3 Koemenetelmät

Laboratoriokokeissa tutkittiin erilaisten biomassojen energiatiheyden muuttumista torrefioinnissa, torrefioidun biomassan kosteuden sitomista sekä jauhautuvuutta. Mittauspöytäkirjat ovat liitteinä.

5.3.1 Energiatiheyden määrittäminen

Kokeeseen otettiin 12 näyte-erää kosteasta kokopuuhakkeesta, jotka jaoteltiin alumiinivuokiin. Kunkin näytteen massa oli noin 100 grammaa. Kosteita hakenäytteitä pidettiin koetta varten kuivausuunissa 105 °C:ssa 24 tunnin ajan. Standardin CEN/TS 14774–2 mukaan kiinteä biopolttoaine oletetaan kuivaksi tämän toimenpiteen jälkeen, kun näytteen massa pysyy muuttumattomana (Suomen standardisoimisliitto SFS 2004, 6).

Kuivuneet hakenäytteet punnittiin kuivauksen jälkeen ja jokaisen massa kirjattiin ylös. Näistä 11 astiaa jaoteltiin torrefioitavaksi 200–300 °C lämpötiloissa 10 °C välein. Yksi astia jätettiin vertailunäytteeksi kuivan käsittelemättömän hakkeen analyysiin.

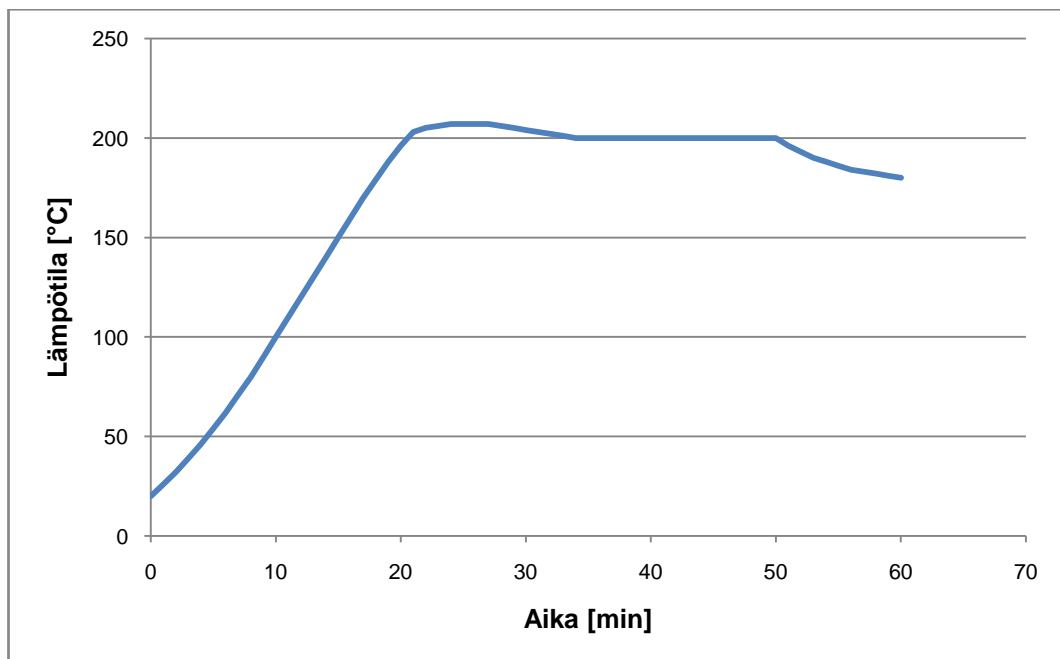
Torrefiointi suoritettiin lämpökäsittelyuunin avulla seuraavasti (esimerkkinä 200 °C näyte):

- uunin tuuletusaukot suljettiin, jotta uuni olisi mahdollisimman ilmatiivis
- alumiiniastia päällystettiin alumiinifoliolla ja laitettiin uuniin, jolloin näytteestä pääsi haihtumaan haihtuvia aineita, mutta happea ei päässyt näytteen joukkoon
- lämpötila nostettiin noin 10 °C/min nopeudella 200 °C:een
- näytettä pidettiin 30 minuuttia 200 °C:ssa, jonka jälkeen näyte otettiin jäähtymään uunin ulkopuolelle



Kuva 25. Hakkeen torrefiointi alumiinivuoassa

Lämpötila nousi kuitenkin uunin ominaisuuksien takia suurimmillaan 207 °C lämpötilaan. Uunin lämmitysnopeutta hidastamalla lämpötilan vakautuminen 200 °C:een olisi onnistunut paremmin, mutta tästä ei oleteta kuitenkaan aiheutuneen suurta virhettä näytteeseen. Luvussa 5.5 tarkastellaan ”liiallisen” lämmityksen aiheuttamia mahdollisia virheitä.



Kuva 26. Uunin lämpötilan seuranta torrefioitaessa 200 °C näytettä (mittaustulokset liitteessä 1)

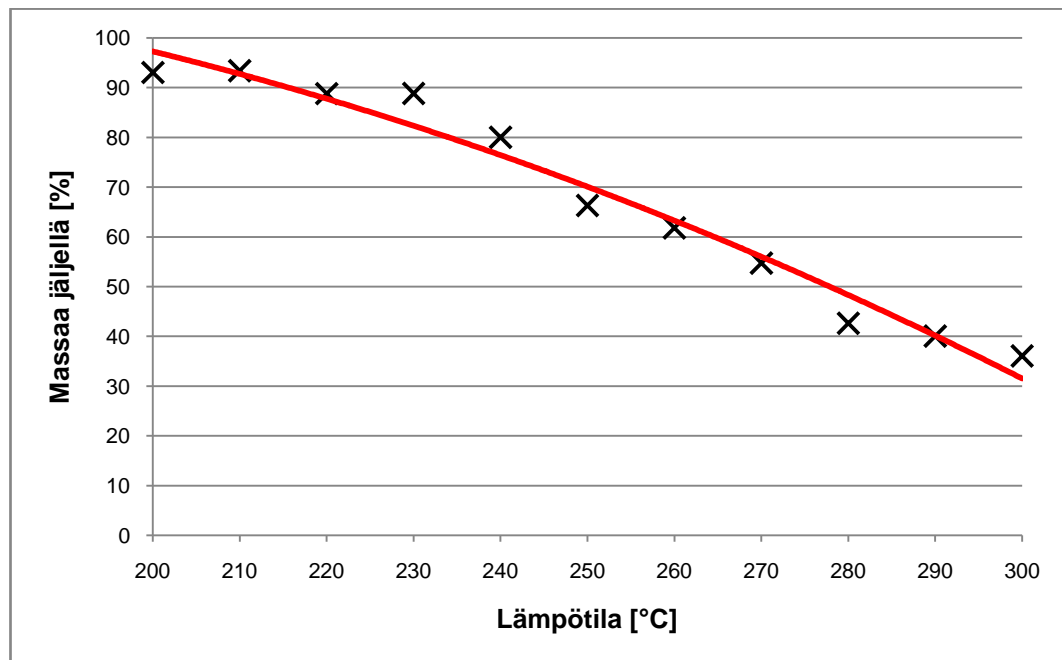
Samat toimenpiteet tehtiin myös muille torrefioitaville näytteille.

Kun näytteet olivat jäähtyneet, näyteastioista poistettiin suojafolio ja näytteet punnittiin. Jäljellä olevat massat määritettiin yhtälön 1 avulla.

$$M = \frac{(m_{\text{torr}} - m_{\text{ast}})}{(m_{\text{norm}} - m_{\text{ast}})} \cdot 100 \% \quad (1)$$

jossa	M	jäljellä oleva massa [%]
	m_{torr}	torrefioidun näytteen + astian massa [g]
	m_{norm}	käsittelemättömän näytteen + astian massa [g]
	m_{ast}	astian massa [g]

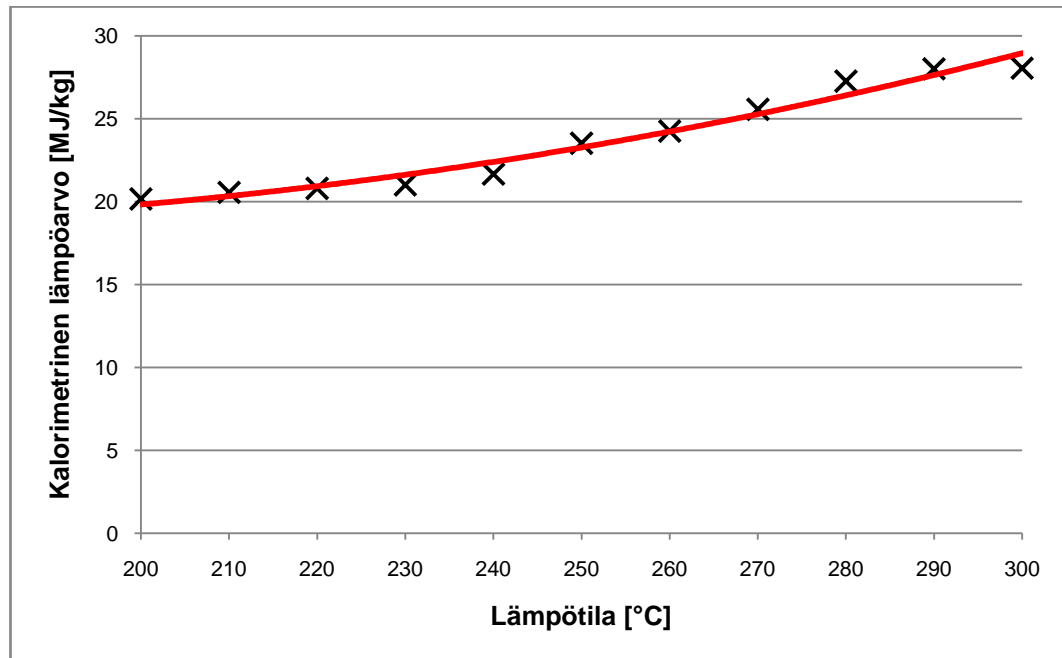
Alla olevassa kuvaajassa on näkyvissä näytteissä jäljellä olevat massat. Kun lämpötila kasvaa, haihtuu näytteestä enemmän massaa pois.



Kuva 27. Torrefioitujen näytteiden jäljellä olevat massat (mittaustulokset liitteessä 2)

Näytteet jauhettiin ja jauheista puristettiin kolme rinnakkaista pellettä. Pelletit poltettiin pommikalorimetrissä. Kalorimetrin antamista tuloksista rinnakkaispelleteille valittiin ”keskimmäinen”, koska tämän arvon oletetaan olevan lähimpänä oikeaa arvoa. Lämpö-

arvon määrittämisen virhettä tarkastellaan luvussa 5.5. Kuvasta 28 nähdään miten lämpöarvo kasvaa, kun torrefiointilämpötilaa nostetaan.



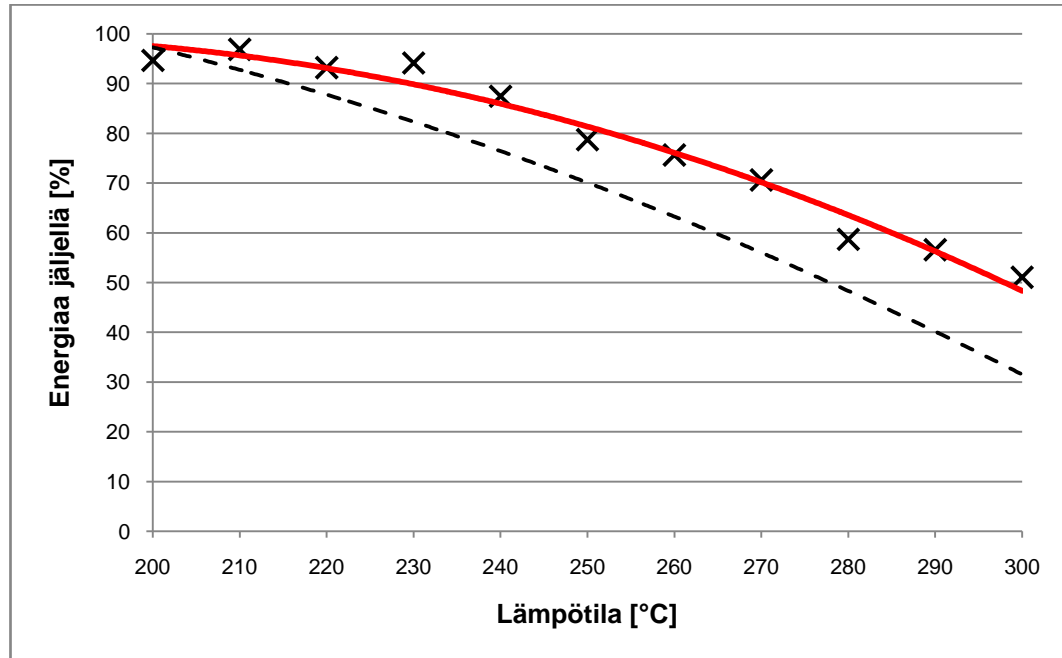
Kuva 28. Torrefioitujen näytteiden kalorimetriset lämpöarvot (mittaustulokset liitteessä 3)

Näytteiden jäljellä olevan massan sekä lämpöarvon perusteella pystyttiin määrittämään jäljellä oleva energia. Koska lämpöarvo kasvaa torrefiointilämpötilan kasvaessa, kasvaa myös jäljellä olevan energian suhde jäljellä olevaan massaan. Jäljellä oleva energia eri näytteille voitiin määrittää alla olevan yhtälön mukaan, kun käsittelemättömän hakkeen lämpöarvo (19,82 MJ/kg) oli tiedossa ja sen massasta sekä energiasta oli molemmista 100 % jäljellä.

$$E = \frac{H_{gr,torr}}{H_{gr,norm}} \cdot M \quad (2)$$

jossa	E	jäljellä oleva energia [%]
	$H_{gr,torr}$	torrefioidun näytteen lämpöarvo [MJ/kg]
	$H_{gr,norm}$	käsittelemättömän näytteen lämpöarvo [MJ/kg]
	M	jäljellä oleva massa [%]

Yhtälön 2 mukaan lasketut arvot jäljellä oleville energioille on esitetty kuvassa 29. Katkoviivalla on kuvattu vertailuksi jäljellä olevaa massaa.



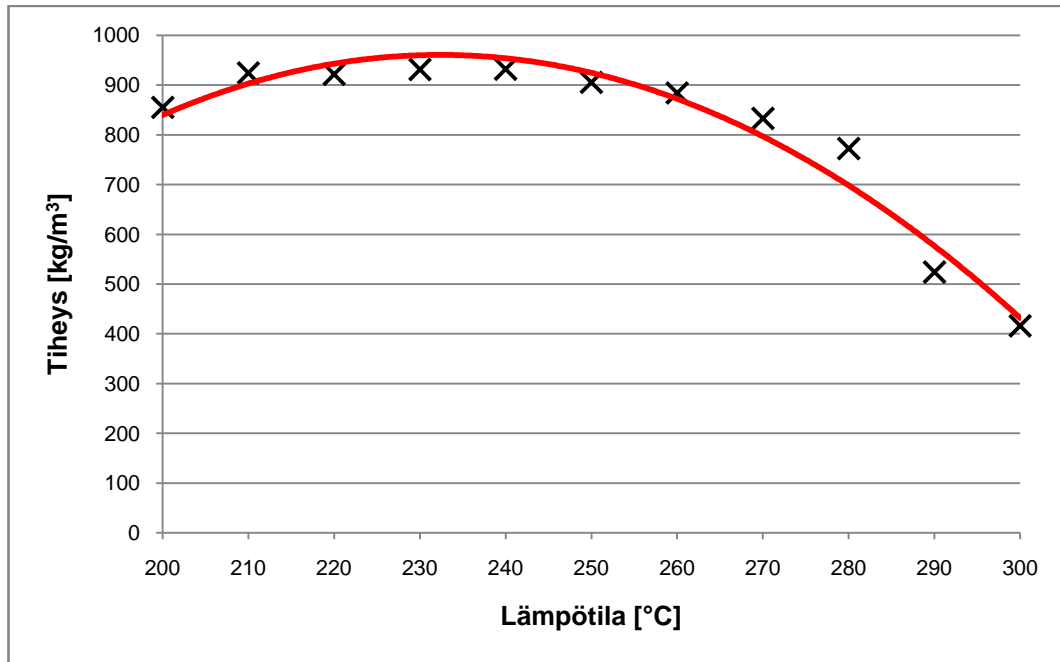
Kuva 29. Torrefioitujen näytteiden jäljellä olevat energiat

Jauhetuista näytteistä puristettiin seuraavaksi pellettejä kiintotiheyden määrittystä varten. Kiintotiheys saatiin alla olevalla yhtälöllä.

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h} \quad (3)$$

jossa	ρ	kiintotiheys [kg/m ³]
	m	pelletin massa [kg]
	d	pelletin halkaisija [m]
	h	pelletin korkeus [m]

Pelletit puristettiin prässillä viiden tonnin paineeseen ja punnittiin tämän jälkeen. Pelletin koko mitattiin työntömitan avulla. Kuvasta 30 nähdään kiintotiheydet, jotka erilaisilla lämpötiloilla käsiteltyinä oli mahdollista saavuttaa. 250 °C lämpötilan jälkeen hake alkoi muuttua selvästi hiilimäiseksi, jolloin tiheyttä ei enää pystytty saamaan kovin suureksi. Käsittelemättömän hakkeen kiintotiheys oli noin 850 kg/m³.



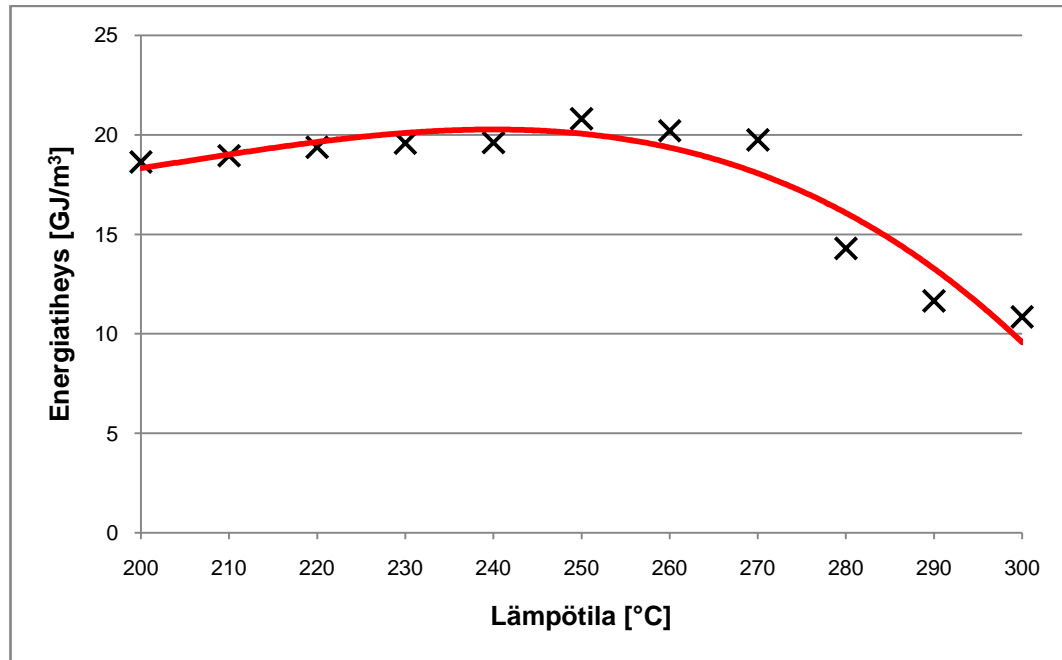
Kuva 30. Torrefioitujen näytteiden kiintotiheydet pelletöitynä (mittaustulokset liitteessä 4)

Tiheyden ja lämpöarvon mukaan voitiin määrittää näytteen energiatiheys yhtälön 4 mukaan.

$$H_d = H_{gr,torr} \rho \quad (4)$$

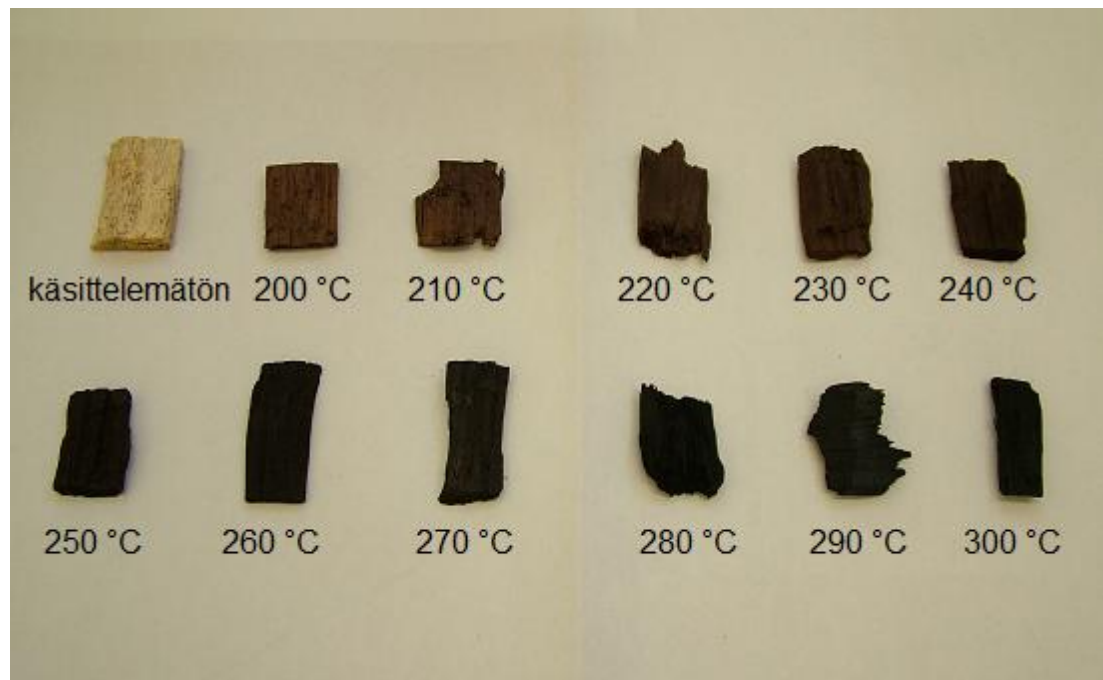
jossa	H_d	energiatiheys [MJ/m ³]
	$H_{gr,torr}$	torrefioidun näytteen lämpöarvo [MJ/kg]
	ρ	kiintotiheys [kg/m ³]

Energiatiheyksien mukaan tehdystä kuvaajasta (kuva 31) nähdään, että suurin energiatiheys kiintotiheyden mukaan saatiin hakkeelle 250 °C torrefioinnilla. Käsittlemättömän hakkeen energiatiheys oli kiintotiheyden (850 kg/m³) ja lämpöarvon (19,82 MJ/kg) mukaan noin 17 GJ/m³.



Kuva 31. Torrefioitujen näytteiden energiatiheydet pelletöitynä

Kuvassa 32 on lopuksi torrefioitujen näytteiden värien vertailua. 200 °C:ssa käsitelty puu on vaaleanruskeaa, mutta yli 250 °C lämpötiloissa väri muuttuu jo lähes mustaksi.



Kuva 32. Näytteiden vertailua.

5.3.2 Kosteuden kertyminen

Käsittlemättömän ja torrefioidun hakkeen kosteuden sitomista tutkittiin seuraavalla koejärjestelyllä. Näytteet kuivattiin kuivausuunissa, jonka jälkeen toinen näyte torrefioitiin alla olevilla arvoilla.

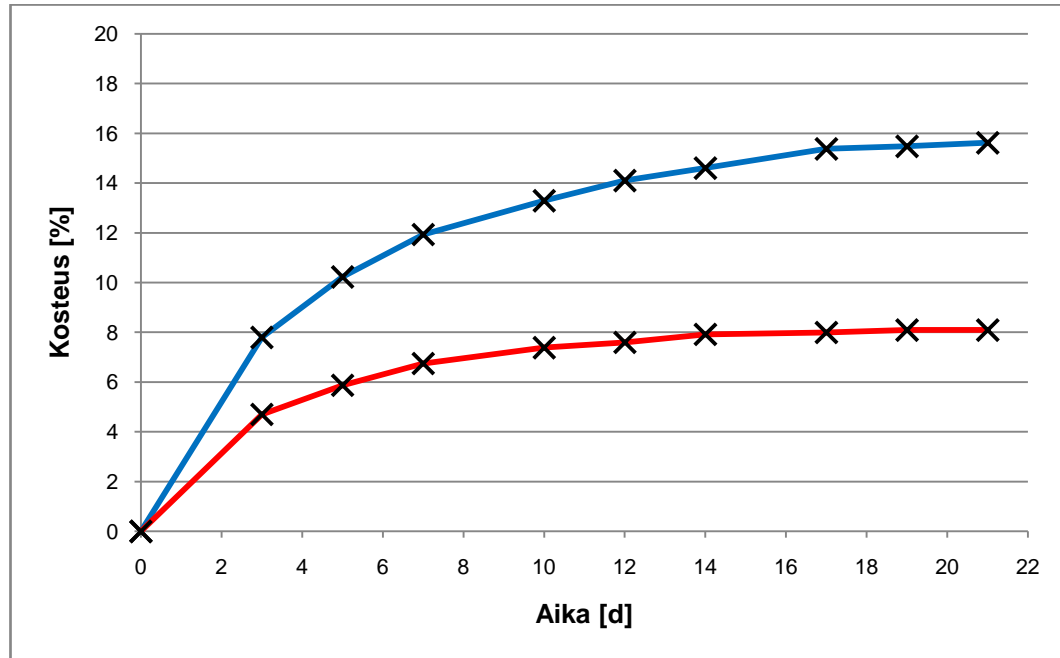
- lämmitysnopeus 10 °C/min
- lämpötila 250 °C
- pitoaika 30 min

Molemmat näytteet laitettiin suljettuun muovipussiin, jossa oli lisäksi vesiastia. Tällä menetelmällä muovipussin sisällä olevaan ilmaan muodostui käytännössä 100 % suhteellinen ilmankosteus. 100 % suhteellisia ilmankosteuksia voi esiintyä esimerkiksi helteisinä kesäpäivinä.



Kuva 33. Kosteuskertymän määrittäminen

Näytteitä punnittiin määräajoin kolmen viikon ajan ja niiden kosteuspitoisuus muuttui tänä aikana alla olevan kuvaajan mukaisesti.



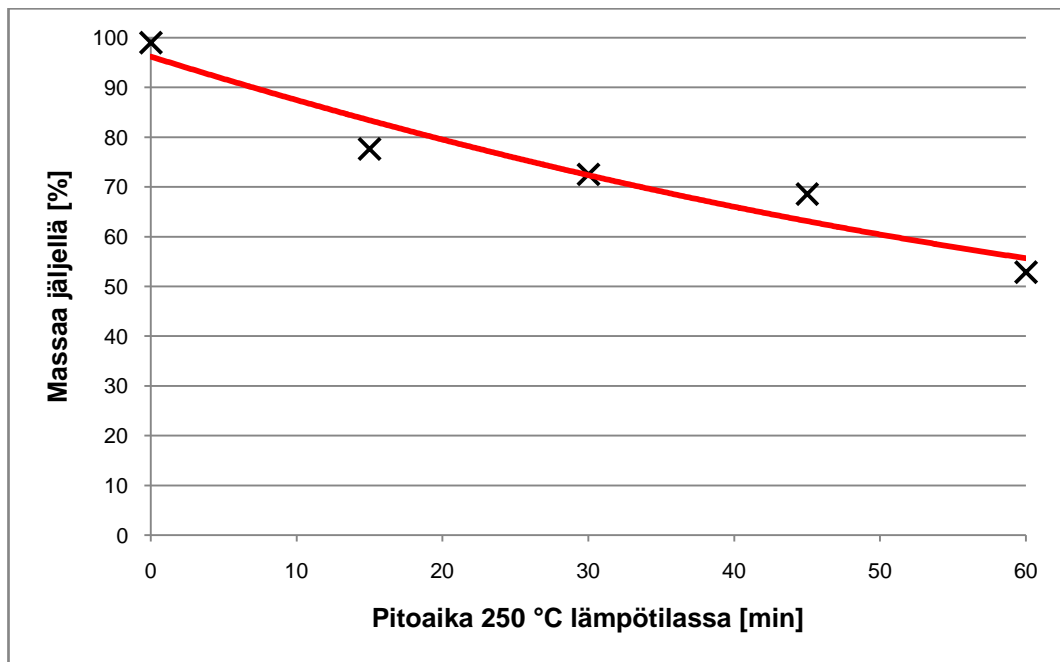
Kuva 34. Kosteuskertymä kolmen viikon aikana (mittaustulokset liitteessä 5)

Kuvaajassa sininen käyrä tarkoittaa tavallisen hakkeen kosteuspitoisuutta. Torrefioidun hakkeen kosteus on punaisella käyrällä. Kuvaajasta nähdään, että torrefioidun hakkeen kosteuspitoisuus asettui noin 8 % pitoisuuteen. Tämän kosteuspitoisuuden mukaan torrefioidussa näytteessä ei esiintyisi myöhemmin homehtumista tai lahoamista, koska kosteuspitoisuus on alle 20 %.

Kosteuden kertymistä voidaan myös seurata niin sanotulla sääkaapilla, jolla on mahdollista saada aikaan erilaisia ympäristöolosuhteita esimerkiksi suhteelliselle kosteudelle, lämpötilalle ja hiilidioksidipitoisuudelle. Tässä kokeessa päädyttiin kuitenkin muovipussin avulla tehtyyn ”ympäristöön”, koska suuren ilmankosteuden pitäminen jatkuvana rasittaa sääkaappia. Muovipussista mitattiin kosteusmittarilla suhteelliseksi ilmankosteudeksi 95 %.

5.3.3 Lämmitysajan vaikutus massahäviöön

Lämmitysajan vaikutusta massahäviöön vertailtiin torrefioimalla haketta 250 °C lämpötilassa. Lämpötila nostettiin 10 °C/min nopeudella tavoitearvoon ja näyte poistettiin uunista pitoajan jälkeen. Alla olevassa kuvaajasta nähdään, millainen vaikutus lämmitysajalla on massahäviöön.



Kuva 35. Lämmitysajojen vertailua (mittaustulokset liitteessä 6)

Ensimmäisessä kokeessa (0 min) näyte poistettiin heti, kun uunissa oli 250 °C lämpötila. Kuvaajasta nähdään, että lämmitysajan kasvattamisessa massaa haihtuu enemmän pois.

5.3.4 Vaihtoehtoisten biomassojen torrefiointi

Luvun 5.3.1 menetelmän mukaan torrefioitiin männyn kuorta, ruokohelpiä, sahanpurua ja turvetta (250 °C, 30 min, 10 °C/min). Näistä biomassoista tutkittiin energiatheyden muuttumista pelletöitynä. Kaikkien biomassojen massa pieneni ja kalorimetrinen lämpöarvo kasvoi. Näin ollen kaikissa näytteissä jäljellä oleva energia oli suurempi kuin jäljellä oleva massa (taulukko 5).

Taulukko 5. Biomassojen jäljellä oleva energia torrefioinnin jälkeen (mittaustulokset liitteessä 7)

Biomassa	Jäljellä oleva massa [%]	Kalorimetrinen lämpöarvo [MJ/kg]		Jäljellä oleva energia [%]
		käsittelemätön	torrefioitu	
Kuori	92,9	20,13	21,03	97,0
Ruokohelpi	82,5	19,06	20,40	88,3
Sahanpuru	97,5	20,40	20,62	98,5
Turve	90,9	22,57	23,19	93,4

Kokeiden perusteella ainoastaan kuoren kiintotiheyttä voitiin kasvattaa torrefioinnin avulla. Torrefioidun turpeen kiintotiheys pieneni jopa niin paljon, että energiatheys pieneni myös. Turpeen torrefioinnista kannattaa kuitenkin tehdä jatkotutkimuksia tulosten varmistamiseksi.

Taulukko 6. Biomassojen energiatheyksiä pelletöitynä (mittaustulokset liitteessä 7)

Biomassa	Tiheys pelletöitynä [kg/m ³]		Energiateheys pelletöitynä [GJ/m ³]	
	käsittelemätön	torrefioitu	käsittelemätön	torrefioitu
Ruokohelpi	973,3	949,5	19,59	19,97
Sahanpuru	952,2	948,4	18,15	19,35
Kuori	978,2	1011,6	19,96	20,86
Turve	1018,7	943,7	22,99	21,88

Biomassojen värien muutoksia on nähtävissä kuvassa 36. Käsittelemättömät biomassat ovat kuvassa yläpuolella ja torrefioidut alapuolella.

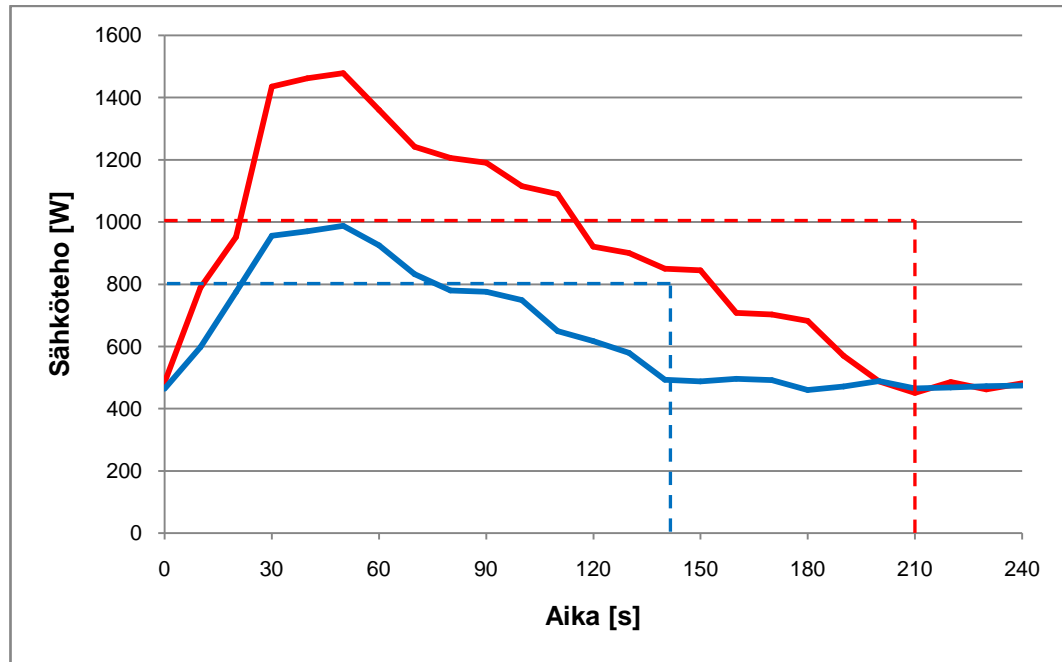


Kuva 36. Erilaisten biomassojen torrefiointia

5.3.5 Jauhautuvuus

Torrefioidun (250 °C, 30 min, 10 °C/min) ja käsittelemättömän hakkeen jauhautuvuutta tutkittiin ja vertailtiin jauhimen tehontarpeen ja jauhautuneen massan perusteella. Jauhimeen liitettiin tehomittari, josta seurattiin sähkötehoa eri ajanhetkillä. Jauhin käynnistettiin ja kun tyhjäkäyntiteho (noin 500 W) oli saavutettu, laitettiin hakenäyte jauhimeen. 30 sekunnin aikana näyte painettiin teriä vasten ja odotettiin, kunnes näyte oli jauhautunut. Käytännössä näyte oli jauhautunut, kun jauhin kävi taas tyhjäkäyntiteholla.

Kuvassa 37 olevassa kuvaajassa on esitetty punaisella käyrällä käsittelemättömän hakkeen jauhamiseen vaadittava sähköteho eri vaiheissa ja sinisellä käyrällä torrefioidun hakkeen vaatima sähköteho. Molemmissa tapauksissa sähkötehotarve nousi, kun hake laitettiin jauhimeen ja painettiin teriä vasten (käyrien nouseminen). Sahanpurumainen puu pyöri terien seassa ja jauhautui vähitellen hienojakoiseksi pölyksi (käyrien laskeminen). Pöly tippui siivilän läpi keräysastiaan (loppuvaihe).



Kuva 37. Jauhatuskoe (mittaustulokset liitteessä 8)

Tarvittavaa sähköenergiaa voidaan arvioida kuvaajan mukaan käyrän rajaamasta pinta-alasta tietyllä aikavälillä.

- käsittelemätön hake 0–210 s, keskiteho 1000 W → n. **60 Wh**
- torrefioitu hake 0–140 s, keskiteho 800 W → n. **30 Wh**

Näyttekoko oli noin yksi litra molemmissa tapauksissa ja jauheen massat olivat lopussa.

- käsittelemätön hake n. 100 g
- torrefioitu hake 140 g

Torrefioitua haketta voitiin siis jauhaa noin puolella sähköenergialla tavalliseen hakkeeseen verrattuna, torrefioitua haketta jauhautui nopeammin (vrt. massat) ja lisäksi torrefioidusta jauheesta olisi vapautunut enemmän energiaa poltettaessa (suurempi massa ja lämpöarvo). Kokeen perusteella voidaan olettaa, että myös pölypoltosovelluksissa käytettävillä jauhimilla tarvittaisiin pienempi sähköteho energiayksikön jauhamiseen.

5.4 Tulokset

Laboratoriokokeiden perusteella voidaan todeta, että torrefioinnin avulla voidaan parantaa hakkeen energiatiheyttä. Hakkeen jauhaminen jauheeksi kuluttaa energiaa huomattavasti vähemmän, kun hake on torrefioitu. Hake ei kerää kosteutta torrefioituna niin paljon kuin käsittelemättömänä. Myös muiden biomassojen torrefiointi voi olla kannattavaa, jolloin edellä mainittuja ominaisuuksia saadaan parannettua myös niistä.

5.5 Epävarmuuksia

Kokeiden tulokset vaikuttavat järkeviltä, mutta eri kuvaajista on kuitenkin nähtävissä pieniä poikkeamia, jotka voivat johtua koemenetelmien ja mittauksien virheistä. Seuraavassa on käsitelty asioita, jotka voivat aiheuttaa virheitä tuloksiin.

Torrefiointilämpötila

Luvun 5.3.1 kuvaajassa esitettiin uunin lämpötila eri ajanhetkillä torrefioinnin aikana. Tarkoituksena oli torrefoida näytettä 200 °C lämpötilassa, mutta uunin lämpötila nousi kuitenkin hieman yli 200 °C lämpötilaan noin 10 minuutin ajaksi ja oli suurimmillaan 207 °C. Koska lämpötila nousi tavoitelämpötilan yläpuolelle lämmityksen alkuvaiheessa, ei tämän oleteta aiheuttavan suurta virhettä näytteeseen. Näytteessä tapahtuvat reaktiot 200 °C lämpötilassa olivat vasta alkuvaiheessa ja näin liian suuren lämpötilan aiheuttamia reaktioita ei päässyt käytännössä syntymään. Muissa lämpötiloissa tehdyissä näytteissä lämpötila nousi myös hieman yli tavoitelämpötilan.

Massahäviöt

Torrefioinnissa massaa haihtui kaasuina alumiinifolion reunojen kautta. Kun näytteet oli jäähdytetty ja suojafolio poistettu, päällimmäisissä hakelastuissa oli tervaa jonkin verran. Terva olisi haihtunut kokonaan, jos astia olisi ollut avonainen. Todellinen jäljellä oleva massa olisi ollut tässä tapauksessa pienempi kuin koetuloksissa.

Todellisen lämpöarvon epävarmuus

Näytteet (noin 100 g) jauhettiin jauheeksi, mutta jauheesta puristettu kalorimetrissä poltettava pelletti oli vain pieni osa (noin 1 g) koko näytteestä. Tällöin eri pelleteillä oli voinut olla erilainen pitoisuus erimerkiksi tuhkapitoisuudessa, vaikka ne olivat samasta jauheesta puristettuja. Jauhe sekoitettiin mahdollisimman hyvin, jotta näytteestä saatiin tasalaatuinen. Kalorimetrin antamat tulokset eivät käytännössä poikkea, jos saman näytteen pellettien tuhkapitoisuus on yhtä suuri ja pelletit on punnittu oikein.

Näytepellettien puristaminen

Pellettien puristamisessa oli ongelmia, kun yritettiin tehdä pellettejä 300 °C:ssa torrefioidusta hakkeesta. Pelletistä tuli joustava ja hauras, jolloin sen koon mittaaminen ei ollut helppoa tiheyden määrittämistä varten. Tämän perusteella esitetyt kiintotiheyden arvot voivat poiketa huomattavasti oikeista arvoista.

5.6 Vertailua muihin vastaavanlaisiin tutkimuksiin

Prins (2005, 105–116) on tehnyt tutkimusta erilaisten biomassojen torrefioinnista. Hän on käyttänyt kokeissa pyökkiä, pajua, lehtikuusta ja olkea. Koejärjestelyä oli kvartsi-reaktori, joka oli sijoitettu uunin sisälle. Reaktoriin ohjattiin jatkuvasti argonia, jolloin torrefioitavaan biomassa ei päässyt ilmaa. Argonin avulla biomassan haihtuvat aineet saatiin myös pois reaktorista.

Biomassa lämmitettiin kokeissa 10–20 °C/min nopeudella torrefiointilämpötilaan ja pidettiin tämän jälkeen määrääjän kyseisessä lämpötilassa. Massaa jäi jäljelle huomattavasti enemmän, kun verrataan tässä työssä tehtyihin kokeisiin. Koejärjestelyt ja torrefioitavat biomassat erosivat kuitenkin niin paljon, että tuloksia ei voi välttämättä verrata keskenään.

6 KOELAITTEISTO

Koelaitteisto sijoitetaan Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratorioon. Laitteiston tarkoituksena on tuottaa noin 300 kg torrefioitua biomassaa kahdeksan tunnin aikana.

6.1 KyAMK energiatekniikan laboratorio

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratoriossa on sekä opetus-, että tutkimustoimintaa. Opiskelijoille voidaan havainnollistaa erilaisia prosesseja laboratorion laitteistoilla. Energiatekniikan laboratorio jakautuu pienempiin osakokonaisuuksiin, joista merkittävin on päästömittaustalaboratorio. Päästömittaustalaboratorio tekee mittauksia esimerkiksi voimalaitosten savukaasuista. Lisäksi laboratorion keskeisimpiä tutkimuksia ovat kiinteiden polttoaineiden lämpöarvon määritykset. Mittatekniikan keskus on tehnyt päästömittaustalaboratoriolle pätevyuden toteamisen eli akkreditoinnin, joka tarkoittaa mittausten ja tulosten luotettavuuden toteamista. (KyAMK 2010)

6.2 Torrefiointilaitteen toiminta

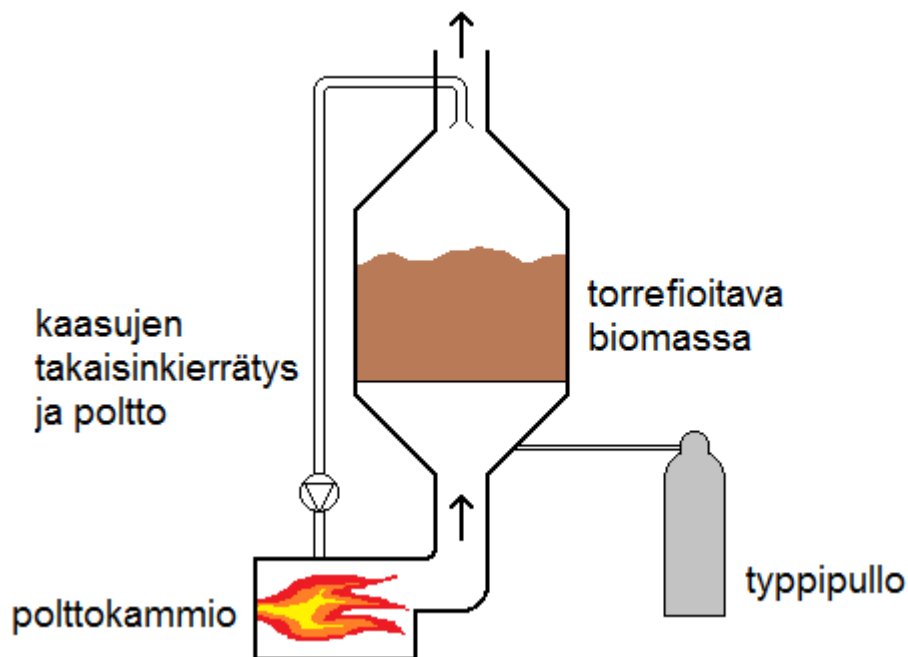
Torrefiointilaitteiston perustarkoituksena on siirtää lämpöenergiaa biomassalla täytettyyn torrefiointireaktoriin. Energia voidaan tuottaa polttoainetta polttamalla tai esimerkiksi sähkövastuksella. Laitteiston alustavassa suunnittelussa on todettu, että nestekaasulla toimiva polttokammio voisi olla järkevä vaihtoehto. Nestekaasun poltosta ei synny liikaavia savukaasuja, nestekaasua on helposti saatavilla ja sitä on helppo polttaa.

Laite on kooltaan niin pieni, että biomassaa kannattaa torrefioida panosperiaatteella. Tämä tarkoittaa että reaktori täytetään biomassalla, jonka jälkeen biomassaa torrefioidaan ja jäädytetään. Jäähtynyt torrefioitu biomassaa poistetaan lopuksi reaktorista. Jäähdetyksessä käytetään suojakaasua, joka estää hapen pääsyn reaktoriin ja pitää reaktorissa jatkuvan ylipaineen ympäröivään paineeseen verrattuna. Suojakaasuna käytetään inerttiä kaasua, joka ei pysty muodostamaan kemiallisia yhdisteitä. Tällaisia kaasuja ovat muun muassa helium, argon, typpi ja hiilidioksidi. Seuraavassa on esitetty kolme erilaista kytkentää, joiden toimintaa vertaillaan ja joista myöhemmin päätetään miten kytkentä kan-

nattaisi toteuttaa. Kaikkiin vaihtoehtoihin sisältyy ainakin polttokammio, reaktori ja typpijäähdytys.

Laite 1

Polttokammiossa muodostuvat savukaasut johdetaan suoraan torrefioitavan biomassakerroksen läpi ja biomassasta haihtuvat kaasut sekoittuvat savukaasujen joukkoon. Osa kaasujen seoksesta kierrätetään puhaltimen avulla takaisin polttokammioon, koska torrefiointikaasuissa on palavia komponentteja.



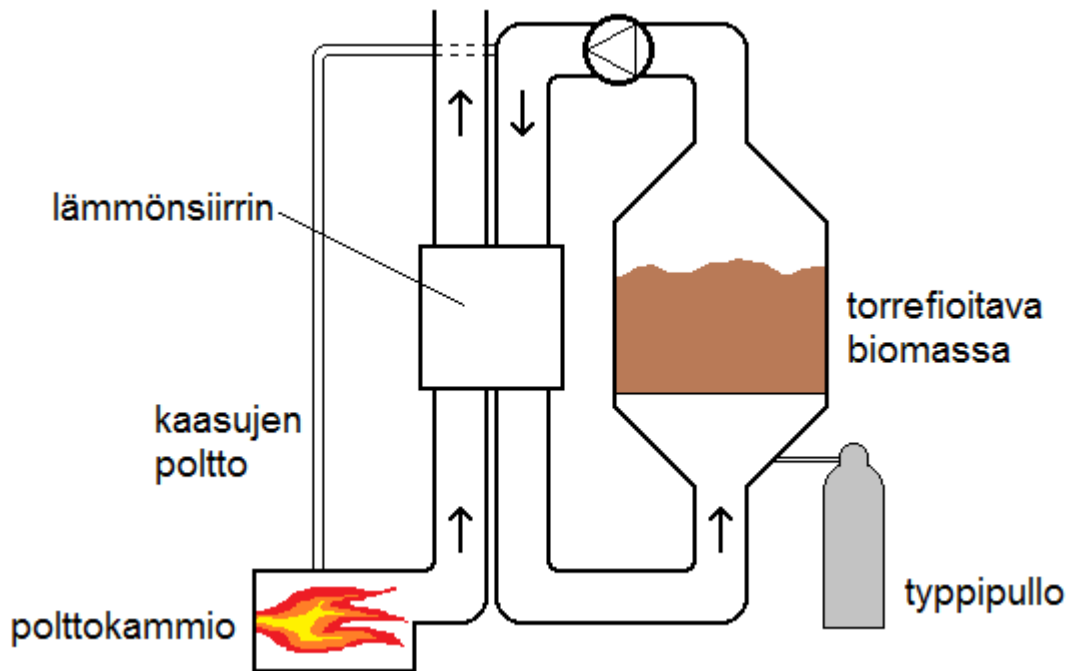
Kuva 38. Torrefiointilaite 1

Etuna kytkennässä on hyvä lämmönsiirtomahdollisuus biomassaan. Kytkentään ei näin myöskään tarvita erillistä lämmönsiirintä, jolla savukaasujen lämpöenergiaa siirretään biomassaan.

Vaikka kytkentä on hyvin yksinkertainen, se sisältää joitain ongelmia. Polttokammiosta tulevissa savukaasuissa ei saa olla jäännöshappea, koska savukaasu on kosketuksissa biomassan kanssa. Savukaasun kierrätys vähentää nestekaasun tarvetta, mutta vain osa palavista kaasuista voidaan siirtää takaisin polttokammioon. Biomassakerroksen aiheuttama painehäviö on myös huomioitava siten, että polttokammiossa on oltava riittävän suuri paine, jotta kaasu virtaisi biomassakerroksen läpi tarvittavalla nopeudella.

Laite 2

Toisessa laitevaihtoehdossa on suurimpana erona ensimmäiseen lämmönsiirrin savukaasujen ja torrefiointikaasujen välillä. Torrefiointikaasut lämmitetään tarvittavaan lämpötilaan lämmönsiirtimen avulla.



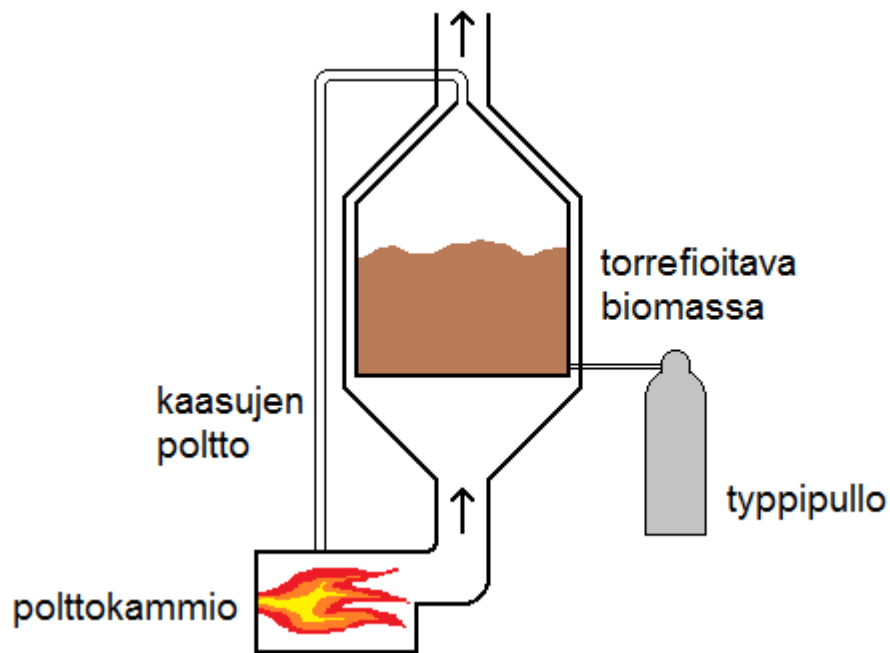
Kuva 39. Torrefiointilaite 2

Kytkenässä voidaan polttaa kaikki torrefiointikaasut polttokammiossa. Polttokammioon ei tarvita niin suurta painetta kuin ensimmäisessä laitteessa, koska savukaasuille aiheutuu painehäviötä pelkästään lämmönsiirtimestä.

Torrefiointikaasujen kierrätyksessä tarvittava puhallin joutuu suurelle rasitukselle, koska kaikki kaasut kierrätetään puhaltimella ja kaasun lämpötila voi olla yli 300 °C. Torrefiointikaasut sisältävät myös likaavia komponentteja sekä syövyttäviä biomassasta muodostuneita happoyhdisteitä kuten puuhappoa. Puhaltimen ominaisuudet ja valmistusmateriaalit on oltava tämän takia tarkoitukseen sopivia.

Laite 3

Kolmas laitevaihtoehto perustuu vanhaan tapaan tuottaa puuhiiltä, jossa hiiltä on tuotettu esimerkiksi nuotiossa olevassa tynnyrissä. Torrefiointireaktori on säiliö, jossa vain yläosa on avonainen. Reaktoria lämmitetään polttokammion savukaasuilla, jotka virtaavat reaktorin ulkopuolella.

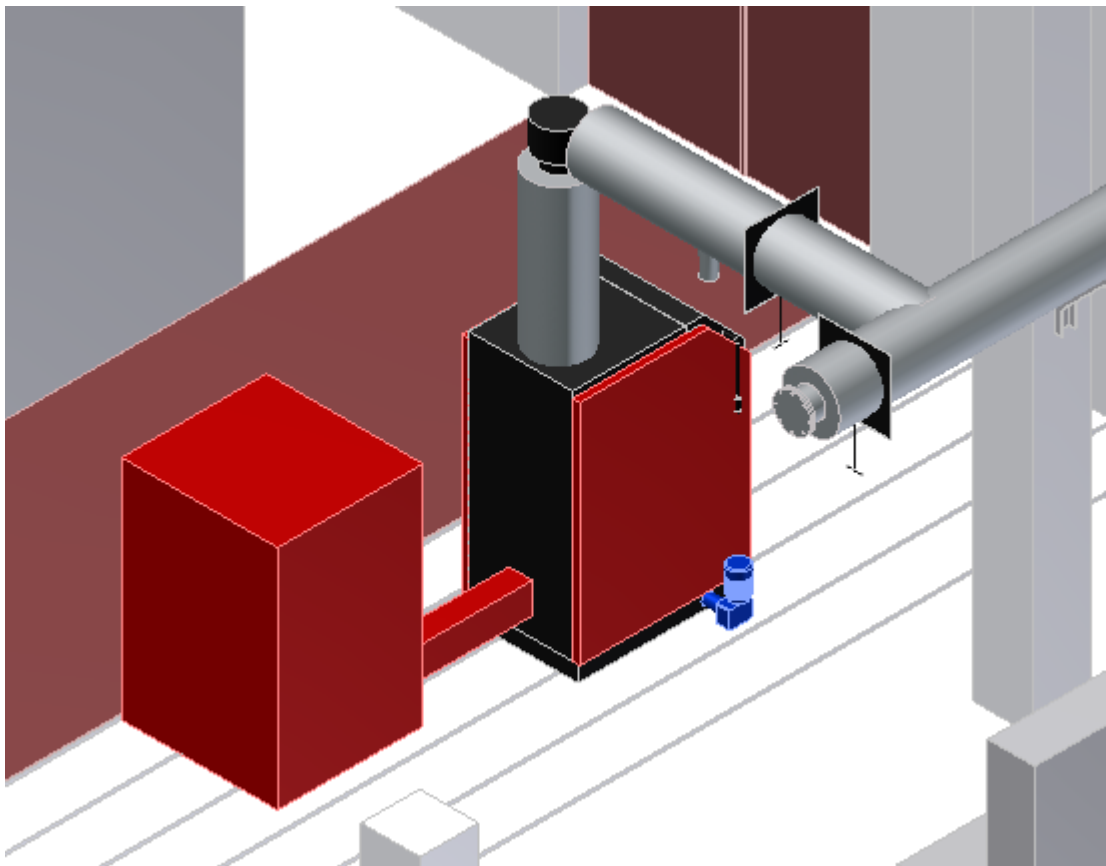


Kuva 40. Torrefiointilaite 3

Kytkenässä ei tarvita lämmönsiirrintä eikä myöskään puhallinta torrefiointikaasujen kierrätykseen. Kaikki torrefiointikaasut voidaan myös siirtää polttokammioon. Ongelmana on kuitenkin lämmönsiirto savukaasuista biomassaan. Reaktorin ympärille pitää saada mahdollisimman suuri lämmönsiirtopinta-ala, jotta savukaasujen energiaa saadaan siirrettyksi reaktorin sisälle.

6.3 Lämpöenergian hyödyntäminen olemassa olevasta biokattilasta

Edellisissä laitekytkennöissä lämpöenergia tuotettiin polttokammiossa. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratoriossa on opetus- ja tutkimuskäytössä 100 kW biopolttoainekattila, jota voitaisiin hyödyntää lämpöenergian tuotantoon torrefiointia varten. Kattilan savukanavasta voidaan ohittaa savukaasuja muihin käyttötarkoituksiin. Kattilassa voitaisiin lisäksi polttaa torrefioinnissa muodostuvat kaasut.



Kuva 41. Biokattila

Jos kattilaa käytettäisiin apuna torrefioinnissa, tarvittaisiin lisäksi vain torrefiointireaktori ja suojakaasun syöttö. Torrefiointireaktorille löytyy sopiva sijoituspaikka laboratorion kattilan vierestä. Savukanavasta saadaan liitettyä linjat reaktorille. Kattilan savukaasukiertoa pitäisi kuitenkin ohittaa kattilan sisällä olevista lämmönsiirtopinnoista, jotta saataisiin tarvittava savukaasun lämpötila reaktorille. Savukaasujen lämpötila kattilan ulostulossa on normaalikäytössä noin 150 °C, joka ei ole riittävä torrefiointiin.

6.4 Perusteluja laitteen toimintaperiaatteen valinnalle

Jokaisessa luvun 6.2 laitevaihtoehdossa on tärkeintä, että lämpötila saadaan nostettua reaktorissa tasaisesti haluttuun lämpötilaan ja että torrefiointilämpötila pysyy tasaisena. Laboratoriokokeiden perusteella jo 10 °C lämpötilanmuutokset aiheuttavat muutoksia biomassan energia- ja massasisältöön sekä muihin ominaisuuksiin.

Näistä kolmesta laitevaihtoehdosta vaihtoehdossa 2 on helppo nostaa lämpötilaa ja pitää lämpötilaa tasaisena reaktorissa, koska lämmönsiirrin voidaan valita sellaiseksi, jossa on suuri lämpökapasiteetti. Tällöin lämmönsiirrin lämpenee hitaasti ja toimii varastomaisena puskurina, jota pidetään polttokammion avulla jatkuvasti oikeassa lämpötilassa. Laittevaihtoehdoissa 1 ja 3 ei ole lämmönsiirrintä, joten reaktorin lämmitys ja lämpötilan pitäminen tasaisena on vaikeampaa. Laite 1:ssä voidaan kuitenkin laittaa polttokammion ja reaktorin välissä olevaan savukaasulinjaan lämpöä varaavaa massaa, jolloin reaktoriin ei pääse heti kuumia savukaasuja polttokammion lämmityksestä. Näin saadaan lämmitettyä ensin varaava massa haluttuun lämpötilaan, jonka jälkeen polttokammion avulla pidetään varaava massa halutussa lämpötilassa. Laite 3:ssa torrefiointireaktorin seinämät voidaan tehdä sellaiseksi, että ne toimivat varaavana massana. Tällöin lämpötila saadaan nostettua hitaasti ja pidettyä lopuksi korkeassa lämpötilassa tasaisena.

Lämmönsiirto biomassaan toimii parhaiten laitteissa 1 ja 2, joissa kaasu on suorassa kosketuksessa biomassaan ja biomassa leijuu sekä sekoittuu mahdollisesti reaktorin sisällä. Molemmissa kaasuihin on myös seassa vesihöyryä, joka lisää lämmönsiirron tehokkuutta. Laite 1:ssä nestekaasun eli propaanin palamisessa syntyy vesihöyryä savukaasuihin ja laite 2:n torrefiointikaasut sisältävät biomassan kosteutta. Laite 3:ssa biomassan lämpeneminen reaktorin keskeltä ei onnistu välttämättä niin hyvin kuin reaktorin seinämiltä, koska esimerkiksi puu eristää hyvin lämmön siirtymistä reaktorin keskeltä.

Parhaimmat ominaisuudet voisivat olla näiden perusteella laitteessa 1, joten koelaitteen suunnittelua voisi aloittaa sen mukaisesti. Savukaasuissa olevat palamattomat kaasut, joita laite 1:ssä jää savukaasujen sekaan, voidaan polttaa savukanavaan lisätyllä jälkipolttimella. Savukaasujen palamattomien komponenttien häviöistä ei ole haittaa, koska koelaitteen hyötysuhteen ei tarvitse olla paras mahdollinen.

7 TORREFIOINTI LÄMPÖLAITOKSESSA

Torrefiointikoelaitteen toiminnan tutkimisen ja saatujen tulosten jälkeen laitekoko on mahdollista suurentaa ja siirtyä kokonaan kaupalliseen toimintaan torrefioidun biomassan tuottamisessa.

Liikeidea jaetaan yleensä kolmeen erillaiseen osaan:

- Mitä tuotteita tuotetaan?
- Kuka on tuotteiden ostaja?
- Millä tavalla tuote valmistetaan?

Tässä luvussa käsitellään lämpöyrittäjän mahdollisuutta toimia torrefioidun biomassan tuottajana ja myyjänä. Lisäksi tarkastellaan tuotannon kannattavuutta.

7.1 Lämpökeskus ja varusteet

Lämpökeskus on lämmitysenergian tuottamiseen tehty erillinen laitos, jonka avulla tuotetaan energiaa asuntojen ja kiinteistöjen erilaisiin lämmönkulutuskohteisiin (Energiateollisuus 2006, 282). Kun lämpöenergiaa tuotetaan keskitetysti tietyn alueen rakennuksiin, kutsutaan lämmitysjärjestelmää tällöin aluelämmitykseksi. Lämpökeskus voi olla myös kytkettynä kaukolämpöverkkoon ja toimia näin esimerkiksi huipputehontarpeen aikana varayksikkönä kaukolämpövoimalaitosten apuna.

Lämpöyrittäjän palvelun tuote on lämpöenergia, josta yrittäjälle maksetaan asiakkaiden kanssa tehtyjen sopimuksen mukaisesti. Aluelämmityksessä lämpöyrittäjällä voi olla esimerkiksi monia yksityisasiakkaita. Jos lämpöyrittäjä tuottaa lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon, ostaa kaukolämpöverkon omistaja lämpöenergiaa yrittäjältä. Yleensä kaukolämpöverkon omistaa kunta, jossa kaukolämpöverkko sijaitsee.

Yrittäjän toiminnan vastuualueeseen kuuluvat yleensä polttoaineen hankinta, kuljetus ja laitoksen huolto. Vaikka laitokset ovat nykyisin lähes täysin automatisoituja, yrittäjä vastaa myös tarvittaessa varsinaisesta lämmitystyöstä. Etenkin pienissä lämpökeskuksissa lämmitys voi tapahtua joskus käsin syötettävillä klapeilla. Lämpöyrittäjät ovat

yleensä tekemisissä maa- ja metsätalouden kanssa, esimerkiksi maanviljelijöitä, jolloin he voivat tehdä sivuelinkeinona lämmitystyötä. Poltettava puupolttoaine on tällöin mahdollista saada yrittäjän omasta metsästä.

Lämpölaitokset käyttävät yleisesti polttoaineenaan esimerkiksi öljyä, maakaasua tai biomassaa. Yksityiset lämpökeskukset toimivat yleensä kiinteillä biopolttoaineilla, jolloin niissä poltetaan muun muassa klapeja, haketta tai pellettejä. Biomassaa polttavassa lämpökeskuksessa pääosina ovat kattila, palopää, polttoaineen syöttö ja polttoainesiilo (Puhakka & al. 2001, 39).

7.2 Toiminta-ajatus

Raaka-aine ja lopputuote

Lämpöyrittäjä käyttää raaka-aineena biomassaa, joka torrefioidaan sekä mahdollisesti pelletöidään kuljetuksia varten. Jos lämpökeskus käyttää polttoaineena haketta, kannattaa haketta käyttää myös torrefioinnin raaka-aineena. Tällöin laitokseen ei tarvitse tuoda erikseen toista polttoainetta torrefiointia varten, vaan torrefiointia voidaan tehdä samalle polttoaineelle, jota tuotaisiin muutenkin lämpökeskukseen.

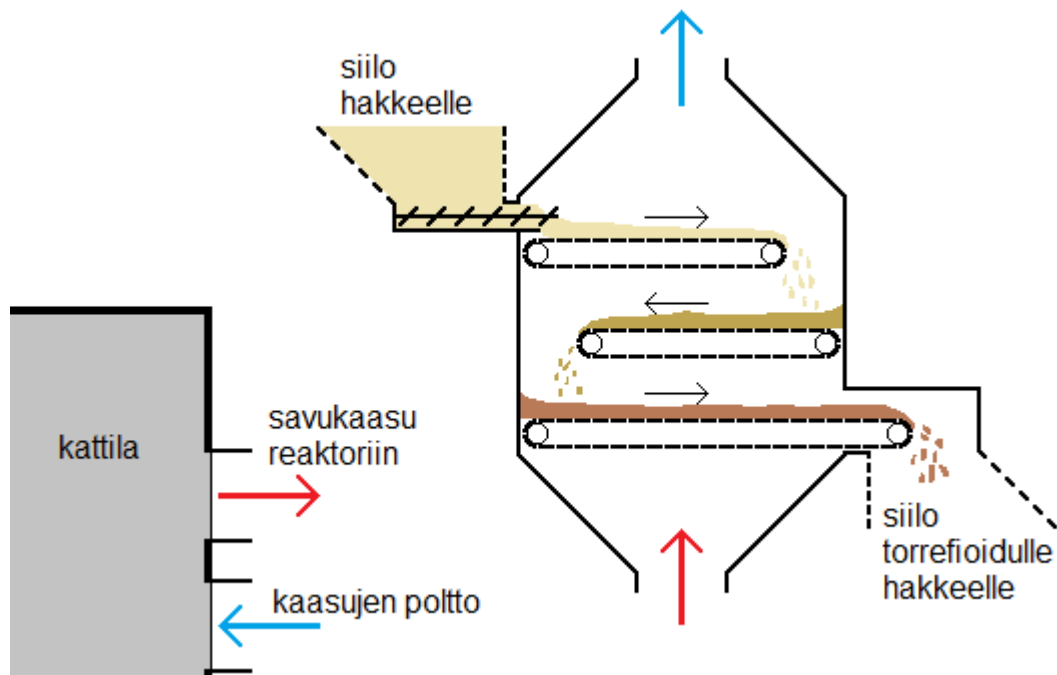
Lisäksi luvun 5 kokeiden mukaan hakkeen torrefiointi on kannattavampaa verrattuna muihin biomassoihin, koska kokopuuhakkeessa on pieni tuhkapitoisuus muihin biomassoihin verrattuna. Näin eri biomassoista etenkin hakkeen ominaisuuksia saadaan parannettua eniten torrefioinnissa.

Markkinat

Torrefioitua haketta ja pellettejä voidaan polttaa kaikissa laitteissa, joissa on mahdollista polttaa tavallista haketta ja pellettiä. Pienissä lämmityskattiloissa torrefioidun biomassan poltto ei välttämättä kannata, koska saatava hyöty on todennäköisesti pieni verrattuna torrefioidun biomassan hintaan. Suuret kivihiiivoimalaitokset voivat kuitenkin hyötyä merkittävästi kivihiiilen korvaamisesta biomassalla.

Prosessilaitteisto

Lämpökeskukseen tarvitaan torrefiointiprosessia varten torrefiointireaktori, siiloja, kuljettimia, lämmönsiirtimiä sekä putkistoja savukaasuille ja torrefiointikaasulle. Prosessiin tarvittavaa lämpöä saadaan lämpökeskuksen kattilasta. Kuvassa 42 on esitetty periaate jatkuvatoimisesta torrefiointireaktorista.



Kuva 42. Torrefiointireaktori lämpölaitoksessa

Torrefiointia varten hakkeelle on lisätty oma siilo, josta haketta siirretään syöttöruuvilla reaktoriin. Haketta siirretään kuljettimilla reaktorin sisällä, josta valmis torrefioitu hake tippuu lopulta toiseen siilon. Kattilan savukaasuja ohitetaan lämmönsiirtopinnoista, jolloin saadaan savukaasulle tarvittava lämpötila. Kuumat savukaasut johdetaan reaktoriin ja muodostuneet torrefiointikaasut reaktorista takaisin kattilaan poltettavaksi.

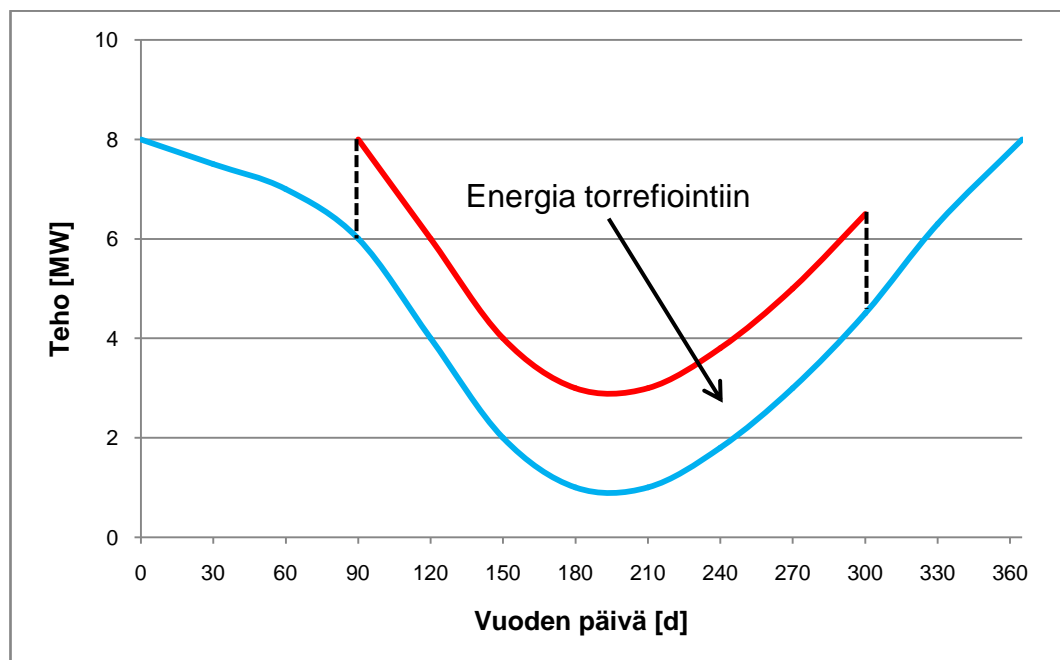
Tällainen jatkuvatoiminen laite on kokonaisuudessaan toiminnaltaan panosperiaatteella toimivan laitteen kaltainen. Hakesiilo on tässä tapauksessa suuri ”panos”, jonka sisältämää haketta torrefioidaan pienissä erissä. Molemmat siilot on eristetty ulkoilmasta ja siiloihin voidaan syöttää lisäksi tarvittaessa suojakaasua. Torrefiointiprosessi saadaan tilanteen mukaan käynnistettyä ja lopetettua helposti kattilan savukaasujen ohjauksen ja torrefiointireaktorin syöttöjärjestelmän avulla.

Torrefioidun hakkeen tuotanto

Normaalisti lämpökeskuksen teho vaihtelee vuositasolla. Talvella lämmöntarve on suuri, jolloin myös lämpökeskuksen on tuotettava paljon energiaa asiakkaille. Kesällä lämmitystehoa tarvitaan käytännössä vain lämpimän käyttöveden tuotantoon.

Torrefioitua haketta voisi tällöin tehdä esimerkiksi jatkuvasti kesällä pienen lämmitystarpeen aikana tai yksittäisinä ajanhetkinä muulloinkin. Prosessin käynnistäminen ja alasajo eivät veisi paljoa aikaa ja torrefiointivalmius voitaisiin pitää jatkuvasti. Näin saataisiin lämpökeskuksen huipunkäyttöaikaa kasvatettua. Torrefiointiin tarvittava lämpöteho riippuu reaktorin koosta ja hakkeen käsittelykapasiteetista.

Alla olevassa kuvassa on esimerkki miten torrefiointia voitaisiin tehdä lämmöntuotannon ohella. Lämpökeskuksen huipputeho on 8 MW. ”Torrefiointikausi” voidaan aloittaa, kun lämpökeskuksen kattilassa on varatehoa 2 MW eli lämmitysteho on alle 6 MW. Torrefiointia tehdään tässä tapauksessa 2 MW teholla huhtikuun alusta lokakuun loppuun.



Kuva 43. Torrefiointi lämmöntuotannon ohella

Huipunkäyttöajalla tarkoitetaan tuntimäärää, jolla vuotuinen energia olisi tuotettu huipputeholla.

$$hka = \frac{E_a}{P} \quad (5)$$

jossa	hka	huipunkäyttöaika [h/a]
	E_a	vuotuinen energia [MWh/a]
	P	huipputeho [MW]

Tällöin lämpökeskuksen keskimääräinen lämpöteho olisi noin 4,4 MW ja huipunkäyttöaika noin 4800 h/a.

$$hka = \frac{4,4 \text{ MW} \cdot 8760 \text{ h/a}}{8 \text{ MW}} = 4800 \text{ h/a}$$

Torrefiointi lisäisi huipunkäyttöaika noin 1300 h/a.

$$hka = \frac{2 \text{ MW} \cdot 210 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d}}{8 \text{ MW}} = 1300 \text{ h/a}$$

Pelletointi

Torrefioidun hakkeen pelletöinnissä voidaan käyttää tavallisia pelletointijärjestelmiä. Pelletointiä on harkittava tapauskohtaisesti kuljetusmatkan mukaan. Lyhyen matkan päähän kuljetettavaa torrefioitua haketta ei välttämättä kannata pelletöidä, mutta pitkissä kuljetuksissa pelletointi on kannattavaa.

Kuljetus

Polttoaineiden kuljetuksissa käytettävien täysperävaunullisten hakeautojen sallittu kokonaismassa on 60000 kg ja kuljetuskapasiteetti yhteensä noin 120 m³. Normaalin hak-

keen irtotiheys vaihtelee kosteuspitoisuuden mukaan ja näin alle 500 kg/m^3 irtotiheydessä kuljetuskapasiteetti ratkaisee kuorman koon. Vastaavasti kokonaisuudessa rajoittaa kuorman kokoa, jos irtotiheys on yli 500 kg/m^3 .

Torrefioidun hakkeen tiheys on matala ja hake on pelletöitävä, jotta tiheyttä saadaan kasvatettua kuljetusta varten ja kuljetuskustannukset pysyvät kohtuullisina pitkissä kuljetuksissa. Kuljetuksessa ei kuitenkaan ratkaise välttämättä kuorman massa eikä tilavuus vaan kuorman energiasisältö, koska kuljetuskustannukset määritetään kuljetettavaa energiamäärää kohti.

Torrefioidun pelletin kuljetuksissa kannattaa tässä tapauksessa yrittää saada kuormaan mahdollisimman paljon energiaa. Laboratoriokokeiden perusteella hakkeen lämpöarvo kasvaa torrefiointilämpötilan kasvaessa. Kuitenkin kiintotiheys pienenee loppuvaiheessa lämpötilan kasvaessa. Näin voidaan tapauskohtaisesti tehdä sopivanlaista torrefioitua pellettiä, joka soveltuu erilaisten kuljetusten energiamäärän maksimointiin.

7.3 Kustannukset ja kannattavuus

Liiketoiminnan kustannukset jaetaan käytännössä kaikissa tuotantolaitoksissa kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin (Huhtinen 2008, 317). Hakkeen torrefioinnissa kustannuksia aiheutuu muun muassa laitteistojen investoinneista, laitteiden huollosta ja käytöstä sekä ylimääräisen hakkeen hankinnasta. Seuraavassa on laskettu esimerkki torrefioidun hakkeen hinnan muodostumisesta. Kaikki lukuarvot ovat oletuksia, eivätkä näin perustu välttämättä todellisuuteen. Lukuarvot on pyritty kuitenkin valitsemaan tyypillisten arvojen mukaisiksi.

Vuosittainen torrefioidun hakkeen tuotanto

Pieni lämpökeskus (polttoaineteho 10 MW , hka 3000 h/a) käyttää vuodessa energiaa 30000 MWh . Torrefiointia varten haketta voitaisiin hankkia lisää 50% vuotuisesta energiasta eli 15000 MWh . Tästä energiamäärästä osa tarvitaan lämmitysenergiaksi torrefiointiin ja osa menetetään häviöinä. Oletetaan, että 70% hakkeen alkuperäisestä energiasta saadaan ”siirrettyä” torrefioituun hakkeeseen. Torrefioitu hake sisältää tällöin energiaa 10500 MWh .

$$E_a = 0,70 \cdot 15000 \text{ MWh} = 10500 \text{ MWh}$$

Jos torrefioidun hakkeen tehollinen lämpöarvo on 20 MJ/kg, tuotettaisiin vuodessa torrefioitua haketta noin 1900 tonnia.

$$m = \frac{10500 \text{ MWh} \cdot 3600 \text{ s/h}}{20 \text{ MJ/kg} \cdot 1000 \text{ kg/t}} = 1890 \text{ t}$$

Kiinteät kustannukset

Jatkuvatoimiseen torrefiointilaitteistoon tarvittavien laitteistojen investointikustannuksia voidaan arvioida vastaavanlaisten laitosten investointikustannuksista. Investointikustannuksien on todettu muodostuvan likimäärin seuraavasti (Vakkilainen 2011a).

$$c = a \cdot k^{0,7} \quad (6)$$

jossa	c	investointikustannus
	a	vakiokerroin
	k	laitoksen kapasiteetti

Kapasiteetiltaan 100000 t/a torrefioitua haketta tuottavan laitoksen investointikustannus on arvioitu olevan 17,3 M€ (Vakkilainen 2011b, 18). Jos pienen lämpölaitoksen tuotanto on 1890 t/a, muodostuu investointikustannukseksi yhtälön 6 mukaisesti noin 1,1 M€.

$$\frac{c_{iso}}{k_{iso}^{0,7}} = \frac{c_{pieni}}{k_{pieni}^{0,7}}$$

$$\rightarrow c_{pieni} = \frac{c_{iso}}{k_{iso}^{0,7}} \cdot k_{pieni}^{0,7} = \frac{17300000 \text{ €}}{100000^{0,7}} \cdot 1890^{0,7} = 1075398 \text{ €}$$

Investointikustannukset jaetaan annuiteettimenetelmällä esimerkiksi kymmenelle vuodelle laskentakorolla 5 %. Annuiteettimenetelmässä lasketaan tarkasteluajan ja laskentakoron perusteella annuiteettitekijä.

$$c_{n/i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

jossa	$c_{n/i}$	annuiteettitekijä
	i	laskentakorko
	n	tarkastelu aika

Annuiteettitekijäksi saadaan 0,13.

$$c_{n/i} = \frac{0,05(1+0,05)^{10}}{(1+0,05)^{10} - 1} = 0,13$$

Nyt voidaan määrittää kiinteän kustannuksen osuus torrefioidun hakkeen hinnasta.

$$c_k = \frac{c_{n/i} \cdot c_{pieni}}{E_a} = \frac{0,13 \cdot 1075398 \text{ €}}{10500 \text{ MWh}} = 13,26 \text{ €/MWh}$$

Muuttuvia kustannuksia

Hakkeen alkuperäisestä energiasta saadaan käyttöön 70 % torrefioituna hakkeena. Jos hakkeen hinnaksi oletetaan 15 €/MWh, on torrefioidun hakkeen hinta raaka-aineen perusteella 21,43 €/MWh.

$$c_r = \frac{15 \text{ €/MWh}}{0,70} = 21,43 \text{ €/MWh}$$

Torrefiointilaitteistoa varten tarvitaan käyttö- ja huoltohenkilöstöä, joiden tarve riippuu vuosittaisesta tuotantomäärästä. Oletetaan, että vuosittaisella tuotannolla (1890 tonnia) tarvittaisiin käyttöön ja huoltoon yksi henkilötyövuosi, jonka kustannus on 60000 €. Muuttuvien kustannusten osuus olisi tällöin 5,71 €/MWh.

$$c_m = \frac{60000 \text{ €}}{10500 \text{ MWh}} = 5,71 \text{ €/MWh}$$

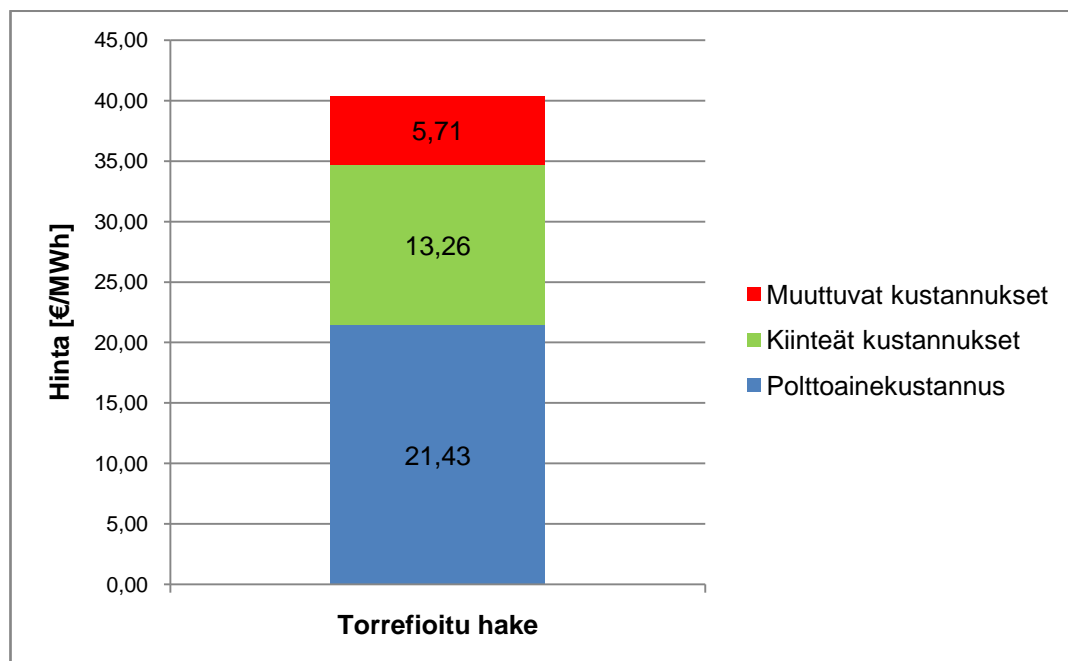
Torrefioidun hakkeen hinta

Edellisten kustannuksien perusteella torrefioidun hakkeen kokonaishinnaksi energiayksikköä kohti muodostuu noin 40 €/MWh.

$$c_{kok} = c_k + c_r + c_m = (13,26 + 21,43 + 5,71)€/MWh = 40,41 €/MWh$$

7.4 Loppuhinnan muodostumisen herkkyyshanalyysi

Luvussa 7.3 laskettu torrefioidun hakkeen loppuhinta muodostuu kuvan 44 mukaisesti. Kuvasta nähdään, että polttoaineen hinta on tässä tapauksessa merkittävin loppuhintaan vaikuttava tekijä, jolloin kokonaiskustannukset painottuvat raaka-aineesta johtuviin kustannuksiin. Muuttuvat kustannukset muodostavat pienimmän osan loppuhinnasta.



Kuva 44. Torrefioidun hakkeen hinnan muodostuminen

Loppuhinnan laskennassa käytettyjä oletettuja muuttujat olivat muun muassa seuraavat.

- raaka-aineen hinta (15 €/MWh)
- vuotuinen hankittava lisäenergia (50 %)
- tuotantohyötysuhde (70 %)
- käyttö- ja huoltokustannukset (60000 €)

Tehdään näiden perusteella herkkyysanalyysi, jossa muutetaan yhtä arvoa kerrallaan tietyissä rajoissa muiden arvojen pysyessä ennallaan ja katsotaan millainen vaikutus arvon muuttumisella on. Taululukossa 7 on esitetty herkkyysanalyysin tulokset loppuhinnoille, jotka on laskettu samalla periaatteella kuin luvussa 7.3.

Taulukko 7. Herkkyysanalyysin tulokset (lihavoidut arvot pysyvät vakioina muissa taulukoissa)

raaka-aine [€/MWh]	loppuhinta [€/MWh]	lisäenergia [%]	loppuhinta [€/MWh]	tuot. hyöt. [%]	loppuhinta [€/MWh]	kä & hu [€]	loppuhinta [€/MWh]
10	33,26	30	46,41	50	52,67	20000	36,60
12,5	36,84	40	42,75	60	45,56	40000	38,50
15	40,41	50	40,41	70	40,41	60000	40,41
17,5	43,98	60	38,75	80	36,49	80000	42,31
20	47,55	70	37,50	90	33,41	100000	44,22

Raaka-aineen hinta yhdessä tuotantohyötysuhteen kanssa muodostavat polttoainekustannuksen. Herkkyysanalyysin mukaan näiden molempien muutos vaikuttaa hyvin paljon torrefioidun hakkeen loppuhintaan. Raaka-aineen hintaan ei voida käytännössä itse vaikuttaa, mutta tuotantohyötysuhteeseen voidaan. Tuotantohyötysuhdetta voidaan parantaa esimerkiksi investoimalla energiatehokkaampiin laitteisiin.

Lisäenergia, joka hankitaan vuosittain torrefiointia varten, vaikuttaa laitoksen käsittelykapasiteettiin. Käsittelykapasiteetti taas vaikuttaa investointikustannuksiin. Herkkyysanalyysin mukaan tuotannon lisääminen pienentää loppuhintaa, mutta tässä on kuitenkin oletettu käyttö ja huoltokustannusten pysyvän vakiona. Todellisuudessa tuotantokapasiteetin lisääminen lisäisi käyttö- ja huoltokustannuksia ja näin loppuhinnassa ei näkyisi välttämättä suurta muutosta.

Käyttö- ja huoltotoimenpiteisiin on palkattava mahdollisesti työntekijä, jonka aiheuttamat kulut kuuluvat muuttuviin kustannuksiin. Muuttuvien kustannuksien pienentämiseen ei kuitenkaan kannata välttämättä panostaa, koska ne eivät vaikuta ratkaisevasti tuotteen loppuhintaan eikä niiden osuus ole suuri lopputuotteen hinnasta.

Edellisten asioiden perusteella tulisi arvioida, mitkä asiat ovat kannattavimpia tavoitella. Esimerkiksi mahdollisimman suuri tuotantohyötysuhde ei ole kannattava ratkaisu, jos laitteistojen investointikulut nostavat loppuhintaa kohtuuttoman suureksi.

7.5 Liikeidean analysointia

Yritystoimintaa voidaan tarkastella SWOT-analyysi avulla, jossa tarkastellaan liikeideasta ja -toiminnasta seuraavia asioita.

- Vahvuudet (Strengths)
- Heikkoudet (Weaknesses)
- Mahdollisuudet (Opportunities)
- Uhat (Threats)

Alla olevaan taulukkoon on kerätty asioita, joita lämpöyrittäjän toiminnassa esiintyy.

Taulukko 8. Torrefiointiliiketoiminnan SWOT-analyysi

<p>VAHVUUDET</p> <ul style="list-style-type: none"> - yksinkertainen prosessi - tuotannossa ei synny jätettä - helppoa sivutoimintaa lämpöyrittäjälle 	<p>HEIKKOUEDET</p> <ul style="list-style-type: none"> - lopputuotetta ei ole päästy vielä kokeilemaan kunnolla - laitteistoja ei ole vielä kunnolla saatavilla - kuljetusmatkat
<p>MAHDOLLISUUDET</p> <ul style="list-style-type: none"> - läpimurto kivihiilen korvaajana - tuotantotuet apuna - päästöoikeuksien hintojen noustessa kiinnostus biomassaan kasvaa 	<p>UHAT</p> <ul style="list-style-type: none"> - biomassalle löydetään parempia jalostusmenetelmiä - asiakkaat eivät kiinnostu tuotteesta - loppuhinta on asiakkaille liian suuri

8 TULOKSET JA KEHITYSIDEAT

Laboratoriokokeissa saadut tulokset torrefioinnista ovat yleisesti järkeviä, kun tuloksia verrataan kirjallisuudessa esitettyihin torrefioinnin teorioihin. Laboratoriojärjestelyssä biomassan torrefiointi ei ollut samanlaista kuin jos lämpökäsittely tehtäisiin ”oikeaoppisesti” täysin hapettomassa tilassa suojakaasun avulla. Tämän takia kaikissa tuloksissa voi toistua samoja virheitä, jos tuloksia verrattaisiin toisella menetelmällä tehtyihin vastaavanlaisiin kokeisiin. Laboratoriokokeissa tehdyt koejärjestelyt ovat kuitenkin eräänlaisia perusmenetelmiä, joilla tutkimusta on helppo aloittaa yksinkertaisilla välineillä.

Torrefiointikoelaitteen kolmesta eri toimintavaihtoehdoista selvitettiin laitteiden hyviä ja huonoja puolia ja näiden perusteella voitiin valita sopiva laite, jota aletaan kehittää tutkimushankkeessa. Torrefiointilaitteen suunnittelussa tulisi jatkossa huomioida, miten lämmönsiirto biomassaan saadaan toteutettua siten, että koko biomassaa lämpenee tasaisesti. Laboratoriokokeissa näytekokoo oli niin pieni, että näyte lämpeni nopeasti tasalämpöiseksi, eikä tätä ongelmaa syntynyt.

Lämpöyrittäjälle torrefiointi voisi olla hyvää sivutoimintaa, koska laiteinvestoinnit eivät olisi kovin suuria. Lämpöyrittäjä saisi kesäksi laitokseen lisää käyttöaikaa torrefioinnin avulla. Jatkuvatoimisella torrefiointilaitteella tuotanto olisi helppo aloittaa nopeasti ja tuotantovalmius olisi koko ajan. Kannattavuuslaskelmien mukaan torrefioidun hakkeen hinta muodostuu kuitenkin suhteellisen korkeaksi lähes kaikissa tilanteissa ja tämän takia tuotteelle ei ole välttämättä ostajia lopullisen hinnan perusteella.

Kaikki suunnitelmat ja laskelmat ovat kuitenkin tässä vasta ”paperilla”. Käytännön koikeita suuressa lämpöyrittäjien mittakaavassa ei ole toistaiseksi vielä tehty. Tästä nousee esiin kysymyksiä esimerkiksi siitä, että ovatko lämpöyrittäjät halukkaita investoimaan laitteisiin, joista ei ole välttämättä mitään hyötyä heille tai uskaltaako kukaan edes aloittaa uudenlaista liiketoimintaa, josta on toistaiseksi hyvin vähän tietoa?

9 YHTEENVETO

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston BIOTULI-tutkimushankkeessa. Työn tavoitteena oli selvittää biomassan lämpökäsittelymenetelmän, torrefioinnin, mahdollisuutta lämpölaitoksissa. Työssä tehtyjen laboratoriokokeiden tavoitteeksi oli asetettu optimaalisen biomassan laadun etsimistä erilaisilla lämpökäsittelymenetelmillä. Tällainen menetelmä löytyi, jossa biomassan energiatiheys saatiin mahdollisimman korkeaksi.

Tutkimushankkeessa suunniteltavaan koelaitteeseen mietittiin erilaisia toimintavaihtoehtoja, joista valittiin sopiva. Lämpölaitoskonseptissa oli tavoitteena tutkia laitteita, joita tarvitaan biomassan torrefiointiin ja onko torrefioidun biomassan tuotanto kannattavaa. Laiteinvestointeja ei tarvittaisi kovin paljoa olemassa olevien lisäksi, mutta tuotantokustannukset muodostavat kuitenkin torrefioidulle biomassalle loppuhinnan, joka voi olla asiakkaille liian korkea.

Työ kuului tutkimushankkeen alkuvaiheen perusasioiden tutkimiseen ja se saatiin valmiiksi sovitussa aikataulussa. Työssä saatuja tuloksia voidaan jatkossa hyödyntää tutkimushankkeessa.

LÄHTEET

Agar, D. & Wihersaari, M. Torrefiointiprosessi biomassa jalostamiseen ”biohiili”. Jyväskylän yliopisto. Kestävä bioenergia. Saatavilla:

http://users.jyu.fi/~daagar/agar_torrefiointi_fi.pdf [viitattu 6.2.2011]

Alakangas, E. 2000. VTT tiedotteita. Espoo: Otamedia Oy. ISBN 951-38-5740-9.

[verkkodokumentti] Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf> [viitattu 4.2.2011]

Ariterm Oy. 2009. Biolämpöopas. [verkkodokumentti] Saatavilla:

195.198.92.151/ariterm/Biolampo%20opas.pdf [viitattu 7.2.2011]

Bergman, P. 2005. a. Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process. ECN Report. ECN-C--05-073.

Bergman, P & al. 2005. b. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. ECN Report. ECN-C--05-013.

Bergman, P. & Kiel, J. 2005. c. Torrefaction for biomass upgrading. ECN Report. ECN-RX--05-180.

Bioenergia Suomessa. Puupolttoaineet. [verkkodokumentti] Saatavilla:

<http://www.finbioenergy.fi/default.asp?SivuID=26470> [viitattu 26.10.2010]

Bioteknologia.info. 2011. Biomassan jalostaminen. [verkkodokumentti] Saatavilla:

http://www.bioteknologia.info/etusivu/ymparisto/Biomassa/fi_FI/Biomassan_jalostaminen/ [viitattu 12.1.2010]

CO2 Prices.eu. 2011. Analysis of the EU CO2 Market. [verkkodokumentti] Saatavilla:

<http://www.co2prices.eu/> [viitattu 27.3.2011]

Edward, S & al. 2002. Enhanced wood fuels via torrefaction. [verkkodokumentti] Saatavilla: <http://www.thermogenind.com/whitepapers/Enhanced%20Wood.pdf> [viitattu 29.3.2011]

Energiateollisuus. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Kirjapaino Libris Oy. ISBN 952-5615-08-1.

Energiateollisuus. 2011. Päästökauppa. [verkkodokumentti] Saatavilla: <http://www.energia.fi/fi/ymparisto/paastokauppa> [viitattu 2.2.2011]

ETPC. 2011. Biomass refinement by torrefaction. [verkkodokumentti] Saatavilla: <http://www.techtp.com/Biomass%20Refinement%20by%20Torrefaction.pdf> [viitattu 2.2.2011]

Fortum Oyj. 2002. Raskaan polttoöljyn käyttöopas. ISBN 951-591-075-7.

Fredriksson, T. 2010. Torrefioidulla puulla ja pelleteillä kivihiilen käyttö alas. Koneviesti 17/2010, Bioenergia, 8-9.

GoforWood.info. 2004. Metso to increase activity in the development of torrefaction. [verkkodokumentti] Saatavilla: <http://www.goforwood.info/en/news.php?id=32796> [viitattu 24.1.2011]

Hellgrén, M. & al. 1996. Energia ja ympäristö. 2. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. ISBN 951-719-674-1.

Hiittu, M. & Hiittu, M. 1996. Häkäpöntöstä dieseliin. Hyötyajoneuvot Suomessa sodanjälkeisillä teillä 1944-1960. Tallinna: Tallinna Raamatutrükikoda. ISBN 952-472-029-9.

Huhtinen, M. & al. 1994. Höyrykattilatekniikka. 6. painos. Helsinki: Edita. ISBN 951-37-3360-2.

Huhtinen, M. & al. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otava. ISBN 978-952-13-3476-4.

Ilmatieteen laitos. 2010. Miksi ilmasto muuttuu? [verkkodokumentti] Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/miksi-ilmasto-muuttuu> [viitattu 2.2.2011]

Kara, M. 2004. Energia Suomessa. 3. painos. Helsinki: Edita. ISBN 951-37-4256-3.

Knaapi, J. 2011. Biohiilessä on potentiaalia. Koneviesti 3/2011, 112-113.

KyAMK. 2010. KyAMK:n päästömittauslaboratorio akkreditoitu - pätevyysalue laajenee [verkkodokumentti] Saatavilla:

http://www.kyamk.fi/Ajankohtaista/Mediatiedotteet/?news_id=427 [viitattu 15.1.2011]

Larjava, K. 2009. Energy visions 2050. Porvoo: WS Bookwell Oy. ISBN 978-951-37-5595-9.

Lehtonen, K. & Hotti, E. 2001. Puuntisleiden koostumus ja hyödyntämismahdollisuudet. Mikkeli.

Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WS Bookwell Oy. ISBN 951-0-24909-2.

Prins, M. 2005. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. [verkkodokumentti] Saatavilla: <http://alexandria.tue.nl/extra2/200510705.pdf> [viitattu 19.3.2011]

Puhakka, A. & al. 2001. Hakelämmitysopas. Helsinki: Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. ISBN 952-5304-12-4.

Puhakka, A. & al. 2003. Pellettilämmitysopas. Helsinki: Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. ISBN 951-604-030-6.

Raiko, R. & al. 2002. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Gummerus. ISBN 951-666-604-3.

Raussi-yhtiöt. 2011. Hiilituotanto. [verkkodokumentti] Saatavilla:

<http://www.raussinmetalli.com/framet1.htm> [viitattu 25.1.2011]

Riikilä, M. 2010. Biohiili unohtui. Metsälehti 23/2010, 8.

Stora Enso. 2011. Refined wood for defined needs. [verkkodokumentti] Saatavilla:
<http://www.storaenso.com/products/wood-products/products/thermowood/Pages/thermowood.aspx> [viitattu 7.2.2011]

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2004. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. CEN/TS 14774-2.

Topell Energy. 2011. Technology. [verkkodokumentti] Saatavilla:
<http://www.topellenergy.com/> [viitattu 30.3.2011]

Ukrainian biofuel portal. 2010. The added value of torrefaction. [verkkodokumentti] Saatavilla: <http://pellets-wood.com/the-added-value-of-torrefaction-097.html> [viitattu 24.1.2011]

UPM. 2010. Biodiesel. [verkkodokumentti] Saatavilla:
http://www.upm.com/fi/energia_ja_sellu/biopolttoaineet/biodiesel/ [viitattu 7.2.2010]

Vakkilainen, E. 2011. a. Professori. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. LUT Energia. Suullinen tiedonanto 12.4.2011.

Vakkilainen, E. & Kaikko, J. 2011. b. Biohiilen kannattavuus. Biohiiliseminaari. 14.2.2011. Helsinki.

VAPO. 2004. Ruokohelvestä nopeasti uusiutuvaa energiaa. [verkkodokumentti] Saatavilla:
http://www.vapo.fi/fin/kunta_ja_yritysasiakkaat/biopolttoaineet/peltoenergia/ruokohelppi/?id=176 [viitattu 7.11.2010]

LÄMPÖTILAN SEURANTA

Käytetyt laitteet: lämpökäsittelyuuni

Ympäristön lämpötila: 21 °C

Ympäristön paine: 1,022 bar

Käsittely: 200 °C, 30 min, 10 °C/min

aika [min]	lämpötila [°C]	aika [min]	lämpötila [°C]	HUOM.
0	20	25	207	
2	32	26	207	
4	46	27	207	
6	62	28	206	
8	80	29	205	
10	100	30	204	
12	120	31	203	
14	140	32	202	
16	160	33	201	
18	179	34	200	
20	196	35	200	
21	203	40	200	
22	205	45	200	
23	206	50	200	
24	207			

Mittaukset suoritettu: 11.2.2011

Mittauksien suorittaja: Hannu Savolainen

MASSAHÄVIÖ

Biomassa: *hake*

Käytetyt laitteet: *lämpökäsitteilyuuni, vaaka*

Ympäristön lämpötila: *21 °C*

Ympäristön paine: *1,022 bar*

Käsittely: *30 min, 10 °C/min*

astia	torr. lämpötila [°C]	astian m [g]	m alussa [g]	m torr. [g]	HUOM.
001	200	6,93	80,20	75,11	
002	210	6,97	89,53	84,08	
003	220	6,95	88,61	79,47	
004	230	6,94	93,27	83,62	
005	240	6,96	83,60	68,29	
012	250	6,97	92,65	63,79	
014	260	7,01	76,84	50,17	
019	270	7,03	90,69	52,83	
020	280	7,04	80,33	38,30	
022	290	7,04	82,17	37,14	
023	300	7,03	78,44	32,80	
024	<i>käsittelemätön</i>	7,02	77,69	—	

Mittaukset suoritettu: *11.2.2011*

Mittauksien suorittaja: *Hannu Sahrelainen*

KALORIMETRISET LÄMPÖARVOT

Biomassa: *kaape*

Käytetyt laitteet: *jauhin, raaka, pellettipöytä,
kalorimetri*

Ympäristön lämpötila: *22 °C*

Ympäristön paine: *1,024 bar*

Käsitteily: *30 min, 10°C/min*

astia	torr. lämpötila [°C]	pelletti 1			pelletti 2			pelletti 3			HUOM.
		tunnus	massa [g]	lämpöarvo [MJ/kg]	tunnus	massa [g]	lämpöarvo [MJ/kg]	tunnus	massa [g]	lämpöarvo [MJ/kg]	
001	200	1D	0,6120	20,13	1E	0,6709	20,16	1F	0,6164	20,19	
002	210	2D	0,5550	20,39	2E	0,7423	20,56	2F	0,5249	20,58	
003	220	3D	0,6832	20,80	3E	0,6216	20,75	3F	0,7059	20,81	
004	230	4A	0,7230	21,07	4B	0,6006	21,01	4C	0,5422	20,88	
005	240	5A	0,5159	21,66	5B	0,6133	21,65	5C	0,6558	21,68	
012	250	6A	0,6587	23,53	6B	0,6488	23,37	6C	0,6425	23,55	
014	260	1A	0,7091	24,26	1B	0,6712	24,13	1C	0,7417	24,33	
019	270	2A	0,7876	25,57	2B	0,8261	25,62	2C	0,8051	25,55	
020	280	3A	0,8150	27,27	3B	0,7024	27,37	3C	0,7800	26,87	
022	290	4A	0,8183	28,01	4B	0,5882	28,00	4C	0,7695	28,29	
023	300	5A	0,8253	28,22	5B	0,6634	28,05	5C	0,7557	27,42	
024	Käsitteily	6A	0,8771	19,75	6B	0,6826	19,82	6C	0,9765	19,83	

Mittaukset suoritettu: *6.2.2011 - 18.2.2011*

Mittauksien suorittaja: *Hannu Savolainen*

KIINTOTIHEYS PELLETOITYNÄ

Biomassa: *hake*

Käytetyt laitteet: *jauhin, vaaka, pellettiprässi, työntömitla*

Ympäristön lämpötila: *22°C*

Ympäristön paine: *1,024 bar*

Käsittely: *30 min, 10°C/min*

pelletti	torr. lämpötila [°C]	korkeus [mm]	halkaisija [mm]	massa [g]	HUOM.
001	200	5,2	16,0	0,9667	
002	210	5,4	16,0	1,0007	
003	220	5,7	16,0	1,0677	
004	230	5,3	16,0	0,9933	
005	240	5,2	16,0	0,9466	
012	250	5,9	16,0	1,0490	
014	260	5,5	16,0	0,9210	
019	270	7,2	16,0	1,1182	
020	280	7,4	16,0	0,7800	
022	290	9,2	16,0	0,7695	
023	300	8,4	16,0	0,6536	*
024	<i>käsittämätön</i>	7,0	16,0	1,2037	

* pelletti ei pysynyt kokonaan

Mittaukset suoritettu: *18.2.2011*

Mittauksien suorittaja: *Hannu Savolainen*

KOSTEUSKERTYMÄ

Biomassa: *hake*

Käytetyt laitteet: *vaaka, kosteusmittari*

Ympäristön lämpötila: *21°C*

Ympäristön paine: *1,023 bar*

Käsittely: *250°C, 30 min, 10°C/min*

Astioiden massat: *norm. 7,03g* *toikk. 6,94g*

aika	massa, norm. hake [g]	massa, torr. hake [g]	HUOM.
4.3.2011	78,69	59,87	
7.3.2011	84,75	62,48	
9.3.2011	86,85	63,17	
11.3.2011	88,40	63,70	
14.3.2011	89,67	64,09	
16.3.2011	90,45	64,22	
18.3.2011	90,94	64,42	
21.3.2011	91,71	64,47	
23.3.2011	91,81	64,53	
25.3.2011	91,95	64,53	

Mittaukset suoritettu: *4.3.2011 - 25.3.2011*

Mittauksien suorittaja: *Hannu Satvelainen*

ERILAISET LÄMMITYSAJAT

Biomassa: *hake*Käytetyt laitteet: *lämpökäsittelykumi, vaakala*Ympäristön lämpötila: *21°C*Ympäristön paine: *1,023 bar*Käsittely: *250°C, 10°C/min*

astia	torr. aika [min]	astian m [g]	m alussa [g]	m torr. [g]	HUOM.
012	0	7,00	89,00	88,19	
005	15	7,06	72,50	57,86	
004	30	6,98	86,77	64,85	
003	45	6,98	81,28	57,93	
002	60	6,98	83,25	47,29	

Mittaukset suoritettu: *7.3.2011*Mittauksien suorittaja: *Hannu Schwelainen*

ERILAISET BIOMASSAT

Biomassa: *kuopokelpi, puuhi, puhu, turve*
 Käytetyt laitteet: *lämpökäsittelyuuni, steaba, jauhuri,
 pellettiherkki, työntömitta, palotermiä*

Ympäristön lämpötila: *21°C*

Ympäristön paine: *1,0276 bar*

Käsitelly: *250°C, 30min, 10°C/min*

astia	biomassa	massat [g]		käsittelemätön pelletti			torrefioitu pelletti		
		astia	käsittelemätön	korkeus [mm]	halkaisija [mm]	massa [g]	korkeus [mm]	halkaisija [mm]	massa [g]
014	<i>kuopokelpi</i>	7,02	23,61	7,8	16,0	1,4933	4,2	16,0	0,8009
019	<i>puuhi</i>	7,04	59,19	9,5	16,0	1,8591	7,3	16,0	1,3937
020	<i>puhu</i>	7,06	63,52	7,9	16,0	1,5538	5,8	16,0	1,1797
022	<i>turve</i>	7,04	45,49	7,1	16,0	1,4542	5,8	16,0	1,1005

astia	biomassa	käsittelemätön pelletti		torrefioitu pelletti		HUOM.
		massa [g]	kal. lämpöarvo [MJ/kg]	massa [g]	kal. lämpöarvo [MJ/kg]	
014	<i>kuopokelpi</i>	0,8678	19,06	0,9015	20,40	
019	<i>puuhi</i>	1,1015	20,13	1,5336	21,03	
020	<i>puhu</i>	0,9347	20,40	1,2052	20,62	
022	<i>turve</i>	1,0022	22,57	1,1979	23,19	

Mittaukset suoritettu: *9.3.2011*

Mittauksien suorittaja: *Hannu Schwelainen*

JAUHATUS

Biomassa: hake

Käytetyt laitteet: jauhin, raapa, tehomittala

Ympäristön lämpötila: 21 °C

Ympäristön paine: 1,021 bar

Käsitely: 250 °C, 30 min, 10 °C/min

Jauheiden massat: 98,99 g 140,17 g

aika [s]	teho, norm. hake [W]	teho, torr. hake [W]	HUOM.
10	789	597	
20	951	774	
30	1435	956	
40	1462	970	
50	1478	987	
60	1360	925	
70	1242	832	
80	1206	780	
90	1190	775	
100	1115	749	
110	1089	649	
120	921	617	
130	900	579	
140	850	493	
150	844	487	
160	708	496	
170	702	491	
180	682	460	
190	570	471	
200	487	488	
210	450	465	
220	485	468	
230	462	472	
240	481	474	

Mittaukset suoritettu: 11.3.2011

Mittauksien suorittaja: Hannu Savolainen