

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Bioenergiateknologian tutkimusryhmä

Mikkelin ammattikorkeakoulu  
Energia- ja ympäristötekniikan laitos

## LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

46

Jarno Föhr, Tarja Seppänen, Jemina Suikki,  
Hanne Soininen & Tapio Ranta

### TORREFIOIDUN BIOHIILIPELLETIN KIRJALLISUUSTUTKIMUS JA KOEAJOT PILOTTILAITOKSESSA

LUT  
Lappeenranta  
University of Technology



Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Bioenergiateknologian tutkimusryhmä

Mikkelin ammattikorkeakoulu  
Energia- ja ympäristötekniikan laitos

LUT Scientific and Expertise Publications  
Tutkimusraportit – Research Reports, 46

*Jarno Föhr, Tarja Seppänen, Jemina Suikki, Hanne Soininen & Tapio Ranta*

## **Torrefioidun biohiilipelletin kirjallisuustutkimus ja koeajot pilottilaitoksessa**



ISBN 978-952-265-880-7  
ISBN 978-952-265-881-4 (PDF)  
ISSN-L 2243-3376, ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2015

## ALKUSANAT

Tämä julkaisu on loppuraportti hankkeelle: “Torrefioidun biohiilipelletin laatu ja varastoitavuus”. Hankkeen tavoitteena oli tutkia torrefioidun pelletin laatuominaisuuksia sekä niiden teknologia- ja käyttösoveltuvuutta suurenkokoluokan energialaitoksille. Hanke tuki kansainvälistä, kansallista ja alueellista pyrkimystä löytää vaihtoehtoisia uusiutuvia polttoaineita fossiilisten polttoaineiden rinnalle. Uusien polttoainelaitosten tuottaminen paikallisesti loisi merkittävästi myös uusia elinkeinoja ja työpaikkoja Etelä-Savon alueelle.

Tutkimushanke toteutettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston bioenergiateknologian tutkimusryhmän toimesta Mikkelissä. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi prof. Tapio Ranta ja projektipäällikkönä DI Jarno Föhr. Raportin kirjallisuustutkimusosion koosti pääasiassa insinööri B.Sc. Tarja Seppänen. Hankkeen osatoteuttajana oli Mikkelin ammattikorkeakoulun (Mamk) energia- ja ympäristötekniikan laitos, jonka kontribuutiona oli toteuttaa mittaus- ja analysointipalveluja hankkeen tutkimustyölle. Mamkilta hanketutkimusta tekivät tutkimusinsinööri Jemina Suikki ja tutkimuspäällikkö DI Hanne Soininen. Pellettimateriaali tutkimuksia varten tuotettiin Torrec Oy:n pilottilaitoksella Mikkelissä, jossa toimitusjohtaja Mikko Järvenpää vastasi koeajojen tuotannosta.

Hanke oli täysin Suur-Savon Energiasäätiön rahoittama. Hankkeen toteutusaika oli 1.1.2015–31.10.2015. Tutkimustyön toteuttajat kiittävät hankkeen rahoittajaa työn mahdollistamisesta ja mukana ollutta Torrec Oy:tä ansiokkaasta työpanoksestaan ja yhteistyöstään hankkeen tutkimus- ja kehitystyötä kohtaan.

Mikkelissä, lokakuu 2015

Jarno Föhr, LUT

## TIIVISTELMÄ

<b>Tekijät:</b> Jarno Föhr, Tarja Seppänen, Jemina Suikki, Hanne Soininen ja Tapio Ranta	
<b>Otsikko:</b> Torrefioidun biohiilipelletin kirjallisuustutkimus ja koeajot pilottilaitoksessa	
<b>Vuosi:</b> 2015	<b>Paikka:</b> Lappeenranta
LUT Scientific and Expertise Publications Raportit ja selvitykset – Reports, 46 sivua, 19 kuvaa, 10 taulukkoa	
<b>Hakusanat:</b> <i>Torrefiointi, biohiili, pelletti, puuhake, bioenergia</i>	
<p>Tämä raportti käsittelee ”Torrefioidun biohiilipelletin laatu ja varastoitavuus” -hankkeen tuloksia. Hankkeen tavoitteena oli tutkia torrefioidun biohiilipelletin prosessiteknologiaa, markkinoita ja tuotantokustannuksia kirjallisuustutkimusosiossa. Hankkeen päätutkimus keskittyi koeajoihin pilottilaitoksella, jossa valmistettiin biohiilipellettiä erilaisista puuraaka-aineista. Pilottilaitos oli perustettu Torrec Oy:n toimesta Etelä-Savon Energian Pursialan voimalaitoksen yhteyteen Mikkelissä ja sen tuotanto oli käynnistynyt kesällä 2014. Kaikki koe-erät valmistettiin vain käyttämällä sidonta-aineena lauhdevettä, jota oli tiivistynyt säiliön pohjalle torrefiointiprosessin aikana. Näin ollen erillistä lisäsidonta-aineita ei tarvittu, jolloin voidaan säästää tuotantokustannuksissa jatkossakin.</p> <p>Euroopan Unioni on asettanut 20 % tavoitteen uusiutuvien energioiden käytölle vuoteen 2020, josta biomassalla voidaan kattaa kaksi kolmannesta. Tutkimushankkeen tavoitteena oli metsään perustuvan bioenergiatuotannon lisääminen ja tuontienergian korvaaminen kotimaisella polttoaineella. Hankkeen tarkoituksena oli tutkimusanalyysien kautta kehittää uutta kilpailukykyistä teknologiavaihtoehtoa puupolttoaineiden hyödyntämiseksi. Torrefiointiteknologiaa ollaan kaupallistamassa ympäri Eurooppaa parasta aikaa ja uusia biohiilen tuotantolaitoksia on kehitteillä ja rakenteilla. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että biohiilipelletillä on mahdollisuudet suurimittakaavaiseen energiantuotantoon laadun suhteen, kunhan sen käyttäminen tulee edullisemmaksi laitoksissa. Toisaalta, tämä kehitys vaatii tukimekanismeja valtion puolelta, jotta pelletit lähtisivät todella liikkeelle markkinoilla.</p>	

## ABSTRACT

**Authors:** Jarno Föhr, Tarja Seppänen, Jemina Suikki, Hanne Soinen ja Tapio Ranta

**Title:**

Literary Research of Torrefied Biocoal Pellet and Test Runs in Pilot Plant

**Year:** 2015

**Place:** Lappeenranta

LUT Scientific and Expertise Publications

Raportit ja selvitykset – Reports,

46 pages, 19 figures, 10 tables

**Keywords:** *Torrefaction, biocoal, pellet, woodchips, bioenergy*

This report presents the results of the project called the Literary Research of Torrefied Biocoal Pellet and Test Runs in Pilot Plant. The aim of the project was to study the process technology, markets and production costs of biocoal pellet in the literary research section. The main research was focused on the test runs in a pilot plant, where biocoal pellets were manufactured from different raw wood materials. The pilot plant was established by Torrec Ltd., which was connected with Energy of South-Savo power plant in Mikkeli and its production was started in the summer 2014. All sample lots were manufactured by using only condensation water as a binder, which was condensed to the bottom of a tank during the torrefaction process. Therefore, the separate additional binder was not needed, in which case, the part of the production costs can be saved in the future.

The EU has set the renewable energy target to 20% in 2020, of which biomass could account for two-thirds. The aim of this research project was to increase the bioenergy production based on the forest and replace the imported energy by the domestic fuel. The project was designed to develop a new competitive technology option for the utilization of wood fuels across the research analyses. Torrefaction technology are being commercialized over the Europe currently and the new production plants of biocoal are under development and construction. The results of the project show that the potential of biocoal pellet for the large-scale energy production as for quality, as long as its use becomes more affordable in the plants. At the same time, this development requires the support mechanisms from the state side, so that the pellets would really start to move on the markets.

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
1.1	Hankkeen taustaa .....	1
1.2	Hankkeen tavoitteet .....	2
1.3	Raportin rakenne .....	2
2	KIRJALLISUUSTUTKIMUS.....	3
2.1	Johdantoa torrefiointiteknologiaan .....	3
2.2	Torrefiointiteknologian tausta.....	4
2.3	Torrefiointi .....	5
2.3.1	Prosessiteknologia .....	5
2.3.2	Torrefiointiprosessit.....	9
2.4	Pelletöinti .....	14
2.5	Markkinat.....	16
2.5.1	Kansainväliset markkinat.....	16
2.5.2	Markkinat Suomessa.....	18
2.6	Torrefioidun pelletin tuotantokustannusanalyysi.....	21
2.6.1	Tuotantokustannuksen lähtöarvot.....	21
2.6.2	Torrefioitujen pellettien tuotantokustannukset .....	23
3	KOEAJOT PILOTTILAITOKSELLE .....	25
3.1	Johdantoa koeajoihin .....	25
3.2	Materiaalit ja menetelmät .....	27
3.2.1	Materiaalit.....	27
3.2.2	Menetelmät .....	29
3.3	Tulokset.....	34
3.3.1	Puuhakkeet.....	34
3.3.2	Torrefioidut pelletit.....	35
3.4	Johtopäätökset koeajoista.....	37
4	LOPPUPÄÄTELMÄT .....	39
	LÄHTEET .....	43





# 1 JOHDANTO

## 1.1 Hankkeen taustaa

Torrec Oy on kaupallistamassa perustajäsentensä kehittämää torrefiointiteknologiaa, jonka testaamiseksi rakennettiin pilottikokoluokan laitos Pursialaan keväällä 2014. Laitos piti sisällään koko tuotantoprosessin: kuivauksen, torrefiointin ja pelletöinnin. Prosessi toimi kertapanosperiaatteella, joten kyseessä ei ollut jatkuvatoiminen laitos. Laitoksen käyttöönottoa varten oli käynnissä torrefiointiteknologian kehityshanke, jonka avulla laitos rakennettiin toimintavalmiiksi ja prosessin toimivuus testattiin. Laitos kykeni tuottamaan valmista torrefioitua biohiilipellettiä erilaisiin käsittelykokeisiin ja polttokokeisiin riittäviä määriä, jotta pellettien käsiteltävyys, logistiikka ja soveltuvuus voimalaitoskäyttöön pystyttiin todentamaan. Pilottilaitoksen rakentaminen oli merkittävä askel laajemman Ristiinan biohiilituotantoon tähtäävän Saimaa Biocoal Plant -investointihankkeen kannalta. Miktech Oy:n vetämän valmistelutyön tavoitteena on saada kaupallisen kokoluokan (200 000 t/a) biohiilipellettien tuotantolaitos Ristiinaan. Kaupallisen biohiilituotantolaitoksen toteuttajaa ja teknologiaa ei vielä ole valittu ja investoinnit ovat vielä suunnitelma- ja lupatasolla.

Torrefiointiteknologia on tällä hetkellä lähellä kaupallistumisvaihetta ja ainakin 60 yritystä on tunnistettavissa, joilla on torrefiointiin liittyviä hankkeita kehitysasteella. Suurin osa näistä on pieniä alkuvaiheen yrityksiä, jotka eivät pysty vastaamaan suuren kokoluokan torrefiointilaitoksen pystyttämiseen, mutta myös osa suurista prosessiteollisuuden laitetoimittajista ovat aktiivisia tällä sektorilla. Useita vaihtoehtoisia puun termisiä käsittelymenetelmiä korkeassa lämpötilassa (200–300 °C) ja hapettomissa olosuhteissa on kehitteillä ja pilotoitu erityisesti Keski-Euroopassa. Biomassan lämpökäsittely eri menetelmissä tapahtuu joko suoraan tai epäsuorasti. Termisistä prosessointimenetelmistä lähimpänä kaupallista käyttöönottoa teollisessa kokoluokassa ovat torrefiointi- ja höyryräjäytysprosessit. Torrefiointi

voidaan tehdä joko panostyypillisesti tai jatkuvatoimisella menetelmällä. Laitteistovalintaan vaikuttavat torrefiointimäärät sekä tilaratkaisut.

## **1.2 Hankkeen tavoitteet**

Tutkimushankkeen tavoitteena oli metsään perustuvan bioenergiatuotannon lisääminen ja tuontienergian korvaaminen kotimaisella polttoaineella. Samalla tavoiteltiin bioenergian jalostusasteen nostoa, alan yritysten liiketoiminnan kasvattamista Etelä-Savossa sekä Mikkelin seudun profiloitumista bioenergia-alan kansainvälisesti tunnetuksi toimijaksi. Tutkimushanke tuki pyrkimystä löytää vaihtoehtoisia uusiutuvia polttoaineita fossiilisten polttoaineiden rinnalle. Biohiilipelletti on yksi vaihtoehto kivihiilen korvaamiseksi uusiutuvalla polttoaineilla. Muissa kotimaisissa tutkimushankkeissa testatut biohiilipelletit oli tuotettu ulkomailla ja määrät olivat olleet pieniä. Hankkeessa oli käytettävissä suurempi kotimaiseen raaka-ainepohjaan perustuva pellettimäärä erityyppisiä kenttäkokeita varten, jollaisia ei ole tähän mennessä pystytty toteuttamaan Suomessa. Biohiilipellettituotanto tarjoaa merkittävän liiketoimintamahdollisuuden Etelä-Savon metsäenergia-alan arvoketjussa mukana oleville toimijoille. Tutkimushanke lisäsi merkittävästi myös alueen tutkimuslaitosten osaamista.

Hankkeen päätavoitteena oli tutkia torrefioidun biohiilipelletin laatuominaisuuksia puulajikohtaisesti koeajojen yhteydessä. Valmis torrefioitu biohiilipellettimateriaali saatiin Torrec Oy:n pilotointilaitokselta analysointia varten. Analyysien perusteella pystyttiin arvioimaan torrefioidun pelletin laatua perustuen koeajojen antamiin tuloksiin. Hankkeen tarkoituksena oli tutkimusanalyysien kautta kehittää uutta kilpailukykyistä teknologiavaihtoehtoa puupolttoaineiden hyödyntämiseksi.

## **1.3 Raportin rakenne**

Tutkimusraportti on “Torrefioidun biohiilipelletin laatu ja varastoitavuus” –hankkeen loppuraportti. Raportin rakenne koostuu kahdesta erillisestä osiosta: kirjallisuustutkimuksesta ja kokeellisista koeajoista pilottilaitoksella.

Kirjallisuustutkimuksessa on käsitelty torrefiointiteknologiaa ja –prosesseja, pelletointia, biohiilen markkinoita Suomessa ja ulkomailla sekä torrefioidun pelletin tuotantokustannusanalyysiä esimerkkilaitoksen suhteen. Kokeellisissa koeajoissa suoritettiin koeajoja eri puuhakemateriaaleilla pilottilaitoksessa ja valmistettuja pellettieriä arvioitiin laatutekijöiden kannalta.

## **2 KIRJALLISUUSTUTKIMUS**

### **2.1 Johdantoa torrefiointiteknologiaan**

Euroopan unioni on asettanut jäsenmailleen tavoitteita uusiutuvan energian käytön lisäämisestä ja päästöjen vähentämisestä. Euroopan unionin tavoite on vuonna 2020 tuottaa 20 % kuluttamastaan energiastaan uusiutuvilla energialähteillä. Tähän tavoitteisiin pääsemiseksi on alettu kehittää menetelmiä korvata fossiilisia polttoaineita ja raaka-aineita biomassan polttamisella. Biopolttoaineita halutaan käyttää energian tuottamiseen entistä enemmän, mutta liian moni biopolttoaine sisältää runsaasti vettä, jolloin sen kuljettaminen käyttöpaikalle on kallista ja polttamisesta ei saada tarpeeksi energiaa. Puun torrefiointi on yksi ratkaisu päästä tavoitteeseen kasvihuonekaasujen vähentämisessä. Torrefioidulla puupelletillä voidaan korvata kivihiltä olemassa olevissa kivihiiivoimalaitoksissa ilman suurempia teknisiä muutoksia. Puu katsotaan hiilidioksidineutraaliksi polttoaineeksi, ja näin ollen kokonaishiilidioksidipäästöt vähenevät merkittävästi.

Biomassojen käytössä ongelmana on alhaisesta energiatiheydestä johtuvat kuljetuskustannukset sekä poltto-ominaisuuksien heikkous. Näistä johtuen biomassaa jalostetaan kemiallisilta ja fyysisiltä ominaisuuksiltaan paremmaksi ja erilaisiin käyttötarkoituksiin soveltuvaksi. Yksi biomassan jalostustekniikka on torrefiointi eli biomassan lämpökäsittely hapettomissa olosuhteissa. Torrefioinnin jälkeen biomassaa voidaan pelletoida, jolloin saadaan ominaisuuksiltaan kivihiltä muistuttava tuote, jonka energiatiheys on suurempi kuin käsittelemättömän biomassan. Suuremman energiatiheyden ansiosta torrefioitujen biohiilipellettien kuljettamisesta tulee

kannattavaa. Tämä voi lisätä biomassan käyttöä energiateollisuudessa, jossa polttoainetta tarvitaan paljon ja sitä on hankittava kaukaa. Biohiilipellettejä, johtuen niiden hyvistä ominaisuuksista, voidaan käyttää korvaamaan sekä fossiilisia polttoaineita että raakabiomassaa.

Torrefiointitekniikka on 1990-luvulla kiinnostusta herättänyt puubiomassan käsittelymenetelmä. Torrefioinniksi kutsutaan biomassan käsittelyä 200–300 °C:n lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. Käsittelyssä siitä haihtuvat vesi sekä osa haihtuvista aineista. Näin puulle saadaan parempia ominaisuuksia, joita ei tuoreella puulla ole. Biomassa kuivuu kokonaan torrefioinnin aikana, ja sen jälkeen kosteuden imeytyminen takaisin tuotteeseen on hyvin vähäistä (Flyktman et al. 2011). Kuljetettavuuden ja käsittelyn helpottamiseksi torrefioitu biomassa, biohiili, murskataan ja pelletöidään. Tätä lopputuotetta kutsutaan myös TOP-pelletiksi (Torrefied Pellet). TOP-pelletti on lähes hydrofobinen eikä helposti ime kosteutta ulkona varastotaessa. Pelletin tilavuuspohjainen lämpöarvo vastaa kivihiiltä ja se käyttäytyy hiilimyllyjen jauhatuksessa ja pölypolttimilla kuten kivihiili, joten se soveltuu hiililaitoksiin sellaisenaan ilman suurempia muutostarpeita tai investointeja. Investoinnit tehdään lähelle raaka-ainelähteitä, jolloin perinteisiin puupolttoaineisiin verrattuna voidaan saavuttaa merkittävät kuljetusedut (Flyktman et al. 2011).

Torrefioitua polttoainetta voidaan valmistaa erityyppisistä biomassoista. Lopputuotteessa on kuitenkin samat ominaisuudet, riippumatta lähtöaineista, koska puu- ja kasviperäinen biomassa koostuvat samanlaisista rakennusaineista. Suurin yksittäinen rakenneaine on polymeerit eli selluloosa. Kemialliset muutokset näihin kuituihin ovat kaikilla biomassoilla samat, jolloin vastaavasti saadaan samat materiaali muutokset. Samat käsittelyolosuhteet eivät kuitenkaan automaattisesti tuota samanlaista lopputuotetta kaikista materiaaleista (Bergman et al. 2005).

## **2.2 Torrefiointitekniikan tausta**

Torrefiointi ei ole uusi teknologia, mutta energiantuotannossa käytettävän biomassan jalostusta varten sen käyttöä on alettu tutkia ja kehittää vasta viimeisten 10–15

vuoden aikana. Useat suuret energiayhtiöt ja tutkimuslaitokset ovat selvittäneet torrefioidun biomassan käyttömahdollisuuksia ja monet toimittajat ovat alkaneet kehittää, patentoida ja kaupallistaa torrefioidun biomassan tuotantoteknologiaa. Torrefioitua biomassaa ei kuitenkaan tuoteta vielä laajasti kaupallisessa mittakaavassa ja sen markkinat ovat vielä suppeat, mutta kasvavat. Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa, on kuitenkin suunnitteilla useita torrefioitua biomassaa tuottavia laitoksia, joiden toteutumisen kannalta on tärkeää lisätä tietämystä torrefioidun biomassan mahdollisista käyttökohteista ja markkinanäkymistä tulevaisuudessa. Kaupallistamisvaiheen ollessa vielä kesken on toistaiseksi vain vähän saatavilla julkisia, yksityiskohtaisia, raportteja torrefiointitekniikasta. Demolaitoksien poltto- ja varastointikokeita on tehty ja raportoitu. (Khodayari 2012, Koppejan et al. 2012, Hiilineutraali tulevaisuus 2015) Alankomaissa paikallinen valtion tutkimuslaitos ECN on ollut aktiivinen ja EU-rahoitteinen SECTOR Project on tutkinut torrefioituja materiaaleja ja niiden varastointia ja käsittelyä vuosien 2012–2015 aikana (SECTOR-project 2015).

## **2.3 Torrefiointi**

### *2.3.1 Prosessiteknologia*

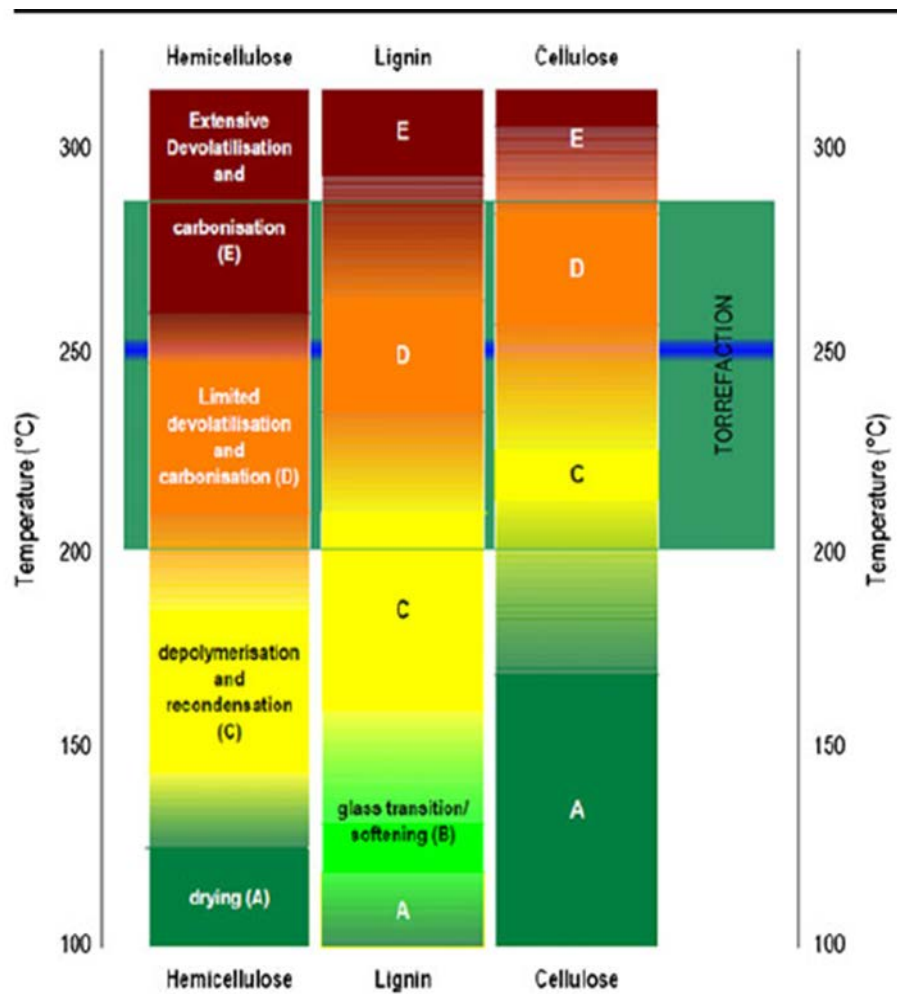
Torrefioinnilla tarkoitetaan matalassa lämpötilassa (200–300 °C), hapettomissa olosuhteissa, tapahtuvaa termokemiallista käsittelyä. Käsittely on kevyt pyrolyysireaktio, jonka tarkoituksena on muuttaa hiilipitoisen materiaalin rakennetta ja ominaisuuksia paremmin polttoainekäyttöön sopivaksi. Torrefioinnissa poistetaan kosteus ja osa haihtuvista aineista sekä pyritään hemiselluloosan hajottamiseen (Strezov et al. 2015).

Puun kuivaus muuttaa puun mekaanisia ominaisuuksia ja lämpökäsittely kemiallista rakennetta. Puun kuituseinän kerrokset koostuvat selluloosasta (polymeeri), hemiselluloosasta (hiilihydraatti), ligniinistä (aromaattinen yhdiste), uuteaineista ja epäorgaanisista aineista. Vettä tuoreessa puussa on keskimäärin 40–60 %. Lämpökäsittelyn aikana suurimmat puuaineksessa tapahtuvat muutokset johtuvat

hemiselluloosan hajoamisesta. Selluloosa ja ligniini hajoavat hitaammin verrattuna uuteaineisiin. Puun komponenteista osa hajoaa, mutta samalla syntyy uusia yhdisteitä ja sidoksia. Erottavia yhdisteitä ovat vesi ja hiilidioksidi (Acharya et al. 2012).

Suomen yleisimmät puulajit ovat havupuiden osalta mänty ja kuusi, sekä lehtipuiden osalta hies- ja rauduskoivu. Suurin osa puun rakenteesta koostuu kuolleesta puusolukosta ja niiden ainoa tehtävä on pääasiassa tukea puuta. Puun varsinaiset rakennusaineet ovat selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini (Vanninen 2009). Tyypillisesti puun kuivapainosta on 40–50 % selluloosaa. Havupuusta sisältää vähemmän hemiselluloosaa (25–30 m-%) kuin lehtipuusta (37–40 m-%). Ligniiniä voidaan kuvailla sideaineeksi, joka sitoo yksittäiset solut yhteen ja antaa niille mekaanisen voiman. Ligniinipitoisuus on puolestaan suurempi havupuussa (27–30 m-%) kuin lehtipuussa (20–25 m-%). Ligniini koostuu suurelta osin hiilestä ja vedystä, jotka ovat lämmöntuotannon elementtejä. Puu sisältää myös näiden päärakennusaineiden lisäksi uuteaineita (<5 m-%) kuten terpiiniä, lipidiä ja fenolia. (Alakangas 2000, McKendry 2002)

Torrefioinnin kannalta tärkeät lämpötilat ja termisen hajoamisen mekanismit on esitetty tarkemmin kuvassa 1. Veden höyrystyminen alkaa ensin ja vesi poistuu puusta noin 110 °C:ssa. Lämpötilan kohotessa 200–280 °C:een hemiselluloosa alkaa hajota ja puun kemiallisissa sidoksissa ollut vesi poistuu. Helppoiten haihtuvat aineet vapautuvat. Hemiselluloosa on puun rakennekomponenteista herkin lämpöhajoamiselle ja sen massa pienenee nopeasti, kun lämpötilan nousee yli 230 °C:een. Selluloosa on paremmin lämpöä kestävä ja se alkaa hajota merkittävästi lämpötilan noustessa 260 °C:een. Lämpötilan noustessa yli 290 °C:een, 45 % selluloosasta on hajonnut. Ligniini on eniten lämpöä sietävä puun pääkomponentti ja alle 230 °C:ssa ligniinin massan pieneneminen on vain vähäistä. Suurimmat muutokset ligniinin massassa alkaa tapahtua vasta lämpötilan noustessa 300 °C:een. (Bergman et al. 2005)



**Kuva 1** Biomassan termiset muutokset torrefioinnin aikana. (Bergman et al. 2005)

Eri vaiheet voidaan tiivistää:

- 20–110 °C, puu imee lämpöä ja kosteus poistuu
- 110–270 °C, loppukin kosteus poistuu, hajoaminen käynnistyy, kaasuja muodostuu (etikkahappo, metanoli)
- 270–290 °C, eksotermiinen hajoaminen alkaa, jakautuminen kemiallisiin komponentteihin jatkuu, tuottaa lämpöä ja kaasuja
- 290–400 °C, ainesosien hajoaminen jatkuu, hiiltymistä. (Acharya et al. 2012).

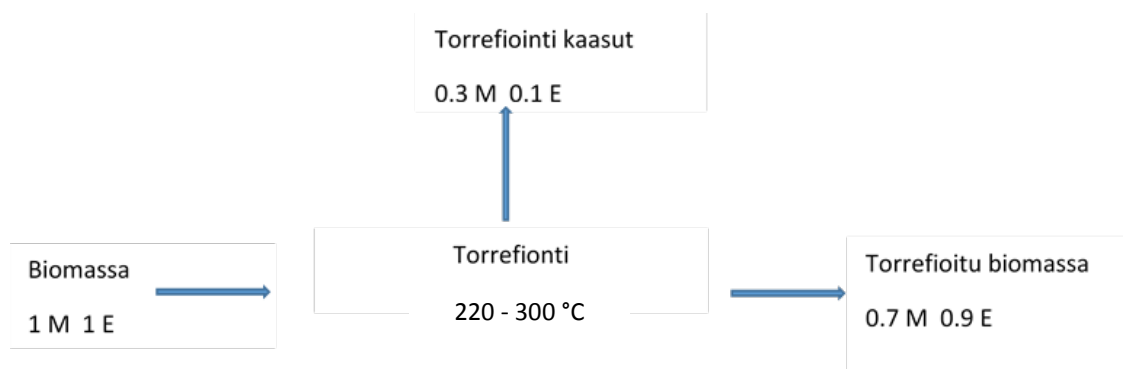
Lämmitysnopeus torrefioinnin aikana on tyypillisesti vähemmän kuin 50 °C/ minuutissa. Vain osa täydellisessä pyrolyysissä kaasuuntuvista aineista kaasuuntuu, jonka johdosta torrefioidussa biohiilessä on haihtuvia orgaanisia aineita enemmän kuin täydellisellä pyrolyysillä valmistetussa puuhiilessä. Lämmitysnopeudella maksimoidaan biohiilen saanti, kun kuumilla ja nopeilla pyrolyysiprosesseilla voidaan maksimoida haihtuvien aineiden saantia. Taulukossa 1 on havainnollistettu torrefiointilämpötilan vaikutusta puun lämpöarvoon.

**Taulukko 1 Torrefiointilämpötilan vaikutus puun lämpöarvoon ja lämpöarvojen vertailu puuhiilen, hiilen ja kivihiilen lämpöarvoihin. (Mukaillen lähdettä BalBiC 2015 ja Hajoitettut biojalostamot, Itä-Suomen yliopisto)**

Materiaali	Käsittelylämpötila (°C)	Lämpöarvo (MJ/kg)
Torrefioitu puu	230	18,5
Torrefioitu puu	250	19
Torrefioitu puu	280	22
Puuhiili	>300	28 - 33
Hiili		15 - 31
Kivihiili, ruskohiili		28,5
Kivihiili, antrasiitti		35,3

Tyypillisesti torrefioinnissa biomassan alkuperäisestä painosta häviää noin 30 prosenttia, mutta sen sisältämästä energiasta vain 10 prosenttia. Eli biomassan lämpöarvo eli energiasisältö painoyksikköä kohden kasvaa. Torrefiointiprosessi lisää energiasisältöä tyypillisestä arvosta 10–17 MJ/kg arvoon 19–22 MJ/kg (Clark et al. 2015). Torrefioinnissa hävinnyt massa on pääosin vettä. Tämä massa sisältää jonkin verran reaktion sivutuotteita ja kaasuja, suurimmaksi osin hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. Torrefioinnin aikana biomassa kuivuu lähes täysin ja sen kosteusprosentti vaihtelee prosessin jälkeen 1–5 % välillä. Biomassasta haihtuu prosessin aikana suhteellisesti enemmän happea ja vetyä kuin hiiltä. Tällöin biomassan energiasisältö kasvaa massayksikkö kohti, koska tuotteessa on suhteessa enemmän palavaa ainesta jalostamattomaan biomassaan verrattuna (Acharya et al. 2012). Kuvassa 2 on esitetty torrefiointiprosessin massa- ja energiatasapaino havainnollisemmin.





**Kuva 2** Torrefiointiprosessin massa- ja energia tasapaino (mukaillen Bergman et al. 2005).

### 2.3.2 Torrefiointiprosessit

Torrefiointiprosessissa puun hydroksyyliyhymät korvautuvat tyydyttymättömillä polaarittomilla ryhmillä, jolloin sen kyky adsorboida vettä vähenee radikaalisti ja materiaalista tulee hydrofobista. Puun torrefiointi etenee samoin kuin pyrolyysi lämpötilan noustessa, mutta se jätetään viemättä eksotermiselle alueelle. Lopputuotteesta tulee haurasta ja helposti jauhautuvaa. Torrefiointin lopputuotetta kutsutaan yleisesti torrefioiduksi puuksi tai torrefioiduksi biomassaksi. (Stelt et al. 2011, Bergman et al. 2005). Taulukossa 2 vertaillaan käsittelemättömän ja torrefioidun biomassa eroja.

**Taulukko 2** Biomassan erot ennen ja jälkeen torrefiointin (mukaillen Clark et al. 2015).

Alkuperäinen biomassa	Torrefioitu biomassa
Tilaa vievä	Tiivistetty
Märkä	Kuiva ja hydrofobinen
Alhainen energiatiheys	Korkea energiatiheys
Biologisesti hajoava	Ei hajoa biologisesti
Korkeat kuljetuskustannukset	Edullisemmat kuljetuskustannukset

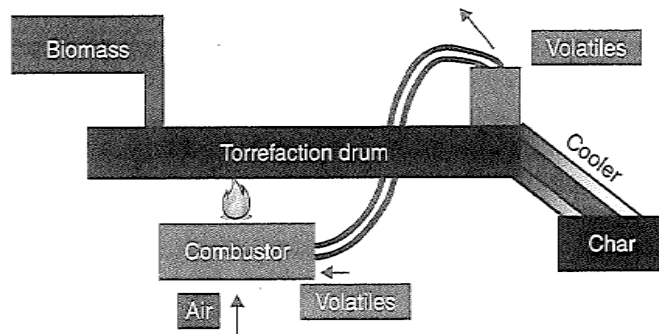
Biomassan torrefioinnissa ovat erotettavissa seuraavat vaiheet: kuivaus, torrefiointi ja jäähdytys (kuva 3). Torrefiointia tehdään useissa erityyppisissä reaktoreissa ja kaikissa prosessi on samanlainen. Alkulämmityksen aikana biomassa lämmitetään vedenhaihtumiseen asti ja esikuivaus tapahtuu vakiona pysyvässä lämpötilassa. Jälkikuivauksessa ja keskitasonlämmityksessä biomassa lämpötilaa nostetaan noin 200 °C:een. Torrefioinnin aikana lämpötila nostetaan haluttuun torrefiointilämpötilaan ja pidetään siinä lämpötilassa haluttu pitoaika. Tämän jälkeen materiaali jäähdytetään loppulämpötilaan (Bergman et al. 2005). Torrefiointi voidaan tehdä joko panostyyppisesti tai jatkuvatoimisella menetelmällä. Torrefiointitekniikka ja biomassan koostumus mm. palakoko vaikuttavat torrefiointiprosessin kulkuun ja lopputuotteiden laatuun suuresti. Eri puulajeilla hemiselluloosan koostumus vaihtelee, joten myös torrefioinnin prosessiolosuhteet täytyy optimoida ja hakea käytetyn biomassan mukaan. Tämä vaikuttaa myös torrefiointireaktorin suunnitteluparametreihin. Torrefiointireaktorin valintaan vaikuttaa erityisesti käytettävän biomassan laatu.

#### B: Torrefaction



**Kuva 3** Torrefiointiprosessin periaate (Van der Stelt et al. 2011).

Kuvassa 4 on esitetty biohiilen tuotannon yksinkertaistettu periaatekuva, jossa haihtuvien aineiden lämpöarvo hyödynnetään tuottamaan lämpöä torrefiointiin ja kuivaukseen.



**Kuva 4. Teollisen Torrefiointiprosessin periaatekuva (Clark et al. 2015).**

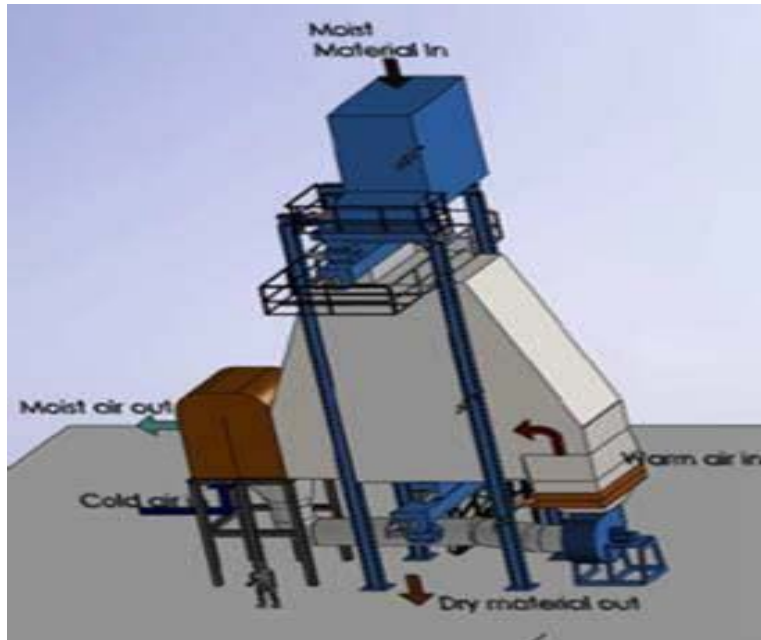
### **Panosprosessi**

Panostyyppisen torrefiointilaitteiston kapasiteetti jää pieneksi verrattuna jatkuvatoimiseen prosessiin. Panostyyppisen torrefiointiprosessin periaate voidaan kuvata Torrec Oy:n vuonna 2014 käynnistyneellä Mikkelin pilottilaitoksella (kuva 5). Tämä pilottilaitos käsittää koko prosessin kuivauksesta torrefiointiin sekä pelletöintiin. Prosessi toimi kertapanosperiaatteella. Laitoksen laskennallinen kapasiteetti vuodessa oli 2 200 t ja se pystyi tuottamaan torrefioitua pellettiä käsittely- ja polttoainekokeisiin. (Ranta et al. 2015A).



**Kuva 5 Torrec Oy:n pilottitehdas Mikkelissä.**

Tämä torrefiointiprosessi perustui pystyreaktoriin, missä materiaalivirrat, puuhake, syötettiin reaktoriin päältä käyttämällä painovoimaa apuna. Reaktorissa kuivaus ja torrefiointi tapahtui saman reaktorin sisällä (kuva 6).



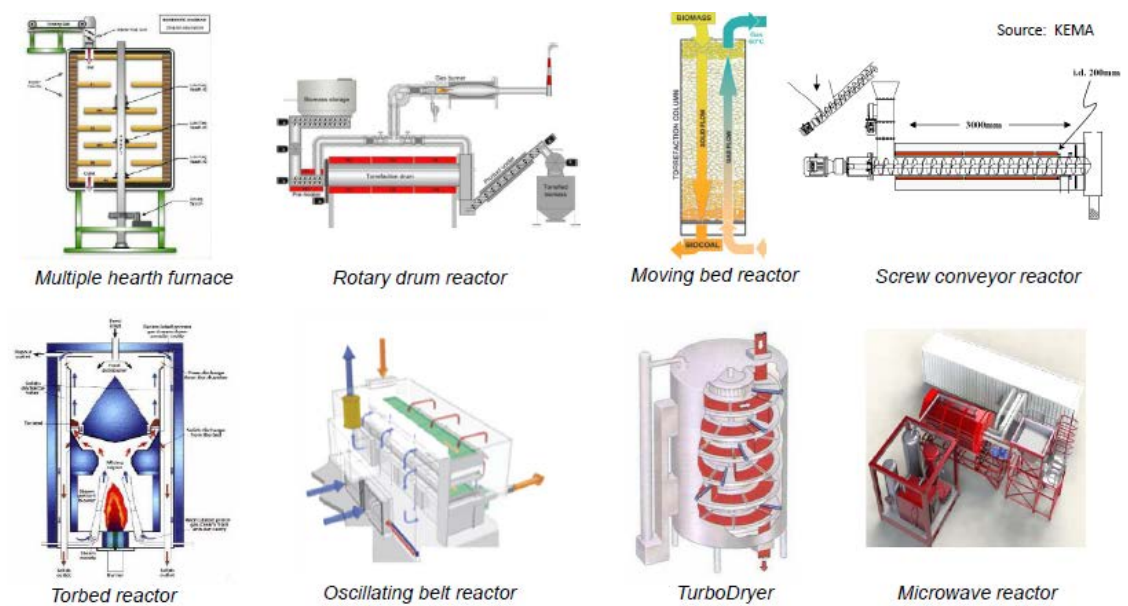
**Kuva 6** Materiaali- ja ilmankierto panostyyppisessä pystyreaktorissa (Ranta et al. 2015A).

Reaktorissa tapahtuva alkulämmitys poisti veden biomassasta ensin ja esikuivatti biomassan. Biomassan lämpötila nostettiin 200 °C:een, missä loppukosteus ja osa haihtuvista aineista poistuivat. Lämpötilaa nostettiin edelleen haluttuun torrefiointilämpötilaan, missä sitä pidettiin vakiona tarpeellinen aika. Tämän jälkeen lämpötila laskettiin takaisin 200 °C:een. Tässä yhteydessä biomassasta poistui haihtuvia ja palavia yhdisteitä. Lopuksi kiinteä aine jäähdytettiin sopivaan lämpötilaan ja siirrettiin pelletöitäväksi. (Ranta et al. 2015A)

### **Jatkuvatoiminen prosessi**

Jatkuvatoimista torrefiointia tehdään, tutkitaan ja kehitetään useissa erilaisissa reaktoreissa, jotka ovat alun perin suunniteltu pääsääntöisesti muuta käyttöä varten. Tällaisia reaktoreita ovat mm. pyörivä rumpureaktori, ruuvikuljetinreaktori ja

mikroaaltoreaktori (kuva 7). Lisäksi torrefiointia varten on kehitetty omia reaktortyyppjä kuten Torbed-reaktori. Eri valmistajat tarjoavat erilaisia patentoituja malleja. Taulukossa 3 on esitelty eri reaktortyyppjä ja niiden valmistajia. Näistä reaktortyyppistä on saatavilla vaihtelevaa tietoa erilaisista käyttö- ja prosessiolosuhteista. Valinta eri torrefiointitekniikoiden välillä on poikkeuksellisen vaikeaa, koska vertailevaa arviointia on tehty vain vähän erityyppisten reaktorien välillä. (Ranta et al. 2015A, Acharya et al. 2012, Bergman et al. 2005)



**Kuva 7** Reaktortyyppjä (Kleinschmidt, C. KEMA 2011).

**Taulukko 3** Eri reaktortyyppjä ja niiden valmistajia (Clark et al. 2015).

Reaktortyyppit	Valmistajat
Rotary drum reactor	CDS(UK), Torr-Coal (NL), Bio3D(FR), EBES AG (AT), 4 Energy Invest (BE), Bioendev (SWE), Atmosclear S.A.(CH)
Screw conveyor reactor	BTG(NL), Biolake (NL), Foxcoal (NL), Agri-Tech producers (US)
Multiple Hearth Furnace /Turbo dryer	CMI-NESA (BE), Wyssmont (US)
TORBED reactor	Topell (NL)
Microwave reactor	Rotawave (UK), Sairem (FR)
Compact moving bed	ECN (NL), Thermya (FR), Buhler (US)
Oscillating belt conveyor	Eco Technology (US)

Torrefioinnin kaupallinen kehitys on parhaillaan alkuvaiheessa. Useat teknologiayritykset ja niiden teolliset yhteistyökumppanit ovat vähitellen siirtymässä kohti kaupallistamista. Vaihtoehtoiset torrefiointitekniikat ja niiden vaihtelevat vaatimukset niin raaka-aineen ominaisuuksien, lämmönsiirron, prosessinohjauksen, investointi- ja käyttökustannusten suhteen tuottavat edelleen kehityshaasteita. Suora teknologian kaupallistaminen ilman pilottivaihetta on ongelmallista. (Ranta et al. 2015A, Acharya et al. 2012, Bergman et al. 2005)

## 2.4 Pelletöinti

Pelletöintivaiheessa torrefioitu puuhake murskataan ja yleensä siihen lisätään torrefioinnissa tiivistynyttä lauhdevettä tai muuta vastaavaa lisäsidonta-ainetta vähentämään kitkaa prosessissa ja sitomaan materiaalia. Tämän jälkeen murskattu puumassa työnnetään rei'itetyn matriisin läpi (kuva 8). Matriisin olennaisin osa on 65 mm mittainen puristuskanava, johon puumassaa syötetään jatkuvasti lisää pelletöinnin aikana. Puumassan lämpötila kohoaa kanavassa puristuksen vaikutuksesta. Valmiin tuotteen tilavuuspaino ja ominaislämpöarvo kasvavat, jolloin sen energiatiheys on lähellä kivihiltä. Pelletöinnin jälkeen pelletit siirretään varastosäilytykseen, laitoskoosta riippuen joko silloon tai suursäkkeihin.



**Kuva 8** Pelletöinnissä käytettävä rautamatriisi Torrec Oy:n pilottilaitoksella.

Hyvälaatuista torrefioitua pellettiä voidaan tuottaa ilman lisättyä sidonta-ainetta. Torrefiointiprosessin jälkeen suoritettava pelletöinti vaatii erikoistuntemusta puumassan rakenteen muutoksista korkean paineen ja lämpötilan vaikutuksista. Kuitenkin pelletin muodostuminen on voimakkaasti riippuvainen syötettävästä raaka-aineesta ja suotuisasta torrefiointiolosuhteen hallinnasta. Tuottaminen ilman lisäsidonta-aineita voi kuitenkin rajoittaa tuotteen hienosäätämistä logistiikan ja loppukäyttäjien vaatimusten mukaisiksi. (Kiel 2013)

Pellettien mekaaninen kestävyys tavalliseen vaaleaan pellettiin nähden voi olla vastaavanlainen, tietysti riippuen olosuhteista ja raaka-aineista. Puu sisältää myös sen omaa luonnollista sidonta-ainetta, jota kutsutaan ligniiniksi. Kuitenkaan aina puun oma ligniini ei riitä tuottamaan hyvälaatuista ja kestävästä torrefioitua pellettiä. Ligniinillä on tärkeä rooli pelletin sisäisten sidosten syntymisessä. Toisaalta, osa ligniinistä kuitenkin hajoaa torrefiointiprosessin aikana, mutta hajoamiseen vaikuttavat prosessin olosuhteet, lähinnä maksimilämpötila. Torrefioidun pelletin valmistus vaatii optimointia sekä torrefiointi- että pelletöintiprosessien osalta, kun käytetään korkeita lämpötiloja ja paineita. Monet yritykset torrefiointiteknologian saralta ovat harkinneet käyttävänsä lisäsidonta-aineita kuten ligniiniä, glyseriiniä, parafiiniä, melassia, biomuoveja ja torrefiointikaasun tiivistymisjakeita. Myös ennen pelletöintivaihetta annettava vesisumutus on parantanut torrefioitujen pellettien sidosominaisuuksia. Veden käyttö pelletöinnin apuna onkin ollut intensiivisen tutkimuksen kohteena näinä päivinä. (Koppejan et al. 2012)

Torrefioitujen pellettien käyttöä halutaan lisätä ja siihen liittyviä vaihtelevia toimintatapoja halutaan yhtenäistää standardien avulla. Tähän liittyen SECTOR-projektissa on kehitteillä uusi eurooppalainen sekä maailmanlaajuinen tuotestandardi. Eurooppalainen ja kansainvälinen standardi tullaan kehittämään rinnakkain. Eurooppalainen torrefioitu pelletti tulee kuulumaan laatuksensa vuoksi standardiin: EN ISO 17225-8 ”Graded thermally treated and desified biomass fuels”. Standardissa lämpökäsittely tulee kattamaan seuraavat prosessit: torrefiointi, hiililyttäminen, höyryräjäytys ja hydroterminen hiililytys. Kaikki nämä prosessit ovat

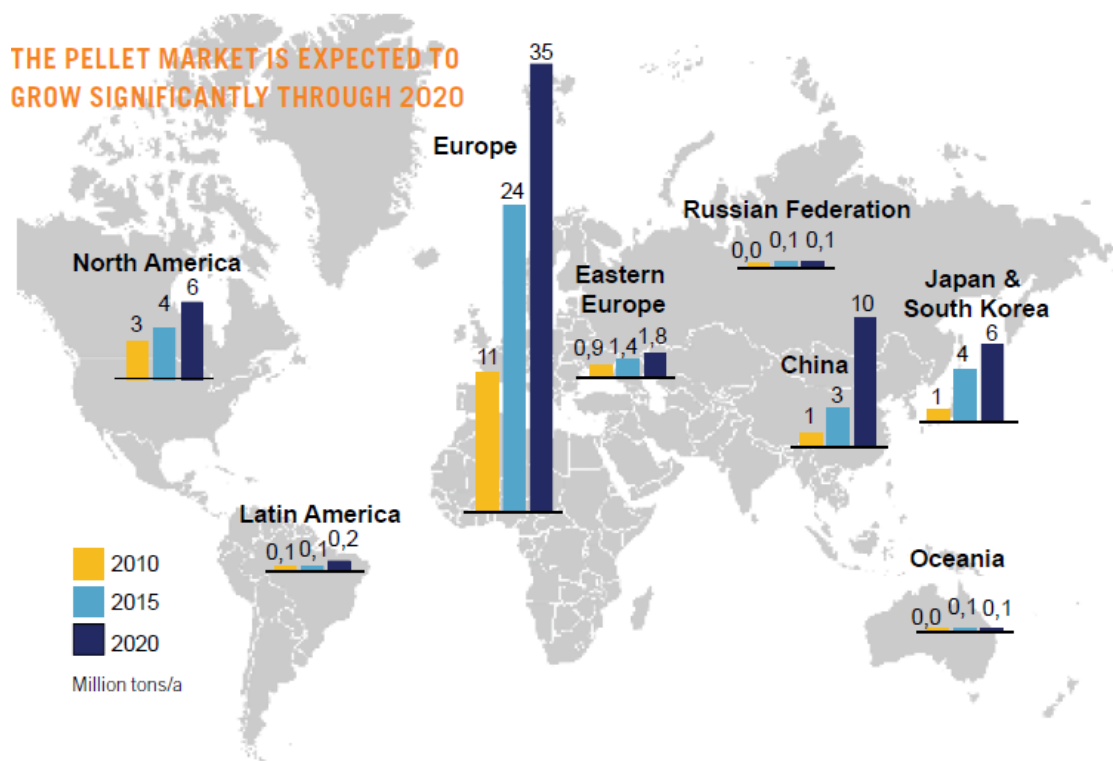
enemmän tai vähemmän tekemisissä hapen, kuumennuksen, veden ja höyryn kanssa. Lämpökäsitelty biomassaa määritellään standardin ISO 16559:2014 mukaisesti biomassaksi, jonka kemiallista rakennetta on muutettu lämmön vaikutuksesta. Tässä määritelmässä lämpökäsittelyä ei lasketa kuivausmenetelmäksi. (Alakangas 2014)

## **2.5 Markkinat**

### *2.5.1 Kansainväliset markkinat*

Maailmassa käytetään tällä hetkellä noin 6,6 miljardia tonnia kivihiiltä vuodessa ja sen käyttö näyttäisi kasvavan edelleen. EU maat ovat sitoutuneet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ja kivihiilen korvaaminen uusiutuvilla polttoaineilla on tärkein tekijä tavoitteisiin pääsemisessä. Suuret energiayhtiöt pitävät biohiiltä merkittävänä mahdollisuutena korvata kivihiilen käyttöä. Biohiilipelletti on tällä hetkellä edullisimpia tapoja vähentää hiilidioksidipäästöjä kivihiilivoimalaitoksissa. Biohiilimarkkinoiden ennakoitaan kehittyvän nopeasti (Vattefall, Topell Energy BV, Helen). Kuvassa 9 on esitetty konsultointi- ja suunnittelu-yhtiö Pöyryn laatima ennusteiden mukainen globaali pellettimarkkinoiden kasvu vuoteen 2020. Ennusteen mukaan pelletin markkinat kasvavat 59 miljoonaan tonniin vuoteen 2020 ja tästä biohiilipelletin osuus ennustetaan olevan 7,5 miljoonaa tonnia. Rahallinen investointi biohiilipellettilaitoksiin tulee olemaan noin miljardin euron luokkaa. (Pöyry 2013).





**Kuva 9 Ennuste pellettimarkkinoiden kasvusta vuoteen 2020 (Pöyry 2013).**

Biohiilipellettien merkittävimmät käyttökohteet sijaitsevat Euroopassa, jossa niitä käytetään kivihiilivoimaloiden lisäpolttoaineena. Tästä syystä johtuen prosessin kehitys ja ensimmäiset demonstraatio- ja tuotantolaitokset löytyvät ja kehitys painottuu Keski-Eurooppaan lähinnä Hollantiin, Belgiaan ja Itävaltaan.

Torrefiointiteknologian kaupallistaminen on edelleen Euroopassa kehitysvaiheessa. Usean demonstraatiolaitoksen tekniset ongelmat ovat viivästyttäneet laitosten kaupallisen toiminnan aloittamista. Kaupallisen tuotannon odotetaan käynnistyvän, mutta käytettävistä teknologioista ja tuotantomääristä on vain rajallista julkista tietoa. Tulevan käytön ensisijaiset raaka-aineet ovat puuperäiset polttoaineet. Tämä johtuu siitä, että metsäteollisuuden sivuvirtojen käyttöasteet EU:ssa ovat jo suhteellisen korkeat ja Keski-Euroopan puun tuotantokapasiteetti on selvästikin tiedossa sekä lisäraaka-aineen hinta on melko korkealla tasolla. Tuotteen maksukyvyyn määräävät

pääosin eri maissa maksettavan vihreän sähkön syöttötariffit. Torrefioitu puupelletti on tällä hetkellä käyttäjälle energiahinnaltaan kalliimpi kuin kivihiili.

Torrefioitu puu vaatii vielä lisätutkimusta ja kokemuksia kaupallisen mittakaavan tuotannosta. Kuitenkin hyvän kuljetettavuutensa vuoksi puun torrefioinnilla ja pelletöinnillä voidaan saada aikaan uusi markkina puulle. Torrefioidun puun etuna on helppo käytettävyys kivihiilen pölypolttolaitoksissa. Lisäksi torrefiointiin käytettävän raaka-aineen laatuvaatimukset ovat matalat. Tehokkaimmillaan torrefiointiprosessi on, kun se on liitetty sähkön- ja lämmöntuotantoon lähellä raaka-ainelähdettä.

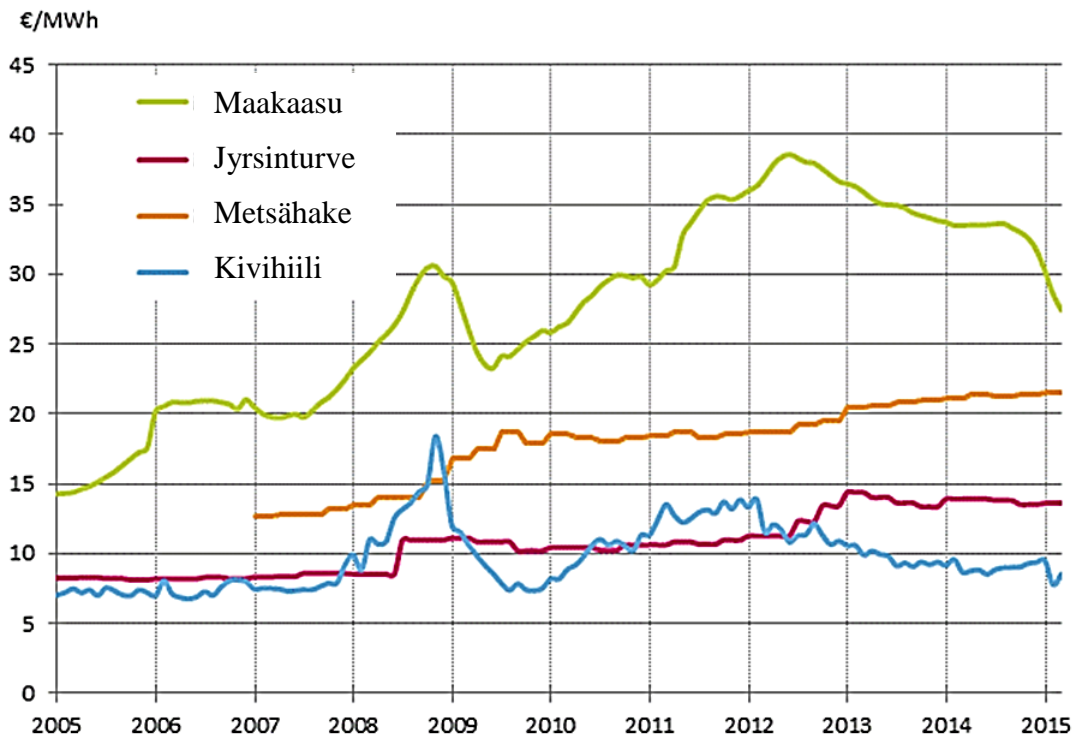
### *2.5.2 Markkinat Suomessa*

Suomessa biohiilipellettien käyttö on suunniteltu lähinnä kivihiilikattiloiden lisäpolttoaineena, jolloin biohiilipelletit korvaisivat osan fossiilisista polttoaineista sähkön ja lämmön tuotannossa. Kivihiilikattiloissa kivihiiltä voidaan korvata noin kymmenen prosenttia puupelleteillä ilman, että laitoksen polttoaineen käsittelyyn ja kivihiilimyllyihin joudutaan tekemään suurempia muutoksia. Biohiilipelletit ovat, lämpökäsittelystä johtuen, rakenteeltaan kivihiiltä hauraampaa ja jauhautuvat kivihiilen seassa paremmin. On arvioitu, että kivihiilestä voitaisiin korvata jopa yli puolet biohiilellä. Torrefioidulla biohiilipelletillä voidaan korvata jo suurin osa. Tästä johtuen biohiilipelletin käyttömahdollisuudet ovat laajat sekä Suomessa että Euroopassa. (Pöyry 2013, Biosaimaa 2015, Forrest Energy 2020)

Suomi on sitoutunut nostamaan uusiutuvan energian osuuden 38 prosenttiin energian loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi bioenergian, pääasiassa metsäenergian, käyttöä on lisättävä merkittävästi perinteisen sähkön ja lämmön tuotannon lisäksi tulevaisuuden liikenteen biopolttoaineiden tuotannossa sekä biojalostamoissa. Suomella arvioidaan olevan edellytyksiä valmiin kaupallisen polttoaineen viejäksi kasvaville bioenergian maailman markkinoille. (Forrest Energy 2020)

Biohiileen tarvittava taloudellinen panostus on riippuvainen markkinoiden hiilen hinnasta, päästöoikeuden hinnasta, polttoaineveroista (maksetaan vain lämmitykseen)

ja muiden mahdollisten kannustimien, kuten syöttötariffien tai tuotantotukien hinnoista. Kannustimet vaihtelevat suuresti eri maiden välillä ja monia poikkeuksia sekä ajallista vaihtelua on havaittavissa. Hiilen hinta on laskenut viime vuosina, koska taantuman laskee energian kysyntää. Tällä hetkellä, kivihiili on halvin polttoaine sähköntuotannossa (kuva 10). (Ranta et al. 2015B)



**Kuva 10 Polttoainehintoja sähköntuotannossa Suomessa (Tilastokeskus 2015).**

Metsähaketta käytetään tällä hetkellä ainoana puupolttoaineena suuren mittakaavan CHP-kattiloissa (combined heat and power plants). Tuotantolaitokset saavat energia-avustusta sähkön tuotantoon, joka on riippuvainen päästöoikeuksien hinnasta ja turpeen valmisteveroista. Kun päästöoikeuksien hinta on alhaisempi kuin 10 €/tn CO<sub>2</sub>, niin tuki on enintään 16 €/MWh ja 0 €/MWh, kun hinta ylittää 22,7 €/tn CO<sub>2</sub>. Polttoaineesta maksettava energiatuki riippuu kattilan hyötysuhteesta sekä sähkön ja lämmön suhteesta. Tästä johtuen tukijärjestelmä valmius maksaa jyrsinturpeesta ja metsähakkeesta on hieman parempi kuin hiilen. Tämä on kuitenkin suunnattu CHP-laitoksiin (rinnakkaispolttoon sopivat leijupetikattilat), joissa näitä kaikkia

polttoaineita voidaan käyttää. Tällä hetkellä ei ole samanlaista tukijärjestelmää hiilivoimaloille (pölykattilat), koska tähän asti biohiiltä ei ole ollut Suomessa markkinoilla. Tukijärjestelmä voisi muistuttaa metsähakkeelle tehtyä järjestelmää, mutta sisältäen hiilen valmisteveron turpeen sijasta laskentakaavassa. (Ranta et al. 2015B)

Polttoaineille ei ole valmisteveroja sähköntuotannossa, kun taas lämmöntuotannossa on valmisteverot, jotka on jaettu energiasisällön veroon, hiilidioksidiveroon ja varmuusvarastointimaksuun. Tätä maksua käytetään tuontipolttoaineille kuten hiilelle. CHP- tuotannossa hiilidioksidiveron osuus on vain puolet lämmöntuotannon vastaavasta verosta (taulukko 4). Ajanjaksolla 3/2015 hiilen hinta oli lämmöntuotannossa 30,31 €/MWh, kun vastaavasti sähköntuotannossa sen hintana oli 8,50 €/MWh. Päästöoikeuden hinta oli 7,50 €/tn CO<sub>2</sub> (EUA Spot joulukuu 2015, EEX) ja päästökerroin hiilelle on 94,6 gCO<sub>2</sub>/MJ (0,34056 tn CO<sub>2</sub>/MWh). Tästä muodostuu nykyinen päästöoikeuksien hinta 2,55 €/MWh hiilen polton lisäkustannukseksi. CHP-laitoksissa valmisteverojen suuruusluokka riippuu lämmöntuotannon osuudesta. Vain tälle osalle maksetaan veroa kunkin polttoaineen kulutuksesta verrattuna koko polttoaineen kulutukseen. Eli, mitä suurempi on sähkön osuus, sitä pienempi on energiaverotus. (Ranta et al. 2015B)

**Taulukko 4 Hiilen energiaverot ja varmuusvarastointimaksut tuotantotavoittain (Tilastokeskus, energiahinnat 2015).**

Tuotantotapa	Energiasisältö [€/MWh]		Hiilidioksidi [€/MWh]		Varmuusva- rastomaksu [€/MWh]		Yhteensä [€/MWh]	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
Lauhdevoima	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
CHP	6.65	6.65	5.96	7.50	0.17	0.17	12.78	14.31
Lämmitys	6.65	6.65	11.93	14.99	0.17	0.17	18.74	21.81

Kivihiilen tuonti riippuu myös sademääristä ja mahdollisesta vesivoiman tuottamisesta Pohjoismaissa, sillä suurisademäärä tarkoittaa sähköntuotannon lisäämistä oman hiilivoimalatuotannon sijasta. Hiilen kulutus on vaihdellut viime vuosikymmenen aikana. Kulutus oli suurimmillaan 9 milj. tonnia kuivana vuonna

2003 ja pienimmillään sateisena vuonna 1999. Kuitenkin kulutuksen kehityssuunta on ollut laskeva. Lähes puolet kivihiilestä tuodaan Venäjältä, kun taas muut tuontimaat ovat Etelä-Afrikka, Indonesia, Kiina, Kolumbia, Puola ja Yhdysvallat. (Ranta et al. 2015B)

Suomessa vuonna 2013 kivihiilen käyttö oli 31,2 TWh (4,4 milj. tn), jossa lauhde 15,3 TWh, CHP 14,3 TWh, ja erilliset lämmöntuotannot 1,6 TWh. Mikäli torrefioidulla pelletillä voisi korvata puolet nykyisestä kivihiilen käytöstä CHP-tuotannossa, olisivat mahdolliset vuotuiset markkinat 7 TWh eli 1,2 miljoonaa tonnia. Kahdeksasta CHP-laitoksesta suurin, Helen (Helsingin Energia), voisi käyttää 0,5 miljoonaa tonnia torrefioituja pellettejä. Tämä korvaisi noin 40 % yhtiön nykyisen kivihiilen käytöstä. Vuonna 2014 kivihiilen käyttö oli pudonnut 26,9 TWh:iin (3,8 milj. tn) Suomessa. (Ranta et al. 2015B)

## **2.6 Torrefioidun pelletin tuotantokustannusanalyysi**

### *2.6.1 Tuotantokustannuksen lähtöarvot*

Tässä kappaleessa esitetyn kuvitteellisen torrefiointilaitoksen kustannuslaskenta perustui 50 000 tonnin vuotuiseseen kapasiteettiin. Torrefioidun pelletin valmistus- ja jakelukustannukset jaettiin kolmeen eri osioon: raaka-aine, torrefiointi ja pelletointi, sekä varastointi ja kuljetus voimalaitokselle. Torrefioinnin kiinteät kustannukset koostuvat investoinnista ja vuosihuolloista, ja muuttuvat kustannukset sähkön ja lämmön kulutuksesta, työmäärästä sekä tarvittavan sideaineen kulutuksesta. Laskennassa käytetyn laitoksen oletettiin olevan omavarainen, jossa biomassakattila käytti samaa raaka-ainepohjaa, jota käytettiin torrefiointiin. Hieno ja karkea puujae seuloitiin erilleen ja käytettiin lämmitykseen. Laitoksen sijainti määritteli raaka-aineen kuljetuskustannukset laitokselle sekä myös valmiin materiaalin kuljetuksen loppukäyttäjille. Laitoksen sijainti mahdollisti myös eri liikennemuotojen (maantie-, rautatie-, ja vesiväylien) käytön ja varastoinnin tarpeet tarjonnan ja kysynnän välillä. Tarkasteltu laitos sijaitsi sisämaassa ja potentiaalinen pellettiasiakas (rinnakkaispoltto

hiilen kanssa CHP-laitoksessa) sijaitti rannikolla. Kuljetukset perustuivat yhdistelmien maantiekuljetuksiin.

Kun torrefioitu biomassa oli pelletöity, niin pelletit siirrettiin kerralla bulkkitavaran maantiekuljetukseen, jolloin samalla vähentyi käsittelyn, pakkaamisen ja kulutustavaran käyttöaste laitoksessa. Varastoinnin aikana torrefioidut pelletit eivät saa olla alttiita kostumiselle ja ulkovarastointia taivasalla vältettiin. Tämän vuoksi varastointi ja koko toimitusketju perustui katettuun ratkaisuun. Lähtöarvot kustannuslaskelmiin on listattu taulukossa 5 ja ne perustuivat demonstroituun torrefiointiteknoologiaan sekä paikallisiin olosuhteisiin ja hintatasoihin. Koska kustannusparametreissa oli monia epävarmuustekijöitä, niin päätettiin suorittaa kustannusten herkkyysoanalyysi (raaka-ainehinta, investoinnit, huolto, sähkö, lämpö, työvoima, rahti). Kukin parametri vaihteli käyttäen väliä  $\pm(10-20-30)$  %. Lisäksi, torrefioidun pelletin energiasisältönä käytettiin tavoitearvoa 5,1 MWh/tn.

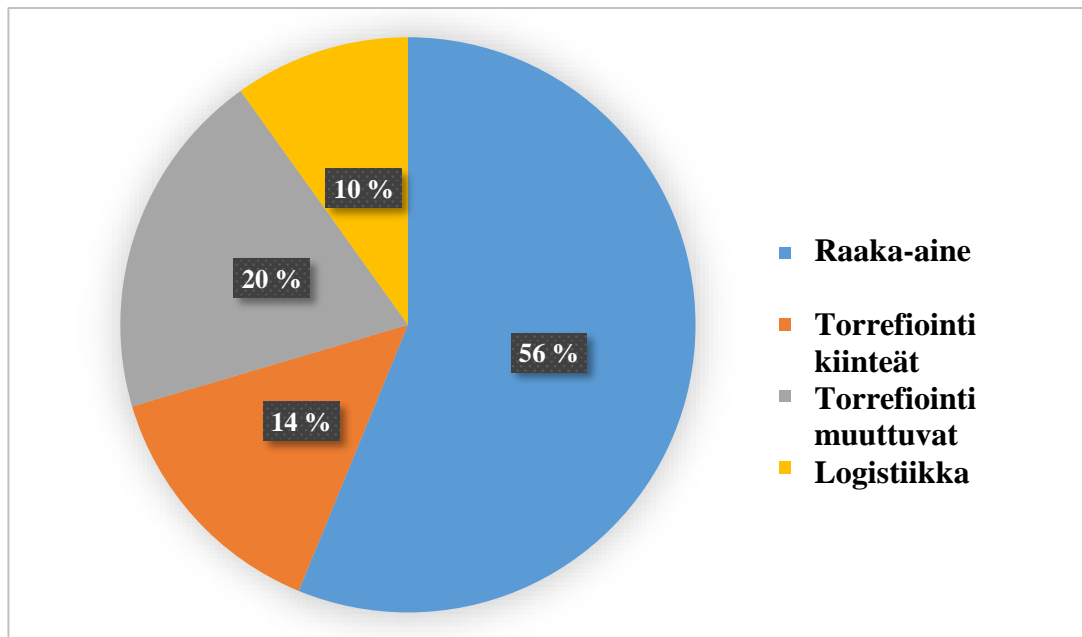
**Taulukko 5 Lähtöarvoja torrefioinnin kustannuslaskentaan.**

Raaka-aine	20 €/MWh
Raaka-ainekäyttö	90 %
Investointi	6,7 milj. €
Huolto	4 %
Sähkö	240 kWh/tn
Sähkön hinta	100 €/MWh
Lämpö	615 kWh/tn
Lämpökustannus	25 €/MWh
Työmäärä	8 henkilötyövuotta
Palkkakustannus	25 €/h
Rahti	20 €/tn

Tuotantokustannukset (€/MWh) määritettiin exel-laskentana, jossa kustannukset jaettiin aikaisemmin mainitulla tavalla raaka-ainekustannuksiin, kiinteisiin ja muuttuviin torrefiointikustannuksiin sekä rahtikustannuksiin. Annuiteettitekijä oli määritelty 20 käyttövuoden ja 10 % korkotason mukaisesti.

### 2.6.2 Torrefioitujen pellettien tuotantokustannukset

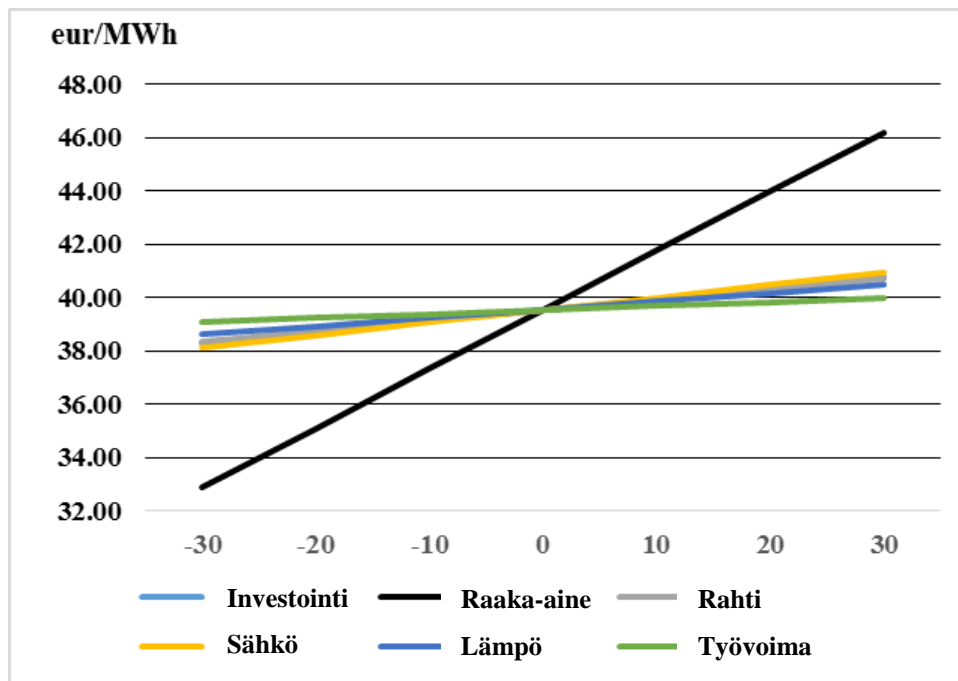
Raaka-aineen 56 % osuus oli hallitsevin kustannuskomponentti torrefioidun pelletin kustannusrakenteesta (kuva 11). Seuraavaksi tärkeimpiä kustannuskomponentteja olivat torrefiointin muuttuvat kustannukset 20 prosentin osuudella, torrefiointin kiinteät kustannukset 14 prosentin osuudella ja logistiikka 10 prosentin osuudella. Keskimääräinen kustannustaso oli 202 €/tn ja 39,5 €/MWh, kun energiasisältö oli 5,1 MWh/tn. Tämä hintataso oli huomattavasti korkeampi kuin verrattaessa nykyiseen hiilen hintaan, 25 €/MWh, joka on osana lämmöntuotantoa CHP-laitoksessa. Jos CO<sub>2</sub>-päästövähennyksen hinta olisi 20 €/tn nykyisen 7,5 €/tn sijasta, niin hiilen hinta nousisi 30 €/MWh:iin.



**Kuva 11** Torrefioitujen pellettien kustannusrakenne, %.

Kuvassa 12 on esitetty herkkyysanalyysi torrefioidun pelletin kustannusparametreista. Kukin kustannusparametri vaihteli välillä  $\pm(10-20-30)$  %. Herkkyysanalyysistä huomattiin, että raaka-aineen hinnalla oli suurin vaikutus kustannuskilpailukyville. Tällöin torrefioidun pelletin hinta vaihteli kuvaajan ääripäissä ( $\pm 30$  %) raaka-ainekustannuksien vuoksi jopa  $\pm 17$  %. Toisaalta kaikilla muilla

kustannusparametreilla oli vaikutusta pelletin hintaan vain  $\pm 3\%$  samoilla vaihteluilla. Raaka-aineen hintavaihteluilla pelletin kustannusalue oli välillä 32,9–46,2 €/MWh.



**Kuva 12** Kustannusparametrien herkkyyshanalyysi,  $Q_{\text{net}}=5,1$  MWh/tn.

Raaka-ainekustannus oli kaikkein ratkaisevin kustannusparametri herkkyyshanalyysissä. Svanberg et al. (2013) ovat tutkimuksissaan raportoineet alhaisempia tuotantokustannuksia, esim. 200 000 tn/a laitokselle kokonaistoimituskustannus oli ollut 32 €/MWh. Tuon kokoluokan laitoksessa suuri tuotantomäärä voi alentaa kustannustasoa. Tässä analyysissä olikin kyse yksinään toimivasta laitoksesta, jonka kokoluokka oli 50 000 tn/a. Korkean vuosikapasiteetin haittapuolena ovat kuitenkin nousevat raaka-ainekustannukset, sillä toimitusalue ja kuljetuskustannukset kasvavat. Hyvä tapa alentaa kustannustasoa on torrefiointin integroituminen metsäteollisuuden kanssa. Tällöin kustannushyödyt liittyvät sivutuotevirtojen hyödyntämiseen ja niiden käyttöön sahalaitoksen tai vaneritehtaan yhteydessä, kuten myös yleisen puunhankinnan yhteydessä metsäteollisuuslaitoksilla (Wilen et al. 2014). Torrefioitun pelletin tuotantokustannuksia arvioitiin SECTOR-hankkeessa, kun torrefiointia suoritettaisiin olemassa olevien laitoksien yhteydessä.



Hankkeessa määritettiin pelletin hinnaksi 34 €/MWh vanhemmalla sahalaitoksella, 38 €/MWh täysin uudella sahalaitoksella, 33 €/MWh modernilla sellutehtaalla ja 43 €/MWh täysin yksinään toimivalla torrefiointi- ja pelletöintilaitoksella. (Arpiainen & Wilen 2014).

### **3 KOEAJOT PILOTTILAITOKSELLE**

#### **3.1 Johdantoa koeajoihin**

Torrec Oy oli perustanut pilottikokoluokan laitoksen Pursialaan kesällä 2014 (Torrec 2015). Laitos piti sisällään koko tuotantoprosessin: kuivauksen, torrefiointin ja pelletöinnin. Laitoksen laskennallinen vuosikapasiteetti oli n. 2 200 tn. Tuotantoprosessi toimi kertapanosperiaatteella, jolloin kyseessä ei ollut jatkuvatoiminen laitos. Laitos kykeni tuottamaan riittäviä määriä valmista pellettiä erilaisiin laadun määrityskokeisiin, jotta pellettien soveltuvuus voimalaitoskäyttöön pystyttiin todentamaan. Koko tutkimushankkeen tavoitteena oli metsään perustuvan bioenergian tuotannon lisääminen ja tuontienergian korvaaminen kotimaisella. Samalla pyrittiin bioenergian jalostusasteen nostoon, alan yritysten liiketoiminnan kasvattamiseen Etelä-Savossa sekä Mikkelin seudun profiloitumiseen bioenergia-alalla.

Koeajot pilottilaitoksessa tukivat pyrkimystä löytää vaihtoehtoisia uusiutuvia polttoaineita fossiilisten polttoaineiden rinnalle. Biohiilipelletti on yksi vaihtoehto kivihiilen korvaamiseksi uusiutuvalla polttoaineilla. Normaalisti aikaisemmissa kotimaisissa tutkimushankkeissa testatut biohiilipelletit oli tuotettu ulkomailla ja määrät olivat olleet pieniä. Tutkimuksessa oli käytettävissä suurempi kotimaiseen raaka-ainepohjaan perustuva pellettimäärä erityyppisiä kenttäkokeita varten, jollaisia ei ole tähän mennessä pystytty toteuttamaan Suomessa. Biohiilipellettituotanto tarjoaisi merkittävän liiketoimintamahdollisuuden Etelä-Savon metsäenergia-alan arvoketjussa mukana oleville toimijoille. Koeajot toteutettiin yhdessä Lappeenrannan

teknillisen yliopiston bioenergiateknologian tutkimusryhmän ja Torrec Oy:n toimitusjohtaja Mikko Järvenpään kanssa. Mikkelin ammattikorkeakoulun (Mamk) energia- ja ympäristötekniikan laitos toteutti analysointipalvelut koeajojen pelleteille.

Tässä tutkimuksessa biohiilipelletit tuotettiin Torrec Oy:n pilottilaitoksessa, joka sijaitsi Itä-Suomessa, Mikkelissä. Pilottilaitos aloitti toimintansa elokuussa 2014. Tämän kokoluokan torrefioidun biohiilipelletin pilottilaitos tarjosi mahdollisuuden suorittaa käytännön testejä suuressa mittakaavassa ensi kertaa Suomessa, joiden raaka-aineena käytettiin paikallisia puueriä. Pilottilaitos oli avaintekijänä määrittäessä raaka-aineiden ja valmiiden pellettien laatutekijöitä. Laitoksen ansiosta oli mahdollista testata torrefiointiteknologiaa ja -prosesseja ennen suuremman mittaluokan laitoksen perustamista, tätä teknologiaa ei ole vielä kaupallistettu suuressa mittakaavassa. Itä-Suomeen Ristiinaan on kaavailtu perustettavaksi kaupallisen kokoluokan (200 000 tn/v) biohiilituotantolaitos, ja tällöin pilottilaitoksen tulokset ovat erityisen tärkeitä tukemaan suurempien päätöksien syntymistä (Nurminen 2012). Potentiaalisia asiakkaita ovat suomalaiset CHP-laitokset, jotka ovat korvaamassa hiilen käyttöä biohiilipelleteillä. (Ranta et al. 2015A).

Tutkimuksen päätarkoituksena oli määrittää torrefioidun pelletin ominaisuuksia, kun pellettiä valmistettiin eri puuraaka-aineista ja erilaisissa prosessiolosuhteissa. Kaikki pelletit valmistettiin ilman lisättyä sidonta-ainetta koeajojen aikana, mikä oli tutkimuksen pääteemana. Pelletöintiprosessissa käytettiin ainoastaan apuna lauhdevettä, jota oli tiivistynyt torrefiointiprosessin eri vaiheissa säiliön pohjalle. Valmistettujen pellettien laatuja vertailtiin keskenään, kun pellettejä oli valmistettu eri puuraaka-aineista, ja torrefiointilämpötila sekä -pitoaika vaihtelivat riippuen ajoparametreista. Tässä tapauksessa pellettien laatutekijöitä olivat: irtotiheys, kosteuspitoisuus, tuhkapitoisuus, pelletin pituus ja halkaisija, mekaaninen kestävyys, lämpöarvot ja energiatiheys. Lisäksi muitakin laatutekijöitä, kuten palakokojakauma, analysoitiin prosessissa käytettävistä kosteista puuhakkeista. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli saavuttaa täsmällistä laatutietoa torrefioiduista pelleteistä ja niiden raaka-aineena käytettävistä puuhakkeista.

## 3.2 Materiaalit ja menetelmät

### 3.2.1 Materiaalit

Pilottilaitos käytti raaka-aineenaan ainoastaan puuhaketta, joka oli käyttökelpoista torrefiointiprosessiin. Tutkimuksessa käytettiin kuutta eri puuhakemateriaalia, ja jokaisesta materiaalista tehtiin yksi koe-erä. Kolme koe-ajoa suoritettiin kuitupuukokoluokan puuerillä, jotka oli hakattu metsästä kahta kuukautta ennen koeajojen alkamista. Kyseiset puuerät olivat lehtipuun osalta koivu, ja havupuiden osalta kuusi ja mänty. Lappeenrannan teknillinen yliopisto osti ja toimitutti kuitupuuerät Järvi-Savon Metsänhoitoyhdistyksen välityksellä ja puut haketettiin Kotimaiset Energiat Oy:n toimesta tienvarsihaketuksena. Laitokselle toimitetut kuitupuuhakekasat on esitetty kuvassa 13. Neljäs puuerä oli sekalehtipuuta, joka oli tuotu Venäjältä hakkeena ja joka koostui lähinnä koivusta ja haavasta. Viimeisenä koeajoissa testattiin koivu- ja kuusiviiluhake-erät, jotka oli toimitettu vaneritehtailta Savonlinnasta ja Ristiinan Pellokselta. Torrec Oy hoiti näiden hake-erien hankinnat ja toimitukset pilottilaitokselle.



**Kuva 13** Kuitupuuhake-erät pilottilaitoksella.

Huomattiin, että hienojakeen (<3,15 mm) suuri osuus aiheutti ongelmia torrefiointiprosessille ennen koeajojen alkamista. Hienojake aiheutti kokeiluajoissa vaihtelevuutta pellettien laatuun ja sen vuoksi lämpöarvot ja muut arvot saattoivat pysyä alhaisina alustavissa mittauksissa. Metsänhoitoyhdistykseltä tilatuissa hakkeissa oli suuri hienoainespitoisuus, mikä saattoi johtua hakkurin tylsistä teristä. Jokainen puukuituerä päätettiin seuloa hienoaineesta ennen koeajojen alkamista, joka auttoi parantamaan pellettien laatua. Seulonta suoritettiin mobiilisella täryseulalla, Keestrack Combolla, joka oli avaintekijänä hyvälaatuisen pelletin aikaansaamiseksi tämän kokoluokan pilottilaitoksessa (kuva 14). Mobiiliseula oli hyvinkääläisen HN Yhtiöt Oy:n omistama laite (Keestrack Group 2015). Myös muut hakkeet oli seulottu lähtöpisteessä ennen niiden toimittamista pilottilaitokselle.



**Kuva 14 Hienoaineksen seulontaa Keestrack Combolla.**

Koeajoissa kaikki torrefioidut pelletit valmistettiin ilman lisättyä sideaineita, joista esimerkkinä voidaan mainita mäntyöljy. Lisäaineettomuus tarjosi huomattavan edun muihin vastaaviin tutkimuksiin (Kiel 2013) nähden, joissa on kohdattu ongelmia torrefioidun pelletin valmistuksessa. Pelletöintiprosessi vaatii kuitenkin aina jotain kostutusainetta pelletin tuottamiseksi. Nyt pelletöintiprosessi hyödynsi pelkästään torrefiointiprosessista muodostunutta lauhdevettä (kuva 15).



**Kuva 15** Torrefiointiprosessissa tiivistynyttä lauhdevettä.

### 3.2.2 Menetelmät

#### **Pilottilaitos**

Pilottilaitoksen torrefiointi- ja pelletöintiteknologian oli suunnitellut ja kehittänyt Torrec Oy:n perustajajenkilöt. Laitos sijaitsi Mikkeliissä, Itä-Suomessa, ja se aloitti toimintansa elokuussa 2014 (kuva 16). Tämä pilottikokoluokka sisälsi koko prosessin, mukaan lukien kuivauksen, torrefiointin ja pelletöinnin. Laitoksen nimelliskapasiteetti oli n. 2 200 tn/vuosi. Todellisuudessa laitoksen tuotos oli pienempi, mutta se kuitenkin mahdollisti logistiikan ja loppukäyttäjien käytännön testit tonnikokoluokan tuotuskapasiteetin ansiosta. Laitos oli teknologialtaan kertapanostyylinen tuotantolaitos, joten pellettiä valmistettiin eräkohtaisesti. Prosessiin syötettiin normaalisti n. 9–10 i-m<sup>3</sup> puuhaketta (n. >300 kg/i-m<sup>3</sup>) ja siitä valmistui n. 1,5–2,0 tn lopulta pelletiksi. Torrefiointiyksikön teknologia perustui vertikaaliseen reaktoriin, jossa hakkeet virtasivat painovoiman vaikutuksesta ilman kuljettimia. Reaktorin torrefiointilämpötila saatiin aikaiseksi höyryn välityksellä höyrypatterille ja tarpeellisella prosessin ohjauksella. Torrefiointiprosessi sai lämmitysvoimansa höyrystä, jota toimitettiin viereiseltä biomassaa käyttävältä CHP-laitokselta, Etelä-Savon Energia Oy:n Pursialan voimalaitokselta.

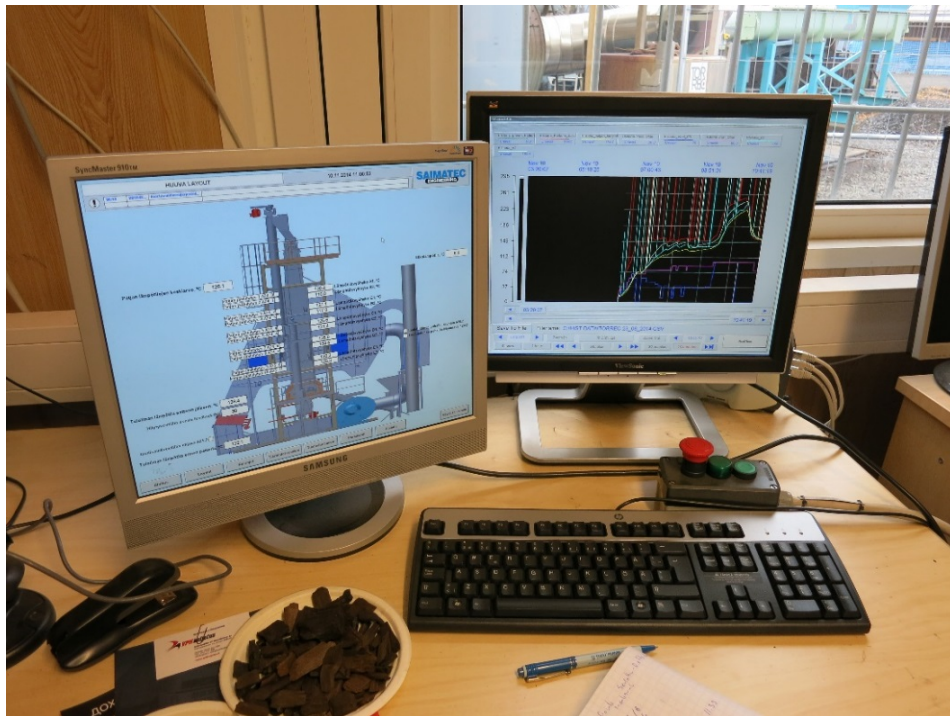




**Kuva 16** Pilottilaitos sijaitti Etelä-Savon Energian Pursialan voimalaitoksen yhteydessä Mikkelissä.

### **Prosessi**

Prosessin alussa puuhakkeet siirrettiin ruuvikuljettimella lastauspöydältä torrefiointiyksikköön (edellinen kuva 16). Kaikki torrefiointiprosessin vaiheet suoritettiin torrefiointiyksikössä: esikuivaus, jälkikuivaus, torrefiointi ja materiaalin jäähditys. Esikuivaus suoritettiin lämpötilavälillä 100 °C ja 200 °C, jonka vuoksi ei ollut tarvetta erilliselle kuivausyksikölle. Sen jälkeen varsinainen torrefiointivaihe suoritettiin välillä 240 °C ja 260 °C. Torrefiointiprosessia pystyttiin hallitsemaan ja säätämään tietokoneelta ohjelmistojen avulla (kuva 17). Puumassaa jouduttiin jäädyttämään syttymisriskin vuoksi ennen sen poisottamista reaktorista, sillä lämpötilat olivat todella korkeita. Lopullisesti puumassa jäähdytettiin oranssin värisessä välisiilossa ennen pelletöintiprosessin aloittamista. Jäähtymisen jälkeen prosessoitu puumassa kuljetettiin pelletöintihalliin (kuva 18) pelletöitäväksi, jossa puumassa murskattiin vasaramyllyllä ja kostutettiin hieman lauhdevedellä, jota saatiin edellisestä torrefiointivaiheesta. Pelletöinnin jälkeen valmiit pelletit pakattiin liikuteltaviin ja joustaviin suursäkkeihin.



**Kuva 17**      **Torrefiointiprosessia voitiin ohjailta tietokoneelta.**



**Kuva 18**      **Pelletöintihalli.**

Torrefiointireaktori oli täysin ilmatiivis prosessin aikana, jonka vuoksi reaktorissa oli hapeton olosuhde. Toisaalta, reaktorin luukut pystyi avaamaan huoltotoimenpiteitä varten reaktorin ollessa jäähtynyt. Vesisumua käytettiin reaktorissa kuumennusprosessien aikana, jotta sillä pystyttiin syrjäyttämään palamisessa tarvittavaa happea. Torrefioinnin jälkeen vesisumua myös käytettiin reaktorissa puumassan viilentämistä varten, aina n. 100 °C:een asti. Tämän prosessin jälkeen puumassa siirrettiin pelletöintiprosessiin, joka sisälsi syttymis- ja räjähdysriskin, joten myös tässä prosessissa hyödynnettiin vesisuihkua. Vesisuihku ehkäisi myös puun pölyämistä. Kaikki prosessit saivat käyttövoimansa sähköstä. Seuraava askel tälle kertapanosperiaatteella toimivalle pilottilaitokselle on jatkuvatoiminen laitos, joka on jo kaupallisen kokoluokan tuotantolaitos. Tällöin torrefiointiyksikköä laajennetaan erillisellä kuivausyksiköllä, jolloin kuivaus- ja torrefiointivaihe voidaan suorittaa erillään ja samanaikaisesti.

### Koeajot ja aikataulu

Kaikki koeajot suoritettiin touko- ja kesäkuun aikana 2015. Ainoastaan venäläinen sekalehtipuu-erä ajettiin aikaisemmin marraskuussa 2014. Laboratorioanalyysit saatiin lopullisesti päätökseen heinäkuussa 2015. Kaikki koeajojen tärkeimmät prosessiajat ja -lämpötilat torrefioinnin osalta on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6 Torrefioinnin prosessiajat ja -lämpötilat.**

Hake- materiaali	Kokonaisaika (h:min)	Reaktorin maksimilämpötila (°C)	Patjan maksimilämpötila (°C)
Sekalehtipuu	1:36	254	247
Koivu	1:36	259	250
Kuusi	2:08	249	240
Mänty	1:42	259	252
Kuusiviilu	1:51	255	246
Koivuviilu	2:13	257	250

Voidaan sanoa, että torrefiointiprosessi alkoi aina lämpötilasta 160 °C koeajojen aikana. Käytännössä torrefiointiaika oli aikaväli, jolloin höyryventtiili oli täysin auki ja kiinni. Erillisiä torrefiointiajoja suoritettiin yhdelle erälle aina kahdessa pätkässä,



kun kokonaistorrefiointiaika oli alle kaksi tuntia. Tätä suuremmat ajat olivat vaatineet kolme erillistä ajoa. Kaiken kaikkiaan torrefiointiajat olivat kestoiltaan pitkiä, koska panosmallinen prosessi vaati toistuvia metallisen reaktorirakenteen kuumentamisia, sillä rakenteet jäähtyivät nopeasti. Jatkuvatoimisessa prosessissa tätä ongelmaa ei tule olemaan ja kokonaisajat jäävät lyhyeksi. Reaktorin maksimilämpötilaa mitattiin lämpötilasensorilla, joka sijaitsi höyrypatterin ja hakepatjan välissä. Hakepatjan maksimilämpötilaa mitattiin patjan yläpinnalta.

### **Näytteenotto ja laboratorioanalyysit**

Näytteenotto suoritettiin täysin samoin tavoin sekä kostealle puuhakkeelle että valmiille torrefioidulle pelletille. Näytteenotto noudatti yleisiä standardeja: SFS-EN 14778 ”Näytteenotto” ja SFS-EN 14780 ”Näytteen esikäsittely”. Kaikki näytteet kerättiin kannellisiin muovikäpäläihin jokaisesta erästä koeajojen aikana. Ämpäreitä säilytettiin Mamkin kylmähuoneessa (5 °C) ennen niiden laboratorioanalyysijä.

Jokaisesta näyttemateriaalista analysoitiin Mamk:in laboratoriossa palakokojakauma, irtotiheys, kosteuspitoisuus, tuhkapitoisuus, pelletin pituus ja halkaisija, mekaaninen kestävyys, lämpöarvot ja energiatiheys. Kuitenkaan kaikkia edellä mainittuja analyysijä ei suoritettu jokaiselle testattavalle materiaalille johtuen materiaalin ja analyysin välisestä sopivuudesta. Materiaalit analysoitiin seuraavien kiinteiden biopolttainestandardien mukaisesti:

- SFS-EN 15149-1 ”Palakokojakauman määrittäminen”
- SFS-EN 15103 ”Irtotiheyden määrittäminen”
- SFS-EN 14774-2 ”Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä”
- SFS-EN 14775 ”Tuhkapitoisuuden määrittäminen”
- SFS-EN 16127 ”Pelletin pituuden ja halkaisijan määrittäminen”
- SFS-EN 15210-1 ”Pellettien ja brikettien mekaanisen kestävyuden määrittäminen”
- Lämpöarvot (ISO 1716) energiatiheys olivat laskennallisia arvoja (Alakangas 2014B).

### 3.3 Tulokset

#### 3.3.1 Puuhakkeet

Kuitupuuhakkeiden hienoaineksen osuus, F20–F25, oli melko suuri ennen niiden mobiiliseulontaa. Seulonnan jälkeen hienoaineksen osuus laski tasolle F5–F10 (taulukko 7). Myös toisien hake-erien hienoaineksen osuus oli pieni ollen F5–F15. Kaikkien hake-erien pääfraktio määritettiin luokkaan P16, joka tarkoitti hakkeiden kokoluokan kuuluvan välille  $3,15 < P \leq 16$ .

**Taulukko 7 Puuhakkeiden palakokojakauma.**

Hake- materiaali	Hienoaines	Pääfraktio	Karkea fraktio	Jakauman mediaani (mm)	Pisin kappale (mm)
Sekalehtipuu	F15	P16	-	5,3	80
Koivu	F10	P16	-	6,3	70
Kuusi	F5	P16	P16	7,1	60
Mänty	F10	P16	-	5,5	80
Kuusiviilu	F5	P16	P16	7,6	220
Koivuviilu	F5	P16	P16	10,3	210

Puuhakkeiden mittaustulokset on esitetty taulukossa 8. Valitettavasti tutkimukseen ei keretty saamaan tarvittavia mittaustuloksia sekalehtipuuhakkeesta edelliseltä vuodelta, koska tutkimushanke ei ollut vielä alkanut, kun tämä ensimmäinen hakemateriaali koeajettiin Torrecin toimesta. Nyt kaikkien koeajojen jälkeen kostea sekalehtipuuhake olisi ollut liian vanhaa analysointeja varten. Taulukosta 8 käy selville, että erityisesti havupuuhakkeiden kosteuspitoisuudet olivat korkeat. Kuusi- ja koivuviiluhakkeiden tuhkapitoisuudet olivat alhaisia, koska ne eivät sisältäneet yhtään kuorta. Molempien koivuhakemateriaalien teholliset lämpöarvot ( $Q_{\text{net,d}}$ ) olivat korkeimmat. Samoin niiden teholliset lämpöarvot saapumistilassa ( $Q_{\text{net,ar}}$ ) ja energiatiheydet saapumistilassa ( $E_{\text{ar}}$ ) olivat korkeimmat.

**Taulukko 8 Puuhakkeiden mittaustulokset.**

Hake- materiaali	Kosteus- pitoisuus (m-%)	Irtotiheys (kg/i-m <sup>3</sup> )	Tuhka- pitoisuus (m-%)	Q <sub>net,d</sub> (MJ/kg)	Q <sub>net,ar</sub> (MJ/kg)	E <sub>ar</sub> (MWh/i-m <sup>3</sup> )
Sekalehtipuu						
Koivu	42,7	312	1,53	19,84	10,33	0,89
Kuusi	51,3	310	1,79	18,77	7,89	0,68
Mänty	60,5	371	1,37	18,54	5,84	0,60
Kuusiviilu	57,4	348	0,29	18,87	6,65	0,64
Koivuviilu	45,9	322	0,45	18,91	9,10	0,81

### 3.3.2 Torrefioidut pelletit

Valmistettujen torrefioitujen pellettien mittaustulokset pituudesta, halkaisijasta, hienoaineksen osuudesta ja mekaanisesta kestävyydestä on esitetty taulukossa 9. Taulukosta 9 huomataan, että lehtipuusta valmistettujen pellettien keskiarvopituus oli suurin. Lehtipuuta olivat sekalehtipuuera ja molemmat koivuerät. Pellettiyksikön seula oli halkaisijaltaan 8 mm, joten keskimäärin kaikki pelletit olivat halkaisijaltaan lähellä tuota arvoa. Mäntyhakkeesta ja kuusiviiluhakkeesta tehtyjen pellettien hienoainesosuudet olivat suurimmat, ollen enemmän kuin 0,8 m-%. Myös näiden pellettien mekaaninen kestävyys oli huonoin, ollen vähemmän kuin 92,6 m-%. Torrefioitujen pellettierien visuaaliset eroavaisuudet on esitetty kuvassa 19.

**Taulukko 9 Torrefioitujen pellettien mittaustulokset pituudesta, halkaisijasta, hienoaineksen osuudesta ja mekaanisesta kestävyydestä.**

Hake- materiaali	Pituus (mm)	Halkaisija (mm)	Hienoaines (m-%)	Mekaaninen kestävyys (m-%)
Sekalehtipuu	17,06	7,99	0,16	96,6
Koivu	10,79	7,95	0,57	97,4
Kuusi	10,33	7,99	0,10	96,8
Mänty	9,07	7,93	0,85	91,8
Kuusiviilu	7,97	7,99	0,81	92,6
Koivuviilu	13,11	8,08	0,24	96,8



**Kuva 19** Torrefioitujen pellettien visuaaliset eroavaisuudet.

Torrefioitujen pellettien mittaustulokset laatutekijöiden osalta on esitetty taulukossa 10. Kyseisestä taulukosta huomataan, että pellettien kosteuspitoisuus vaihteli eräkohtaisesti välillä 4,4–8,6 m-%. Kaikkien pellettierien irtotiheys oli lähellä 700 kg/i-m<sup>3</sup>. Kuusiviilusta valmistettu pelletti omasi pienimmän irtotiheyden 649 kg/i-m<sup>3</sup>. Kuusi- ja koivuviilusta valmistettujen pellettien tuhkapitoisuus oli alhainen, aivan kuten edellisten hakemateriaalierien kohdalla, koska ne eivät sisältäneet kuorta. Kuusiviilupelletin tehollinen lämpöarvo 20,53 MJ/kg oli korkein, mutta pelletin korkein kosteuspitoisuus (8,6 m-%) laski sen tehollista lämpöarvoa saapumistilassa jonkin verran, aina arvoon 18,56 MJ/kg. Vielä, kun huomioidaan kuusiviilupelletin alhaisin irtotiheys, niin sen energiatiheys saapumistilassa (3,34 MWh/i-m<sup>3</sup>) oli huonoin kaikista pelleteistä. Sekalehtipuusta ja koivuviilusta tehdyillä pelleteillä oli parhaimmat energiatiheydet saapumistilassa, ollen enemmän kuin 3,6 MWh/i-m<sup>3</sup>.

**Taulukko 10 Torrefioitujen pellettien mittaustulokset laatutekijöiden osalta.**

Hake- materiaali	Kosteus- pitoisuus (m-%)	Irtotiheys (kg/i-m <sup>3</sup> )	Tuhka- pitoisuus (m-%)	Qnet,d (MJ/kg)	Qnet,ar (MJ/kg)	E <sub>ar</sub> (MWh/i-m <sup>3</sup> )
Sekalehtipuu	6,57	704	1,31	19,91	18,44	3,61
Koivu	6,40	678	1,23	19,37	17,96	3,38
Kuusi	4,40	699	1,43	18,47	17,53	3,40
Mänty	6,80	682	1,30	19,96	18,43	3,49
Kuusiviilu	8,60	649	0,87	20,53	18,56	3,34
Koivuviilu	4,98	699	1,16	19,88	18,77	3,64

### 3.4 Johtopäätökset koeajoista

Tutkimuksen päätarkoituksena oli analysoida torrefioitujen pellettien laatuominaisuuksia. Pelletit oli valmistettu eri puuhakemateriaaleista. Kaikki pellettierät valmistettiin myös ilman erillisiä sidonta-aineita. Ainoastaan torrefiointiprosessissa syntynyttä lauhdevettä lisättiin pelletteihin pelletöintivaiheessa. Tässä tutkimuksessa torrefiointi ja pelletöinti suoritettiin Torrec Oy:n perustamassa pilottilaitoksessa, joka sijaitsi Mikkeliissä, Itä-Suomessa. Laitos oli periaatteeltaan kertapanostyylinen laitos, jossa torrefioitua pellettiä valmistettiin eräkohtaisesti ainoastaan puuhakemateriaalista. Koeajot suoritettiin kuudelle eri raaka-ainemateriaalille hieman vaihtelevilla ajoparametreilla. Tutkimuksen suurin mielenkiinto kohdistui torrefioitujen pellettien laatuun, kun ne valmistettiin ilman erillisiä lisäsidonta-aineita. Valmistuneiden pellettien ja niihin käytettyjen hakeraaka-aineiden laatutekijät määritettiin jokaisen koeajon yhteydessä.

Tutkimukset aikaisemmilta vuosilta (Kiel 2013, Wolfgang 2012) olivat osoittaneet suurempia energiasisältöjä valmistetuille torrefioituille pelleteille kuin mitä näissä koeajoissa analysoitiin pellettieristä. Kiel oli omista tutkimuksissaan määrittänyt pelleteille 1–5 m-% kosteuspitoisuuksia ja 18–24 MJ/kg lämpöarvoja saapumistilassa. Näissä koeajoissa vastaavat arvot olivat kosteuspitoisuudelle 4,4–8,6 m-% ja lämpöarvolle saapumistilassa 17,5–18,8 MJ/kg. Torrefiointiprosessin päävaihe suoritettiin lämpötila-alueella 240–260 °C. Tuo lämpötila oli ehkä liian

alhainen tuottamaan täysin huippulaatuista pellettiä. Läheiseltä CHP-laitokselta toimitettu höyry rajoitti torrefioidun maksimilämpötilan juuri tuolle lämpötila-alueelle. Lisäksi pellettien alhainen energiasisältö saattoi johtua suuremmasta kosteuspitoisuudesta, sillä materiaalia kostutettiin torrefiointiprosessista saatavalla lauhdevedellä pelletöinnin aikana.

Torrefiointiprosessin alussa raaka-aineena käytettyjen hakkeiden lämpöarvot saapumistilassa olivat välillä 5,8–10,3 MJ/kg, joten niistä valmistettujen pellettien energiasisällöt saavuttivat huiman parannuksen. Kaikki puuhake-erät luokiteltiin pääfraktion mukaisesti luokkaan P16. Myös hienoaineksen osuus oli pieni, ollen välillä F5–F15 erillisen mobiiliseulonnan jälkeen. Hienoaineksen pieni osuus oli tärkeä tekijä hyvälaatuisen torrefioidun pelletin aikaansaamiseksi tämän kokoluokan pilottilaitoksessa. Muutoin suuri hienoainemäärä olisi voinut aiheuttaa tukkeutumia hakepatjaan ja aiheuttaa vaihtelevaa laatua valmistettaville pelleteille. Laatuasia ei tule olemaan ongelma jatkuvatoimisessa laitoksessa, jossa kaikki hienoaines seulotaan ja poltetaan prosessin aikana.

Lehtipuusta valmistettujen pellettien keskimääräiset pituudet olivat suurimmat. Pellettien, joiden raaka-aineena käytettiin sekalehtipuuta ja koivuviilua, omasivat suurimmat irto- ja energiatiheydet, ollen yli 3,6 MWh/i-m<sup>3</sup>. Energiatiheys on paras numeerinen arvo, joka kuvaa parhaiten pellettien energialaatuja. Joten voidaan päätellä, että lehtipuu oli paras puuraaka-aine tuottamaan hyvälaatuista pellettiä tässä pilottilaitoksessa. Kaikki torrefioidut pelletit valmistettiin ilman lisättyjä sidonta-aineita, kuten mäntyöljyä. Tämä tarjoaa erikoishyödyn lisäkustannusten ehkäisemiseksi tulevaisuudessa, jolloin erillisiä sidonta-aineita ei tarvitsisi lisätä prosessin aikana. Torrefiointiprosessista saatava lauhdevesi oli ainoa nesteytysaine pelletöintiprosessin avuksi, joten periaatteessa pilottilaitos oli suljettu kiertosysteemi. Tutkimuksen perusteella pelletöintiprosessi ei tule tarvitsemaan lisäsidonta-aineita tulevaisuudessa. Ainoastaan havupuuraaka-aineesta tehtyjen pellettien mekaaninen kestävyys oli heikko, ollen vähemmän kuin 92,6 m-%. Tällöin havupuumateriaalit eivät saavuttaneet edes toivottua minimivaatimusta ( $\geq 95$  m-%) tulevan standardin EN

ISO 17225-8 osalta, jossa on määritetty laatuvaatimuksia torrefioidulle pelletille. Havupuusta valmistettaviin pelletteihin olisi kuitenkin hyvä lisätä sidonta-aineita sen kestävyuden lisäämiseksi. Muutoin tutkimuksen pellettierät saavuttivat kaikki muut laatuvaatimukset edellä mainitusta standardista.

Torrefioidun pelletin valmistusta ilman lisäsidonta-aineita tulisi tutkia enemmän oppiaksemme uusia näkökulmia pelletöinnin vaikeudesta ja pelletin kestävyydestä pitkällä aikavälillä. Mietittäessä sopivia testiajoja tulevaisuudessa, niin pienimuotoiset laboratorioajot pienellä reaktorilla voisivat olla kokoluokaltaan sopivampia, kun tutkittaisiin torrefioidun pelletin valmistamisen hyötyjä ilman sidonta-aineita. Tällä menettelyllä tutkimus saavuttaisi sekä useita toistokertoja että lisäluotettavuutta. Tämän tutkimuksen heikkoutena oli koeajojen toistettavuuden lukumäärä, jota oli mahdotonta lisätä tutkimuksen suuren kokoluokan vuoksi. Tutkimuksen koejärjestelyjä oli hankala toteuttaa, ja ne olivat aikaa vieviä sekä kalliita. Lisäksi koeajoja olisi ollut hyvä suorittaa korkeammilla prosessilämpötiloilla. Nyt torrefioinnin maksimilämpötila oli vain välillä 240–260 °C johtuen CHP-laitoksen höyrykapasiteetista.

#### **4 LOPPUPÄÄTELMÄT**

Hankkeen pitkän tähtäimen tavoitteena oli metsään perustuvan bioenergiatuotannon lisääminen ja tuontienergian korvaaminen kotimaisella polttoaineella. Lisäksi tavoiteltiin bioenergian jalostusasteen nostoa, alan yritysten liiketoiminnan kasvattamista Etelä-Savossa sekä Mikkelin seudun profiloitumista tunnetuksi toimijaksi bioenergia-alan kansainvälisesti kasvavissa markkinoissa. Tutkimushanke tuki pyrkimystä löytää vaihtoehtoisia uusiutuvia polttoaineita fossiilisten polttoaineiden rinnalle.

Kirjallisuustutkimuksessa käsiteltiin torrefiointiteknologiaa ja –prosesseja, pelletöintiä, biohiilen markkinoita Suomessa ja ulkomailla sekä torrefioidun pelletin

tuotantokustannusanalyysiä esimerkkilaitoksen suhteen. Käytännön kokeellisessa osiossa suoritettiin koeajoja eri puuhakemateriaaleilla ja valmistettuja pellettejä arvioitiin laatutekijöiden kannalta. Tutkimushankkeen päätarkoituksena oli tutkia torrefioidun biohiilipelletin laatuominaisuuksia puulajikohtaisesti koeajojen yhteydessä ja todeta niiden laatuominaisuus polttoaineena. Kaikki pelletit valmistettiin ilman lisättyä sidonta-ainetta koeajojen aikana, mikä oli tutkimuksen pääteemana. Pelletöintiprosessissa käytettiin ainoastaan apuna lauhdevettä, jota oli tiivistynyt torrefiointivaiheessa säiliön pohjalle.

Torrefioinnilla tarkoitetaan matalassa lämpötilassa (200–300 °C) ja hapettomissa olosuhteissa tapahtuvaa biomassan termokemiallista käsittelyä. Käsittelyn tavoitteena on, että biomassan lämpöarvo eli energiasisältö painoyksikköä kohden kasvaa. Torrefiointiprosessi kasvattaa energiasisältöä tyypillisestä arvosta 10–17 MJ/kg arvoon 19–22 MJ/kg. Biomassan torrefiointi on näinä vuosina vasta alkamassa maailmalla ja torrefiointiteknologian kaupallistaminen on edelleen Euroopassa kehitysvaiheessa. Kuitenkin biohiilipelletin merkittävimmät käyttökohteet sijaitsevat Euroopassa, jossa jalostettua tuotetta käytetään kivihiilivoimaloiden lisäpolttoaineena. Tästä syystä johtuen ensimmäiset demonstraatio- ja tuotantolaitokset löytyvät Keski-Euroopasta, lähinnä Hollannista, Belgiasta ja Itävallasta. Suomessa biohiilipelletti ei ole vielä kannattava etenkin sähköntuotannon polttoaineena, jossa kivihiili on halvin polttoaine tällä hetkellä. Biohiileen tarvittava taloudellinen panostus on täysin riippuvainen markkinoiden hiilen hinnasta, päästöoikeuden hinnasta, polttoaineveroista ja muiden mahdollisten kannustimien, kuten syöttötariffien tai tuotantotukien hinnoista. Tukijärjestelmää biohiilelle ei ole vielä hiilivoimaloissa, koska biohiiltä ei ole ollut Suomessa markkinoilla tähän asti.

Kirjallisuustutkimuksessa esitetyn kuvitteellisen torrefiointilaitoksen kustannuslaskenta perustui vuotuisen 50 000 tonnin kapasiteettiin. Laskennallisen laitoksen oletettiin olevan omavarainen, jossa biomassakattila käytti samaa raaka-ainepohjaa, jota käytettiin torrefiointiin. Raaka-aineen 56 % osuus oli hallitsevin



kustannuskomponentti torrefioidun pelletin kustannusrakenteesta. Seuraavana tulivat torrefioinnin muuttuvat kustannukset 20 prosentin osuudella, torrefioinnin kiinteät kustannukset 14 prosentin osuudella ja logistiikka 10 prosentin osuudella. Keskimääräinen kustannustaso oli 202 €/tn ja 39,5 €/MWh, kun energiasisältö oli 5,1 MWh/tn. Herkkyysanalyysistä huomattiin, että raaka-aineen hinnalla oli suurin vaikutus kustannuskilpailukyvyille. Torrefioidun pelletin hinta vaihteli raaka-ainekustannuksien vuoksi jopa  $\pm 17$  %. Toisaalta kaikilla muilla kustannusparametreilla oli vaikutusta pelletin hintaan vain  $\pm 3$  % samoilla kustannusvaihteluilla. Tulokset osoittavat, että biohiilipelletillä on mahdollisuudet suurimittakaavaiseen energiantuotantoon, kunhan sen käyttäminen tulee edullisemmaksi laitoksissa. Tähän toisaalta vaaditaan tukimekanismeja valtion puolelta.

Hankkeen tutkimuksessa tuotetut biohiilipelletit valmistettiin Torrec Oy:n pilottilaitoksessa, joka sijaitsi Mikkelissä. Tämän kokoluokan torrefioidun biohiilipelletin pilottilaitos tarjosi mahdollisuuden suorittaa käytännön testejä suuressa mittakaavassa ensi kertaa Suomessa, joiden raaka-aineena käytettiin paikallisia puueriä. Näissä koeajoissa ei päästy pelleteillä energiasisältöjen osalta aivan vastaaviin arvoihin, joita oli kirjallisuudessa aiemmin ilmoitettu. Koe-erissä olevien pellettien lämpöarvo saapumistilassa vaihteli välillä 17,5–18,8 MJ/kg ja kirjallisuuden pelleteillä vastaavasti 18–24 MJ/kg. Tämä johtui pilottilaitoksen saatavilla olevasta höyrystä, joka mahdollisti torrefiointilämpötilan vain välille 240–259 °C. Suurempi prosessilämpötila olisi nostanut myös lopputuotteen lämpöarvoa.

Lehtipuusta valmistettujen pellettien keskimääräiset pituudet olivat suurimmat. Lisäksi pellettien, joiden raaka-aineena käytettiin sekapuuta (havu- ja lehtipuu) ja koivuviilua, omasivat suurimmat irto- ja energiatiheddet, ollen yli 3,6 MWh/i-m<sup>3</sup>. Lehtipuu olikin puuraaka-aineena parasta tuottamaan hyvälaatuista pellettiä tässä pilottilaitoksessa. Kaikki torrefioidut pelletit valmistettiin ilman lisättyjä sidonta-aineita. Jatkossa tämä tarjoaa lisähyödyn kustannusten pienentämiseksi tulevaisuudessa. Torrefiointiprosessista saatava lauhdevesi oli ainoa nesteytysaine

pelletöintiprosessin tueksi. Tutkimuksen perusteella pelletöintiprosessi ei tule tarvitsemaan ulkopuolisia lisäsidonta-aineita tulevaisuudessa.

Pilottilaitos oli avainasemassa käytännön tietotaidon saavuttamiseksi torrefiointi- ja pelletöintiprosesseista. Lisäksi pienet ongelmat, jotka esiintyivät prosesseissa koeajojen aikana, pystytään korjaamaan, kun seuraava askel otetaan kohti jatkuvatoimista laitosta. Panosajaisen reaktorin huonoin ominaisuus on se, että prosessiajat pitenevät, kun jokaisessa koeajossa joudutaan lämmittämään myös useita tonneja terästä. Jatkuvatoiminen reaktori on seuraava askel tutkimuslähtöisestä pilottilaitoksesta kohti kaupallisen kokoluokan laitosta. Samaan aikaan pystytään parantamaan kaavoja huippulaatuisen torrefioidun pelletin valmistamiseksi. Paras energiasisältöinen pelletti saadaan aikaiseksi, kun puuhaketta torrefioidaan lähellä 300 °C:n lämpötilaa prosessin alkuvaiheessa. Silloin valmistettava pelletti saavuttaa korkean lämpöarvon saapumistilassa, kuten myös alhaisen kosteuspitoisuuden. Lisäksi pelletillä pitää olla korkea irtotiheys, jolloin sillä on myös korkea energiatiheys. Torrefioidun pelletin raaka-aineeksi kelpaavat loistavasti vähempiarvoiset lehtipuut sekä kaikenlainen karsittu energiapuuraaka-aine.

## LÄHTEET

- Acharya, B., Sule, I. & Dutta, A. 2012. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. [Viitattu 29.06.2015].  
Saatavissa: <http://link.springer.com.ezproxy.cc.lut.fi/article/10.1007/s13399-012-0058-y>.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT. Research Notes 2045, 172 s..  
Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>.
- Alakangas, E. 2014A. Graded thermally and densified biomass fuels Development of the ISO 17225-8 standard. Deliverable No. D8.3. SECTOR-project. 17 s..  
Saatavissa: [https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/deliverables/SECTOR\\_Deliverable\\_8\\_3\\_VTT\\_final\\_August2014.pdf](https://sector-project.eu/fileadmin/downloads/deliverables/SECTOR_Deliverable_8_3_VTT_final_August2014.pdf).
- Alakangas, E. 2014B. Puupolttoaineiden laatuohje VTT-M-07608-13 – päivitys 2014. VTT. 65 s..  
Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/paivitetty\\_puunpolttoaineidenlaatuohje2014\\_lisays\\_0.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/paivitetty_puunpolttoaineidenlaatuohje2014_lisays_0.pdf).
- Arpiainen, V. & Wilen, C. 2014. Report on optimisation opportunities by integrating torrefaction into existing industries. Deliverable No. D3.2.
- BalBiC 2015. Mitä biohiili on. [Viitattu 10.8.2015].  
Saatavissa: [http://www.balbic.eu/fi/mita\\_biohiili\\_on/fi\\_FI/mita\\_biohiili\\_on/](http://www.balbic.eu/fi/mita_biohiili_on/fi_FI/mita_biohiili_on/).
- Bergman, P. & Kiel, J. 2005. Torrefaction for biomass upgrading. 14th European Biomass Conference & Exhibition. Pariisi, Ranska. 17 – 21 lokakuuta. [viitattu: 22.6.2015]. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf>.
- Bergman, P., Boersma, A., Zwart, R. & Kiel, J. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. "Biocoal". [Viitattu 14.09.2015].  
Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05013.pdf>.
- Bioenergia ry. 2013. Pelletin tuotanto. Bioenergia ry:n Pellettienergia-sivusto. [Viitattu 08.06.2015].  
Saatavissa: <http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20tuotanto>.
- Biohiili korvaamaan lähivuosina kivihiiltä. 2012. [Viitattu 31.8.2015].  
Saatavissa: <http://www.miktech.fi/ajankohtaista?issue=114>.

Biosaimaa. 2015. [Viitattu 31.8.2015].

Saatavissa: <http://biosaimaa.fi/yleinen/biosaimaan-jasenyritys-torrec-oy-on-solminut-sopimuksen-biohiilipellettien-tuotantolaitoksen-toimittamisesta>.

Clark, J. & Deswarte, F. 2015. Chemicals from Biomass. United Kindom John Wiley & Sons Ltd, s. 74-78.

Flyktman, M., Kärki, J., Hurskainen, M., Helynen, S., & Sipilä, K. 2011. Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa. VTT Technical Research Centre of Finland, 29 s.. ISBN 978-951-38-7779-8.

Saatavissa: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>.

Forest Energy 2020. Hiili vihertää – puusta paahdettu biohiili saattaisi korvata jopa puolet nykyisin käytettävästä kivihiilestä.[Viitattu 31.8.2015].

Saatavissa: <http://www.forestenergy2020.org/fi/uutiskirjeet/uutiskirje-1-13/biohiili/:icmsmode/clear>.

Hajoitetut biojalostamot. Eri polttoaineiden ominaisuuksia, taulukko. Itä-Suomen yliopisto. [Viitattu 17.8.2015].

Saatavissa: [https://www2.uef.fi/documents/1348766/1348771/KaasutuksenInfotaulut\\_3.pdf/af85a69f-87ed-44c5-a8d0-4cb3e39c04c2](https://www2.uef.fi/documents/1348766/1348771/KaasutuksenInfotaulut_3.pdf/af85a69f-87ed-44c5-a8d0-4cb3e39c04c2).

Hiilineutraali tulevaisuus. 2015. [Viitattu 05.10.2015].

Saatavissa: <https://www.helen.fi/kotitalouksille/neuvoa-jatietoa/vastuullisuus/hiilineutraali-tulevaisuus/>.

Jantunen, P. 2015. Heleniltä uusi hajautettu malli hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Blogi. [ Viitattu 31.8.2015].

Saatavissa: <http://blogi.helen.fi/helenilta-uusi-hajautettu-malli-hiilidioksidipaastojen-vahentamiseen/>.

Keestrack Group. Combo. Esite. Belgia. PDF-tiedosto, viitattu 29.9.2015.

Saatavissa: <http://www.keestrack.com/uploads/Brochure%20Download/Combo.pdf>.

Khodayari, R. 2012. Vattenfall strategy and experiences on co-firing of biomass and coal. [Viitattu 05.10.2015].

Saatavissa: [http://www.ieabcc.nl/workshops/task32\\_2012\\_Copenhagen/Khodayari.pdf](http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_2012_Copenhagen/Khodayari.pdf).

Kiel, J. 2013. Torrefaction – Product Quality Optimization in View of Logistics and End-use. ECN. World Biomass Power Markets. Amsterdam. Hollanti. 17. Toukokuuta. 23 s..

Saatavissa: <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2013/113028.pdf>.

- Kleinschmidt, C. 2011. KEMA. Overview of international developments in torrefaction. Central European Biomass Conference 2011. [Viitattu 29.06.2015]. Saatavissa: <http://www.bioenergytrade.org/downloads/grazkleinschmidt2011.pdf>.
- Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S. & Madrali, S. 2012. Status overview of torrefaction technologies. [Viitattu 05.10.2015]. Saatavissa: [http://www.ieabcc.nl/publications/IEA\\_Bioenergy\\_T32\\_Torrefaction\\_review.pdf](http://www.ieabcc.nl/publications/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_review.pdf).
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology, Vol. 83, s. 37 – 46. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.
- Nurminen F. 2012. Environmental Impacts of Torrefied Wood Pellet Production. Miktech Oy. 73 s.. Saatavissa: <http://www.miktech.fi/media/getfile.php?file=271>.
- Pöyry Management Consulting. 2013. Is biocoal a bioenergy game changer? [Viitattu 24.8.2015]. Saatavissa: [http://www.poyry.com/sites/default/files/imce/files/is\\_biocoal\\_a\\_bioenergy\\_game\\_changer\\_small.pdf](http://www.poyry.com/sites/default/files/imce/files/is_biocoal_a_bioenergy_game_changer_small.pdf).
- Ranta, T., Föhr, J. & Soininen, H. 2015A. Demonstration of Handling and Logistics of Torrefied Pellets, 23rd European Biomass Conference & Exhibition, 1 – 4 kesäkuuta, Wien, Itävalta.
- Ranta, T., Föhr, J. & Soininen, H. 2015B. Evaluation of a pilot-scale wood torrefaction plant based on pellet properties and Finnish market economics. Käsikirjoitus tiedelehteen: International Journal of Energy and Environment. 10 s.
- Sector - The Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of Torrefaction. [Viitattu 05.10.2015]. Saatavissa: <https://sector-project.eu/>.
- Sonninen, H. Biohiilipelletti. Torrec Oy. [Viitattu 31.8.2015]. Saatavissa: [http://www.punkalaidun.fi/punkalaidun\\_netli/liitetiedostot/editori\\_materiaali/17952.pdf](http://www.punkalaidun.fi/punkalaidun_netli/liitetiedostot/editori_materiaali/17952.pdf).
- Strezov, V. & Evans, T. 2015. Biomass Processing Technologies. Boca Raton CRC Press Taylor & Francis group, s. 125-126.
- Svanberg, M. et al. 2013. Analysing biomass torrefaction supply chain costs. Bioresource Technology. Vol. 142, s. 287–296.

Topell Energy BV. [ Viitattu 31.8.2015]. Saatavissa: <http://www.topellenergy.com/>.

Torrec Oy.. Yrityksen kotisivu. Suomi. Viitattu 29.9.2015.

Saatavissa: <http://www.torrec.fi/index.php/en/>.

Van der Stelt, M., Gerhauser, H., Kiel, J. & Ptasinski, K. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels. [Viitattu 22.06.2015].

Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411003473>.

Vanninen, M. 2009. Tyypillisten biomassamateriaalien kemiallinen koostumus.

Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Pro gradu.

Saatavissa: [https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/21265/URN\\_NBN\\_fi\\_jyu-200906261753.pdf?sequence=1](https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/21265/URN_NBN_fi_jyu-200906261753.pdf?sequence=1).

Vattenfall. 2014. Tietoa biomassasta. [Viitattu 31.8.2015].

Saatavissa: <http://corporate.vattenfall.fi/tietoa-energiasta/sahkon-jalammontuotanto/tietoa-biomassasta/>.

Wilén, C. et al. 2014. Wood torrefaction – market prospects and integration with the forest and energy industry. VTT Technology 163. 55 s..

Wolfgang, J. 2012. Torrefaction of biomass. World Bioenergy 2012. Jöngköping. Ruotsi, 29. – 31. toukokuuta.



ISBN 978-952-265-880-7

ISBN 978-952-265-881-4 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2015

 LUT  
Lappeenranta  
University of Technology

The Multi

Technology