

# BIOHIILEN TEKNISTALOUDELLISET KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET

Energia-, teräs- ja selluteollisuus

Laura Vuorinen

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2014

Energiatekniikan koulutusohjelma  
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU  
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä Vuorinen, Laura	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 4.6.2014
	Sivumäärä 68	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty ( X )
Työn nimi BIOHIILEN TEKNISTALOUDELLISET KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET. Energia-, teräs- ja selluteollisuus		
Koulutusohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja Nuutinen, Marjukka		
Toimeksiantaja Miktech Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää torrefioidun biohiilen käyttömahdollisuuksia energia-, teräs- ja selluteollisuudessa sekä arvioida näiden teollisuudenalojen maksukykyä biohiilestä. Energiateollisuuden osalta tarkemmin tutkittiin biohiilen käytön mahdollisuutta kivihiilen korvaajana pölypolttokattiloissa, terästeollisuudessa käyttöä masuuneissa pelkistimenä ja selluteollisuudessa käyttöä meesauunien polttoaineena.</p> <p>Biohiilen teknistä soveltuvuutta eri prosesseihin selvitettiin arvioimalla sen sopivuutta laitteistoihin ja vertaamalla sen ominaisuuksia yleisesti käytettyihin fossiilisiin polttoaineisiin ja pelkistimiin. Maksukykyä arvioitiin teollisuudenalojen käyttämien fossiilisten polttoaineiden ja pelkistimien hinnan ja niille hankittavien päästöoikeuksien hinnan perusteella. Energiateollisuuden osalta arvioitiin myös mahdollisten uusiutuvan energian tukien vaikutusta maksukykyyn. Tietoperustana käytettiin lähinnä eri tutkimuslaitoksien ja yliopistojen julkaisemia tutkimuksia ja raportteja sekä energia-, teräs- ja selluteollisuuteen liittyvää kirjallisuutta.</p> <p>Käsitellyistä teollisuuden aloista suurin potentiaalinen käyttäjä on energiateollisuus ja erityisesti suuret kivihiiltä käyttävät yhteistuotantolaitokset. Niiden kivihiilen käyttömäärät ovat suuria ja kivihiiltä on mahdollista korvata isoja osuuksia biohiilellä ilman, että käyttölaitteistoihin tarvitsee tehdä muutoksia. Lisäksi yhteistuotantolaitoksien maksukyky biohiilestä on kohtalainen.</p> <p>Teräs- ja selluteollisuudessa biohiilen käyttö on hankalampaa ja voi vaatia suurempia laitteistomuutoksia. Biohiilen käytön aloittaminen teräs- tai sellutehtaassa vaatiikin vielä tarkempia tutkimuksia biohiilen aiheuttamista ongelmista ja niiden ehkäisemisestä. Kuitenkin varsinkin selluteollisuudessa kalliiden fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biohiilellä voisi olla taloudellisesti kannattavaa, ja jos se onnistuu vähäisin ongelmin, selluteollisuus voisi olla suuri ja maksukyvyltään hyvä biohiilen käyttäjä.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Biohiili, biohiilipelletit, torrefiointi, pölypolttokattila, masuuni, meesauuni		
Muut tiedot		



Author Vuorinen, Laura	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 4.6.2014
	Pages 68	Language Finnish
		Permission for web publication ( X )
Title TECHNICAL AND ECONOMICAL FEASIBILITY OF BIOCOAL. Energy, Steel and Pulp Industries		
Degree Programme Degree Programme in Energy Technology		
Tutor Nuutinen, Marjukka		
Assigned by Miktech Oy		
<p>Abstract</p> <p>The aim of the thesis was to research the feasibility of biocoal for energy, steel and pulp industries and evaluate the ability of these industries to pay for biocoal. The focus of the research was pulverized fuel boilers, blast furnaces and lime kilns, in which biocoal could replace the use of fossil fuels or reducing agents.</p> <p>The technological feasibility of biocoal for the processes was estimated by comparing its properties to the ones of fossil fuels and reducing agents, and by evaluating how the equipment would suit biocoal. The ability to pay for biocoal was valued by using the prices of fossil fuels and emission allowances. Financial support which can be granted for the producer of renewable electricity was taken into account, too. The sources of the thesis were mainly research papers and reports from different research centers and universities and literature from energy, steel and pulp industries.</p> <p>The energy industry and especially coal-fired CHP-plants are the most promising and potential users of biocoal. They use remarkable amounts of coal and it is possible to replace large part of coal by biocoal without changing the equipment. In addition, the CHP-plants have quite good ability to pay for biocoal.</p> <p>It is harder to use biocoal in steel and pulp industries and their equipment is likely unsuitable for biocoal without changes. Therefore, more research is needed to find out the exact problems biocoal causes in blast furnaces and lime kilns and to solve these problems. However, it could be profitable to replace expensive fuels the pulp industry uses by biofuels, and if it is possible to be done easily and without problems the pulp industry could be a considerable biocoal user with a good capacity to pay for it.</p>		
Keywords Biocoal, TOP-pellets, torrefaction, pulverized fuel boiler, blast furnace, lime kiln		
Miscellaneous		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>3</b>
1.1	Torrefioitu biomassa, lupaava uusi energianlähde .....	3
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet ja toteutus .....	4
<b>2</b>	<b>Uusiutuvan energian käytön edistäminen</b> .....	<b>5</b>
2.1	Kioton pöytäkirja ja Euroopan unionin ilmasto- ja energiapolitiikka .....	5
2.2	Uusiutuvan energian käytön lisääminen .....	6
2.3	Uusiutuvan energian edistäminen .....	7
2.4	Päästökauppa .....	9
<b>3</b>	<b>Torrefioidun biomassan ominaisuudet ja tuotanto</b> .....	<b>13</b>
3.1	Torrefioinnin ja pelletoinnin vaikutus biomassan ominaisuuksiin .....	14
3.2	Raaka-aineet ja niiden vaikutus biohiilen ominaisuuksiin.....	16
3.3	Arvio biohiilen hintatasosta.....	19
<b>4</b>	<b>Mahdolliset biohiilen käyttökohteet</b> .....	<b>21</b>
4.1	Energiateollisuus.....	21
4.1.1	Sähkön- ja lämmöntuotanto .....	22
4.1.2	Kivihiilen ominaisuudet ja hinta .....	22
4.1.3	Biomassojen käyttö pölypolttokattiloissa .....	25
4.1.4	Sähkön ja lämmön tuotantomäärät .....	26
4.2	Terästeollisuus .....	29
4.2.1	Raakaraudan valmistus masuunissa.....	29
4.2.2	Pelkistimien ominaisuudet ja hinta .....	31
4.2.3	Muiden pelkistimien käyttö masuunissa .....	33
4.2.4	Raakaraudan tuotantomäärä .....	34
4.3	Selluteollisuus .....	34
4.3.1	Selluntehtaan kemikaali- ja kalkkikierto .....	35
4.3.2	Meesauunin polttoaineiden ominaisuudet ja hinta .....	36
4.3.3	Muiden polttoaineiden käyttö meesauuneissa .....	39
4.3.4	Sellun tuotantokapasiteetti.....	40
<b>5</b>	<b>Biohiilen soveltuvuus käyttökohteisiin</b> .....	<b>41</b>
5.1	Energiateollisuus.....	41
5.1.1	Biohiilipellettien tekninen soveltuvuus.....	42
5.1.2	Energiateollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä .....	44
5.2	Terästeollisuus .....	48
5.2.1	Biohiilipellettien tekninen soveltuvuus.....	49
5.2.2	Terästeollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä .....	52
5.3	Selluteollisuus .....	54
5.3.1	Biohiilipellettien tekninen soveltuvuus.....	54
5.3.2	Selluteollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä .....	55
<b>6</b>	<b>Pohdinta</b> .....	<b>58</b>
6.1	Yhteenveto .....	58
6.2	Johtopäätökset .....	61
	<b>Lähteet</b> .....	<b>63</b>

## Kuviot

Kuvio 1. Energialähteiden käyttö Euroopan unionin alueella vuonna 2011.....	7
Kuvio 2. Syöttötariffin ja syöttöpreemion toimintaperiaate .....	8
Kuvio 3. Päästöoikeuden hinnan kehitys vuosina 2005–2014.....	11
Kuvio 4. Arvio päästöoikeuden hinnan kehittymisestä vuosina 2014–2030 .....	12
Kuvio 5. Torrefiointiprosessin vaiheet .....	14
Kuvio 6. Taustalla haketta, vasemmalla torrefioitua haketta ja oikealla biohiilipellettejä.....	16
Kuvio 7. Puupellettien kuljetuksen ja vakuutuksen sisältämä hinta.....	20
Kuvio 8. Arvioita biohiilen ja biohiilipellettien tuotantokustannuksista.....	21
Kuvio 9. Kivihiilen hinta sähkön- ja lämmöntuottajille .....	24
Kuvio 10. Suomen ja Euroopan unionin sähköntuotanto energialähteittäin vuonna 2011.....	27
Kuvio 11. Kivihiilen käyttömäärät sähkön- ja lämmöntuotannossa Suomessa .....	28
Kuvio 12. Kivihiilen käytön jakautuminen Suomessa vuonna 2011.....	29
Kuvio 13. Masuuni .....	30
Kuvio 14. Koksen hinta Euroopassa .....	32
Kuvio 15. Sellunvalmistuksen kemikaali- ja kalkkikierrot .....	35
Kuvio 16. Meesauuni .....	36
Kuvio 17. Maakaasun hinta kuluttajatyypin mukaan.....	38
Kuvio 18. Kevyen polttoöljyn kuluttajahinta.....	38
Kuvio 19. Päästöoikeuden ja kivihiilen hinnan vaikutus energiateollisuuden maksukykyyn .....	45
Kuvio 20. Syöttöpreemioiden ja vihreiden sertifikaattien vaikutus maksukykyyn biohiilestä .....	46
Kuvio 21. Terästeollisuuden maksukyky biohiilelle koksen korvaajana.....	53
Kuvio 22. Selluteollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä maakaasun käyttöä korvatesa .....	57
Kuvio 23. Selluteollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä polttoöljyn käyttöä korvatesa .....	57

## Taulukot

Taulukko 1. Syöttötariffien ja syöttöpreemioiden suuruuksia ja vihreiden sertifikaattien hintoja .....	9
Taulukko 2. IEA:n arviot päästöoikeuden kehittymisestä.....	13
Taulukko 3. Biomassojen ominaisuuksia.....	17
Taulukko 4. Puubiomassojen alkuainekoostumus ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen	19
Taulukko 5. Kivihiilen ominaisuuksia.....	24
Taulukko 6. Suomen merkittävimpiä kivihiiltä käyttäviä voimalaitoksia.....	28
Taulukko 7. Polttoöljyn ja maakaasun tyypillisiä ominaisuuksia .....	37
Taulukko 8. Suomen sellutehtaat.....	40

# 1 Johdanto

## 1.1 Torrefioitu biomassa, lupaava uusi energianlähde

Euroopan unioni on asettanut jäsenmailleen kunnianhimoisia tavoitteita uusiutuvan energian käytön lisäämisestä ja päästöjen vähentämisestä. Yksi tehokas tapa näihin tavoitteisiin pääsemiseksi on korvata fossiilisia polttoaineita ja raaka-aineita biomassalla. Biomassojen käytössä on kuitenkin usein alhaisesta energiatiheydestä johtuvat korkeat kuljetuskustannukset ja polttoteknisten ominaisuuksien heikkous verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Näistä syistä biomassaa jalostetaan kemiallisilta ja fyysisiltä ominaisuuksiltaan paremmaksi ja eri käyttötarkoituksiin soveltuvaksi. Yksi biomassan jalostustekniikka on torrefiointi eli biomassan lämpökäsittely hapettomissa olosuhteissa. Torrefioinnin jälkeen biomassa voidaan pelletoida, jolloin lopputuloksena on monilta ominaisuuksiltaan kivihiiltä muistuttava tuote, jonka energiatiheys on suurempi kuin raakabiomassan. Suuremman energiatiheyden ansiosta torrefioitujen biohiilipellettien kuljettaminen on edullisempaa ja niitä on taloudellisesti järkevää kuljettaa kauemmaksi kuin raakabiomassaa. Tämä voisi lisätä biomassan käyttöä energiateollisuudessa, jossa polttoainetta tarvitaan suuria määriä ja polttoainetta on hankittava pitkienkin kuljetusmatkojen takaa. Parempien ominaisuuksiensa ansiosta biohiilipellettejä voidaan käyttää myös korvaamaan fossiilisia polttoaineita tai raaka-aineita prosesseissa, joihin raakabiomassa ei sovellu.

Torrefiointi ei ole teknologiana uusi, mutta energiantuotannossa käytettävän biomassan jalostusta varten sen käyttöä on alettu tutkia ja kehittää vasta kymmenen viime vuoden aikana. Useat energiayhtiöt ovat selvittäneet torrefioidun biomassan käyttömahdollisuuksia ja monet merkittävätkin teknologiatoimittajat ovat alkaneet kehittää ja kaupallistaa torrefioidun biomassan tuotantoteknologiaa. Torrefioitua biomassaa ei kuitenkaan tuoteta vielä juurikaan kaupallisessa mittakaavassa ja sen markkinat ovat vielä alkutekijöissään. Eri puolilla maailmaa on kuitenkin suunnitteilla useita torrefioitua biomassaa tuottavia laitoksia, joiden toteutumisen kannalta on tärkeää lisätä tietämystä torrefioidun biomassan mahdollisista käyttökohteista ja markkinanäkymistä tulevaisuudessa.

## 1.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja toteutus

Tämän tutkimuksen tavoite on selvittää biohiilen käyttömahdollisuuksia energiateollisuudessa, terästeollisuudessa ja selluteollisuudessa. Energiateollisuus voisi käyttää biohiiltä polttoaineena voimalaitoksissa, terästeollisuus pelkistimenä masuuneissa ja selluteollisuus polttoaineena meesauuneissa. Tehtävänä on esitellä nämä prosessit ja selvittää ja arvioida biohiilen käytön teknistaloudelliset reunaehdot niissä. Lisäksi tehtävänä on arvioida eri teollisuudenalojen maksukykyä biohiilestä ja mahdollisen käytön suuruutta.

Raportissa esitellään Euroopan unionin ilmasto- ja energiavoititteita, joiden vuoksi uusiutuvien energialähteiden käyttöä pyritään lisäämään, sekä erilaisia tukikeinoja, joilla uusiutuvien energioiden käyttöä edistetään. Energia-, teräs- ja selluteollisuudesta esitellään omissa luvuissaan prosessit, joissa biohiiltä voitaisiin käyttää, sekä teollisuuksien yleisesti käyttämät poltto- ja raaka-aineet. Teollisuudenalojen yhteydessä esitellään myös tutkimuksia biohiilen tai muiden biomassojen käytöstä kyseisessä prosessissa. Biohiilen soveltuvuutta eri teollisuudenalojen polttoaineeksi tai pelkistimeksi tutkitaan vertaamalla yleisesti käytettyjen fossiilisten polttoaineiden ja biohiilen ominaisuuksia ja arvioimalla käytettyjen laitteistojen soveltuvuutta biohiilelle. Teollisuuksien maksukykyä arvioidaan niiden yleensä käyttämien fossiilisten polttoaineiden hinnan ja niille hankittavien päästöoikeuden hinnan perusteella. Energiateollisuuden maksukykyä arvioitaessa huomioon otetaan myös mahdollisten uusiutuvan energian tukien vaikutus.

Tutkimuksen tietolähteinä on käytetty pääosin eri tutkimuskeskusten ja yliopistojen julkaisemia raportteja ja tutkimuksia sekä energia-, teräs- ja selluteollisuuteen liittyvää kirjallisuutta. Tutkimuksessa esitetyt tilastot ovat lähinnä Tilastokeskuksen ja eri teollisuudenalojen keräämiä ja julkaisemia.

## 2 Uusiutuvan energian käytön edistäminen

Uusiutuvien energialähteiden käyttöä pyritään lisäämään Euroopan unionin alueella, jotta Kioton pöytäkirjan päästöjen vähennyssitoumukset ja EU:n ilmasto- ja energia-paketin mukaiset uusiutuvan energian käyttötavoitteet täyttyvät. Euroopan unionin yhteinen päästöjen vähentämistä edistävä keino on päästökauppa ja lisäksi jäsenvaltioilla on omia tukijärjestelmiä, jotka kannustavat uusiutuvien energialähteiden käyttöön. Uusiutuvista energialähteistä Euroopan unionin alueella eniten käytettyjä ovat biomassat ja niiden käytön odotetaan lisääntyvän tulevaisuudessa.

### 2.1 Kioton pöytäkirja ja Euroopan unionin ilmasto- ja energiapolitiikka

Vuonna 2005 voimaan astunut Yhdistyneiden kansakuntien ilmastopöytäkirjasta täydentävä Kioton pöytäkirja asettaa teollisuusmaille kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisvelvoitteita, joiden tarkoitus on hillitä ilmastonmuutosta. Ensimmäisellä velvoitekaudella 2008–2012 Euroopan unionin tuli vähentää kokonaispäästöjään vähintään 8 % vertailuvuoden 1990 tasosta. Tavoite jaettiin ennen vuotta 2004 liittyneiden 15 jäsenvaltion kesken huomioiden valtioiden mahdollisuudet vähentää päästöjään. Toisen velvoitekauden aikana 2013–2020 EU:n tavoite on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä alueellaan 20 % vertailuvuoden tasosta. (Kyoto emissions targets 2014.)

Kioton pöytäkirjan velvoittaman päästöjen vähentämisen lisäksi Euroopan unioni on ottanut itselleen muitakin kunnianhimoisia ilmasto- ja energiavoitteita vuodelle 2020. Niin kutsutuissa 20-20-20-tavoitteissa EU on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään Kioton sopimuksessakin mainitun 20 % vuoden 1990 tasosta, kasvattamaan uusiutuvan energian osuuden 20 %:iin kokonaisenergiankulutuksesta ja parantamaan energiatehokkuutta 20 %. (The 2020 climate and energy package 2014.) Euroopan komissio on tehnyt ehdotuksen myös vuoden 2030 tavoitteista. Niihin kuuluvat mm. päästöjen vähentäminen 40 % vuoden 1990 tasosta ja uusiutu-



van energian osuuden kasvattaminen 27 %:iin energian kokonaiskulutuksesta (2030 framework for climate and energy policies 2014).

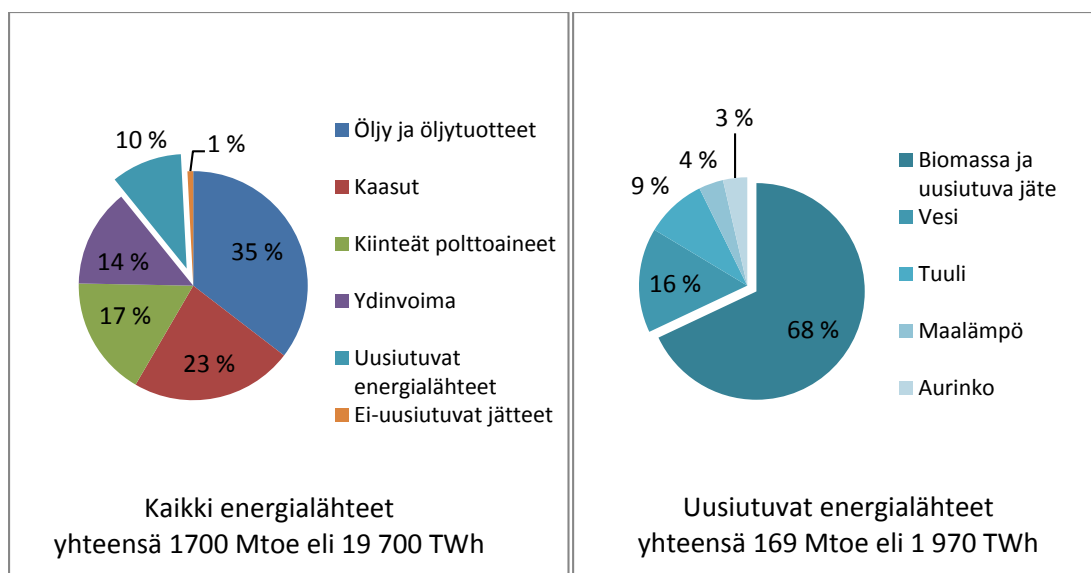
Päästäkseen tavoitteisiinsa Euroopan unioni on luonut ilmasto- ja energiapaketin, joka käsittää neljä direktiiviä. Direktiivit ovat uudistettu päästäkauppadirektiivi, taakanjakopäätös, direktiivi uusiutuvista energiavaroista ja direktiivi hiilen talteenotosta ja varastoinnista. Päästäkauppajärjestelmän tarkoitus on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä kustannustehokkaasti energiateollisuudessa, energiaintensiivisessä teollisuudessa ja kaupallisessa lentoliikenteessä. Muualla syntyneitä päästöjä pyritään vähentämään taakanjakopäätöksellä, jolla tarkoitetaan jokaiselle valtiolle määriteltyjä sitovia tavoitteita päästöjen vähentämisestä päästäkauppasektoriin kuulumattomilla teollisuuden aloilla. Direktiivi uusiutuvista energiavaroista puolestaan määrittää EU:n tavoitteet uusiutuvan energian käytölle. Hiilidioksidipäästöjä on mahdollista vähentää myös hiilen talteenotto- ja varastointimenetelmillä. Direktiivi hiilen talteenotosta ja varastoinnista on säädetty varmistamaan, että hiilidioksidipäästöjen vähentäminen näillä menetelmillä ei vaaranna ympäristöä ja ihmisten terveyttä. (The 2020 climate and energy package 2014.)

## 2.2 Uusiutuvan energian käytön lisääminen

Euroopan unionin tavoite on vuonna 2020 tuottaa 20 % kuluttamastaan energiastaan uusiutuvilla energialähteillä. Tavoite on jaettu jäsenvaltioiden kesken ottaen huomioon kunkin maan kyky panostaa uusiutuvan energian tuotantoon. Kaikki jäsenvaltiot ovat tehneet kansallisen uusiutuvan energian toimintasuunnitelman, jossa ne erottelvat uusiutuvan energian käyttötavoitteet sähköntuotannossa, lämmityksessä ja liikennekäytössä sekä määrittelevät toimenpiteensä tavoitteisiinsa pääsemiseksi. Valtiot ovat arvioineet suunnitelmissa myös sen, mitä uusiutuvia energialähteitä ne aikovat käyttää ja kuinka paljon. (Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistäminen 2010.)

Vuonna 2011 EU:n alueella käytetyistä energialähteistä kymmenesosa oli uusiutuvia. Uusiutuvista energialähteistä lähes 70 prosenttia oli biomassaa. Tarkempi erittely EU-

alueella käytetyistä energialähteistä on kuviossa 1. Vuonna 2011 biomassaa käytettiin lähes 115 Mtoe eli yli 1 300 TWh ja kansallisten uusiutuvan energian toimintasuunnitelmien mukaan biomassaa tullaan käyttämään vuonna 2020 lähes 140 Mtoe eli yli 1 600 TWh. Biomassan käyttö painottuu lämmitysenergian tuotantoon, sillä suunnitelmien mukaan vuonna 2020 käytettävästä biomassasta 65 % käytetään lämmöntuotantoon ja loput liikennepolttoaineiden ja sähkön tuotantoon. (European Bioenergy Outlook 2013, 11, 24.)



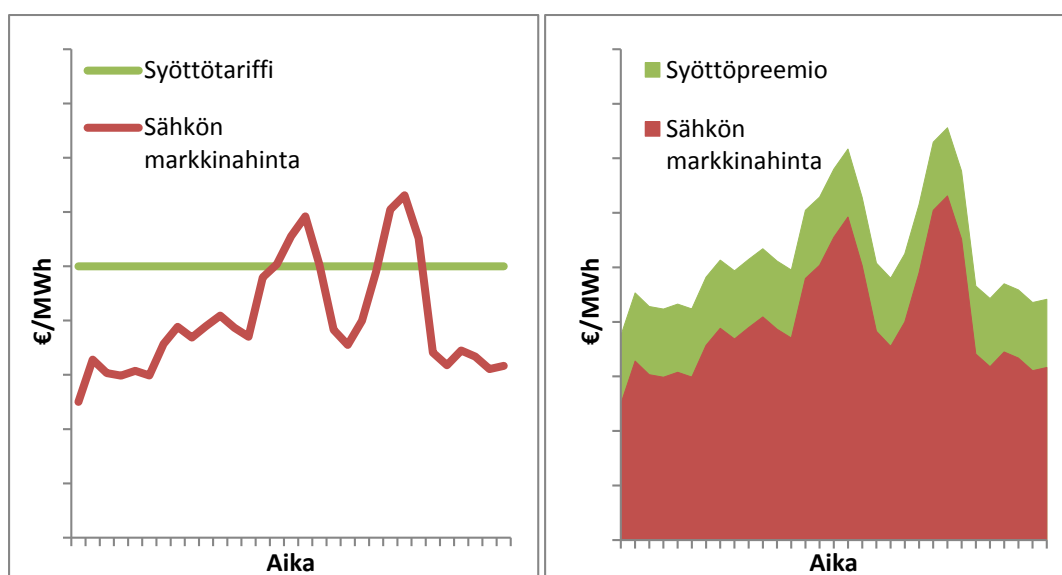
**Kuvio 1. Energialähteiden käyttö Euroopan unionin alueella vuonna 2011 (Tiedot lähteestä European Bioenergy Outlook 2013, 9–11)**

### 2.3 Uusiutuvan energian edistäminen

Koska uusiutuvien energioiden tuotanto ja käyttö on usein kalliimpaa kuin fossiilisten, niiden käyttöä varten tarvitaan taloudellisia kannustimia. Euroopan unionin jäsenvaltiot päättävät itse, millaisilla keinoilla tukevat uusiutuvan energian tuotantoa ja käyttöä. Yleisesti tuet voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin tukiin. Suoria tukia ovat energiantuotantoa tukevat syöttötariffit, syöttöpreemiot ja vihreät sertifikaatit sekä uusiutuvan energian tuotannon lisäämiseen tähtäävissä hankinnoissa auttavat investointituet. Syöttötariffeja, syöttöpreemioita ja vihreitä sertifikaatteja myönnetään yleensä uusiutuvilla energialähteillä tuotetulle sähkölle. Tällöin tuki maksetaan tuotetun uusiutuvan sähkömäärän mukaan eikä käytetyn uusiutuvan polttoaineen määrän

mukaan. Epäsuoria tukia ovat erilaiset verohelpotukset, joita myönnetään uusiutuville energialähteille. Yleensä tällaisia veroja ovat mm. energiavero ja hiilidioksidivero. Monissa maissa, kuten myös Suomessa, uusiutuvalle energialle myönnetään verohelpotuksia, kun sitä käytetään lämmöntuotannossa. (Marja-aho 2011, 4–7.)

EU-maissa on käytössä erilaisia suoria tukia uusiutuvan sähköntuotannon tukemiseen, mutta niitä on hankala vertailla suoraan keskenään, koska tukien toimintaperiaate on erilainen. Vihreitä sertifikaatteja jaetaan uusiutuvan sähkön tuottajille ennalta määrättyjen sääntöjen mukaan. Energianmyyjillä on velvollisuus ostaa vihreitä sertifikaatteja tuottajilta tietyn kiintiön verran. Uusiutuvan sähkön tuottaja saa siis tuottamastaan sähköstä normaalin sähkön markkinahinnan ja sertifikaattien myynnistä saatavat tulot. Syöttöpremiojärjestelmässä uusiutuvan sähkön tuottaja saa sähkön markkinahinnan päälle lisätuen. Premiojärjestelmiä on erilaisia, osassa premion suuruuteen vaikuttaa sähkön markkinahinta ja osassa ei. Syöttötariffijärjestelmässä uusiutuvan sähkön tuottaja saa sähköstään takuuhinnan, jonka verkkooperaattorit ovat velvoitettuja maksamaan. Takuuhinnan suuruus ei yleensä riipu sähkön markkinahinnasta. (Marja-aho 2011, 4–7.) Kuviossa 2 on esitetty syöttötariffijärjestelmän ja syöttöpremioista saatavan tuen suuruus verrattuna sähkön markkinahintaan. Vihreät sertifikaatit muistuttavat syöttöpremioita, mutta ylimääräisen tuen suuruus vaihtelee sertifikaattien kulloisenkin markkinahinnan mukaan.



Kuvio 2. Syöttötariffin ja syöttöpreemion toimintaperiaate

Taulukossa 1 on joidenkin EU-maiden tukien suuruuksia. Tukien suuruudet vaihtelevat paljon, taulukossa esitettyjen maiden sähkön markkinahinnan päälle maksettavat preemiot ja vihreiden sertifikaattien hinnat ovat 13,13–53,7 €/MWh ja syöttötariffit 83,5–137,3 €/MWh. Tukien saajille on usein määritelty tiukat vaatimukset. Osa maista tukee vain tiettyjen biomassalajien käyttöä, monissa maissa tuet on rajoitettu vain pienille laitoksille, osa maista ei tue biomassan yhteispolttoa fossiilisten polttoainien kanssa ja jotkin maat tukevat vain lämmön kanssa yhteistuotannossa tuotettua uusiutuvaa sähköä. Näillä rajauksilla pyritään ohjaamaan biomassojen kestäväää käyttöä ja tuottamaan uusiutuvaa sähköä mahdollisimman tehokkaasti.

**Taulukko 1. Syöttötariffien ja syöttöpreemioiden suuruuksia ja vihreiden sertifikaattien hintoja (Tiedot lähteestä Res Legal 2014)**

Maa	Tukimuoto	Tuen suuruus	Huomiot
Iso-Britannia	Vihreä sertifikaatti	48,73–51,91 €/sert.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitos yli 5 MW</li> <li>Saatavien sertifikaattien määrään vaikuttaa yhteispoltton aste ja tuotantomuoto.</li> </ul>
Puola	Vihreä sertifikaatti	51,62 €/sert.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alaraja biomassan osuudelle polttoaineseoksessa</li> <li>Jokaisesta MWh:sta uusiutuvaa sähköä saa sertifikaatin.</li> </ul>
Ruotsi	Vihreä sertifikaatti	20,26 €/sert.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sertifikaatti jokaisesta tuotetusta uusiutuvan sähkön MWh:sta</li> </ul>
Alankomaat	Preemio	45,16–53,64 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitos 10–100 MW</li> <li>Pelkkää biomassaa käyttäville CHP-laitoksille</li> </ul>
Suomi	Preemio	13,13 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitoksen generaattori yli 0,1 MVA</li> <li>Metsähakkeella tuotetulle sähkölle</li> </ul>
	Tariffi	83,5 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitoksen generaattori 0,1–8 MVA</li> <li>Puupolttoaineella tuotetulle sähkölle</li> </ul>
Tanska	Preemio	20,12 €/MWh	
Viro	Preemio	53,7 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vain korkeahyötysuhteisille CHP-laitoksille</li> </ul>
Liettua	Tariffi	120 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitos alle 10 kW</li> </ul>
	Tariffi	100 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitos 10–5 000 kW</li> </ul>
	Tariffi	90 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitos yli 5 MW</li> </ul>
Saksa	Tariffi	57,6–137,3 €/MWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laitos alle 20 MW</li> <li>Tietty osuus sähköstä täytyy tuottaa yhdessä lämmön kanssa (yleensä 60 %).</li> </ul>

## 2.4 Päästökauppa

Päästökaupalla tarkoitetaan järjestelmää, jossa yritysten on hankittava päästöoikeuksia aiheuttamilleen päästöille. Päästökaupan tarkoitus on vähentää päästöjä

ohjaamalla yrityksiä tekemään sellaisia päästöjen vähennystoimia, jotka ovat edullisempia kuin päästöoikeuksien ostaminen. Päästöjä vähennetään ohjailemalla markkinoilla olevien päästöoikeuksien määrää. (Päästökauppa 2014.) Päästökauppajärjestelmä voi siis toimia eräänlaisena epäsuorana tukena uusiutuvien energioiden käytölle, koska päästöoikeuksia ei tarvitse hankkia laskennallisesti päästöttömiä uusiutuvia energialähteitä käytettäessä.

Euroopan unionin päästökauppajärjestelmä otettiin käyttöön vuonna 2005. Sen tarkoitus on vähentää päästökaupan alaisia kasvihuonekaasupäästöjä 21 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä, ja Euroopan komissio on ehdottanut 43 %:n vähennystavoitetta vuoteen 2030 mennessä. Kasvihuonekaasupäästöjen alentaminen tapahtuu vähentämällä päästöoikeuksien määrää vuosittain. EU:n päästökaupan piiriin kuuluu hiilidioksidipäästöjen osalta energiateollisuus, energiaintensiivinen teollisuus ja kaupallinen lentoliikenne. Energiateollisuuden osalta päästökaupassa ovat mukana sähkön- ja lämmöntuotantolaitokset, jotka ovat teholtaan alle 20 MW. Energiaintensiiviseen teollisuuteen kuuluvat mm. öljynjalostus-, rauta-, teräs-, sementti-, kalkki-, sellu- ja paperiteollisuus. Kahdella ensimmäisellä kaudella, 2005–2007 ja 2008–2012, jäsenvaltiot saivat jakaa päästöoikeuksia yrityksilleen ilmaiseksi tai halutessaan huutokaupata osan niistä. Kolmannen kauden alussa vuonna 2013 ilmaisten oikeuksien määrää laskettiin ja entisten maakohtaisten päästörajojen sijaan käyttöön otettiin EU:n yhteinen päästöraja. (The EU Emission Trade System 2014.) Ilmaisia päästöoikeuksia saavat teollisuudenalat, joiden kansainvälistä kilpailua päästökauppa vaikeuttaa. Ilmaisten päästöoikeuksien määrä lasketaan EU-tason vertailuarvojen ja vuotuisen korjauskertoimen perusteella. Kaukolämmöntuotanto ja muu teollisuus saavat päästöoikeuksista maksutta noin puolet vertailuarvosta. Sähköntuotannosta vain jätekaasuista tuotettu sähkö on oikeutettu ilmaisiin oikeuksiin. Ilmaisjako kuitenkin vähenee vuosittain kaikille teollisuuden aloille. (Kauden 2013–2020 ilmaisjako, 2014.)

Teollisuuslaitosten tulee hankkia yksi päästöoikeus jokaista päästämäänsä hiilidioksiditonnia kohden, eli päästöoikeuden hinta on käytännössä hiilidioksiditonnin hinta tehtaalle (Päästökauppa 2014). Kuviossa 3 on päästöoikeuden hinnankehitys koko päästökauppajärjestelmän ajalta. Viime vuosina järjestelmää on häirinnyt talouden

taantumisen, mikä näkyy laskevana päästöoikeuden hintana. Kun tehtaita on jouduttu sulkemaan, kasvihuonekaasupäästöt ovat vähentyneet enemmän kuin odotettiin, mikä on johtanut suureen päästöoikeuksien ylijäämään ja niiden hinnan romahtamiseen. Alhainen päästöoikeuden hinta ei ohjaa tarpeeksi paljon päästöjen vähentämiseen, joten tilannetta pyritään korjaamaan siirtämällä osa päästöoikeuksien myyntiä kolmannen kauden loppupuolelle. Lisäksi EU:n komissio on ehdottanut markkinavakausvarannon perustamista neljännen kauden alussa vuonna 2021. Markkinavakausvarannon tarkoitus olisi mukauttaa päästöoikeuksien määrää markkinoilla ennalta määrättyjen sääntöjen mukaisesti, jolloin niiden hinta ei pystyisi vaihtelevaan suuresti. (The EU Emission Trade System 2014)

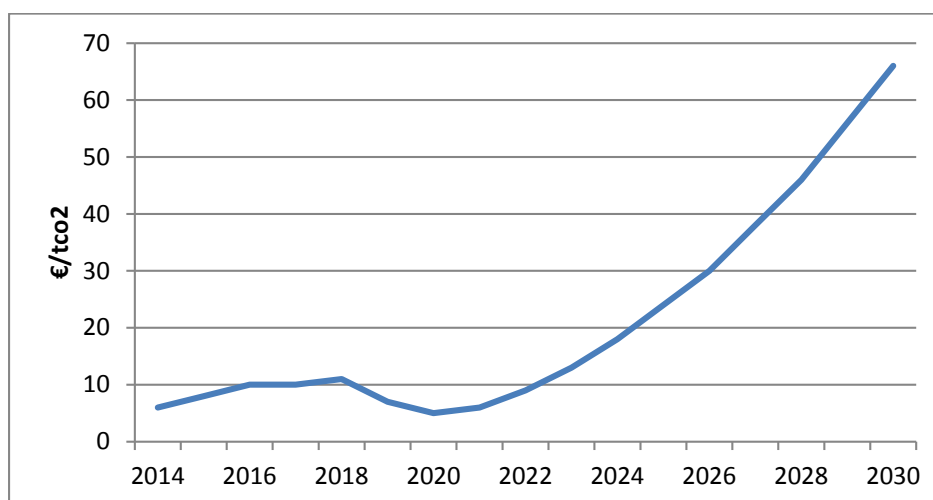


**Kuvio 3. Päästöoikeuden hinnan kehitys vuosina 2005–2014 (Energiavuosi 2013)**

Päästöoikeuden hinnan kehittymisestä on tehty useita arvioita, joista esitellään seuraavaksi kaksi. Arvioiden laskemista varten on täytynyt tehdä paljon oletuksia, joiden paikkansa pitävyys tulevaisuudessa ei ole varmaa. Euroopan taloustilannetta on vaikea arvioida pitkän ajan päähän ja muutokset siinä vaikuttavat myös päästöoikeuksien hintaan, kuten viime vuosina on huomattu. Arvioissa ei ole myöskään mahdollista ottaa huomioon, millaisia vaikutuksia erilaisilla tulevilla poliittisilla päätöksillä on päästökauppaan. Alla olevissa arvioissa ei ole esimerkiksi huomioitu Euroopan komission suunnittelemaa markkinavakausvarantoa, joka suunnitellaan otettavaksi käyt-

töön neljännellä kaudella. Näistä syistä arviot eivät välttämättä ole edes suuntaa-antavia, vaan pelkästään laskelmia päästöoikeuden hinnan kehittymisestä tietyillä oletuksilla.

Konsultointi- ja asiantuntijayritys Thomson Reuters Point Carbon on tehnyt vuonna 2013 ennusteen päästöoikeuden hinnan kehittymisestä. Se on esitetty kuviossa 4. Yrityksen arvio perustuu siihen, että EU pyrkii vähentämään kasvihuonekaasuja 40 % ja kasvattamaan uusiutuvien energioiden määrää 30 %:iin kokonaiskulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi vuosittaisen taloudellisen kasvun on oletettu olevan keskimäärin 1,6 % vuosina 2013–2020 ja 1,9 % vuosina 2021–2030. Vaikka EU:n päätös vetää osa kolmannen kauden oikeuksista pois markkinoilta nostaa päästöoikeuden hintaa vuosina 2014–2016, arvion mukaan hinta laskee taas vuonna 2019, kun poisvedetyt päästöoikeudet tulevat takaisin markkinoille. Arvion mukaan päästöoikeuksien ylitarjonta jatkuu vuoteen 2027 saakka. (European Carbon Market to Remain Oversupplied Until 2027, 2013).



**Kuvio 4. Arvio päästöoikeuden hinnan kehittymisestä vuosina 2014–2030 (Tiedot lähteestä European Carbon Market to Remain Oversupplied Until 2027, 2013)**

Kansainvälinen energiajärjestö IEA on esittänyt World Energy Outlook 2011 -raportissa arvioita päästöoikeuksien hinnan kehittymisestä. Arvioita on kolme ja ne on esitetty taulukossa 2. Ensimmäinen, Current Policies Scenario, on tehty vuonna 2011 voimassa olleiden poliittisten päätösten perusteella eli se kertoo, miten hinta kehittyy, jos olosuhteet eivät muutu. Toinen, New Policies Scenario, ottaa huomioon myös

ne ilmasto- ja energiapolitiikkaa koskevat päätökset, jotka eivät ole vielä virallisia, mutta joista on keskusteltu yleisesti. Kolmannen, 450 Scenario-arvion, oletuksena on, että maailmanlaajuisesti tehdään toimenpiteitä, joilla voidaan 50 %:n todennäköisyydellä rajoittaa maapallon lämpeneminen kahteen asteeseen verrattuna esiteolliseen aikaan. Arvion nimi tulee siitä, että tavoitteeseen pääsemiseksi ilmakehän kasvihiuonekaasupitoisuuden tulisi pysyä alle lukeman 450 ppm CO<sub>2</sub>-eq. (World Energy Outlook 2011, 66.)

**Taulukko 2. IEA:n arviot päästöoikeuden kehittämisestä (World Energy Outlook 2011, 66)**

€/tCO <sub>2</sub>	2020	2030	2035
Current Policies Scenario	22,6	30,2	33,9
New Policies Scenario	22,6	30,2	33,9
450 Scenario	33,9	71,7	90,5

IEA:n arvio päästöoikeuden hinnasta nykyisillä poliittisilla ohjauskeinoilla vuodelle 2020 on yli 4,5 kertaa suurempi kuin Point Carbonin tekemä arvio, mutta toisaalta vuoden 2030 arvio on yli puolet pienempi. 450 Scenario-arvion mukaan päästöoikeuden hinta olisi suurempi kuin Point Carbonin arvio myös vuonna 2030.

### 3 Torrefioidun biomassan ominaisuudet ja tuotanto

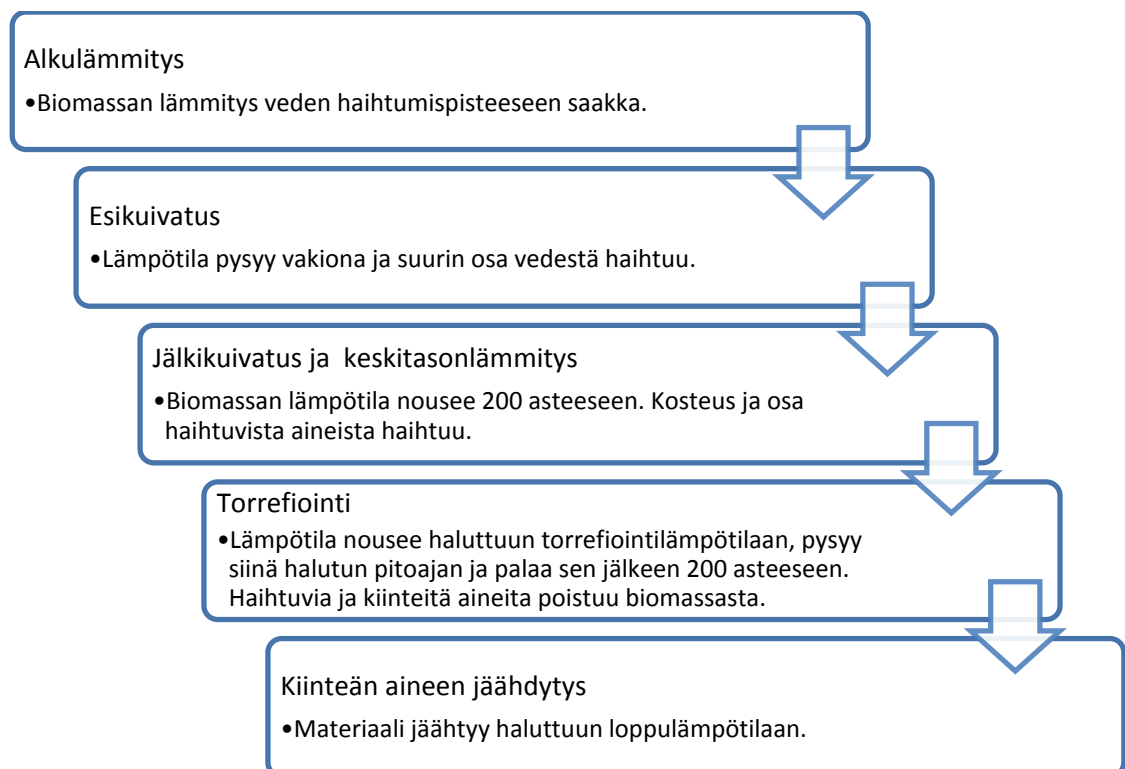
Biomassojen käyttö energiantuotannossa on lisääntynyt teollisuusmaissa kansainvälisten ilmastotavoitteiden vuoksi. Tukitoimien seurauksena energiantuottajien maksukyky biomassasta on parantunut monissa maissa merkittävästi, ja sen vuoksi sitä kuljetetaan pitkiäkin matkoja käyttöpaikoille. Jotta kuljetuskustannukset saadaan pidettyä matalina, biomassoja jalostetaan energiatiheydeltään tiiviimpään muotoon. Tällainen jalostustekniikka on esimerkiksi pelletointi, joka tarkoittaa biomassan puristamista tiiviiksi pelleteiksi. Biomassojen ominaisuudet poikkeavat kuitenkin paljon fossiilista polttoaineista, mikä rajoittaa niiden käyttöä uusiutumattomien polttoaineiden ja raaka-aineiden korvaajana. Biomassaa ei yleensä pystytä käyttämään samoissa laitteistoissa fossiilisten polttoaineiden kanssa, vaan niiden käyttöönotto aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia laitteistojen muutosten vuoksi. Jotta ylimääräisiä



kustannuksia ei syntyisi, biomassoja voidaan jalostaa muistuttamaan ominaisuuksiltaan enemmän fossiilisia polttoaineita. Tällainen jalostustapa on esimerkiksi torrefiointi, jossa biomassaa paahdetaan hapettomissa olosuhteissa. Kun biomassa sekä torrefioidaan että pelletoidaan, lopputulokseksi saadaan ominaisuuksiltaan fossiilisia polttoaineita muistuttava tuote, jota on kannattavaa kuljettaa pitkiäkin matkoja käyttöpaikalle ja jota voidaan lähes poikkeuksetta käyttää samoissa laitteistoissa kivihii- len sijaan.

### 3.1 Torrefiointin ja pelletoinnin vaikutus biomassan ominaisuuksiin

Torrefioitua biomassaa eli biohiiltä valmistetaan paahdamalla biomassaa hapettomissa olosuhteissa 200–300 °C:n lämpötilassa normaalissa ilmanpaineessa (Bergman 2005, 11). Torrefiointiprosessia on havainnollistettu kuviossa 5. Torrefiointia tehdään useissa erilaisissa reaktoreissa, jotka on alun perin suunniteltu muuta käyttöä varten. Tällaisia reaktoreita ovat mm. pyörivä rumpureaktori, ruuvikuljetinreaktori ja mikroaaltoreaktori. Lisäksi torrefiointia varten on kehitetty omia reaktoreita kuten Torbed-reaktori. (Koppejan, Sokhansanj, Melin & Madrali 2012, 15.)



**Kuvio 5. Torrefiointiprosessin vaiheet (Bergman, Boersma, Zwart. & Kiel 2005, 17–18)**

Torrefioinnin aikana biomassasta poistuu kosteus ja osa haihtuvista aineista. Tyypillisessä torrefiointiprosessissa biomassan alkuperäisestä painosta katoaa 30 %, mutta energiasisällöstä vain 10 %. Tämä tarkoittaa, että biomassan lämpöarvo, eli energiasisältö massaa kohden, kasvaa. Myös biomassan muissa ominaisuuksissa tapahtuu muutoksia torrefioinnin aikana. Torrefioinnin jälkeen biomassassa hylkii vettä. Koska tämän lisäksi torrefioidun biomassan kosteus on vähäistä, se ei hajoa biologisesti eli siihen ei muodostu sieni- tai mikrobikasvustoa. Torrefiointi hajottaa biomassan kuiturakennetta, jolloin siitä tulee hauraampaa. Hauras aine murskautuu helpommin, mikä on eduksi, jos biohiiltä halutaan murskata tai jauhaa käyttöä varten, mutta samalla sen mekaaninen kestävyys esim. kuljetusten ja varastoinnin aikana on heikompi ja se pölyää enemmän. (Bergman 2005, 11–13, 18.) Biohiili on tilavuudeltaan lähes käsittelemättömän biomassan suuruista, joten sen varastointiin ja kuljetukseen tarvitaan paljon tilaa ja biohiilestä irtoava pöly voi haitata käsittelylaitteistoja ja aiheuttaa pölyräjähdysten vaaran (Koppejan ym. 2012, 10).

Torrefioidun biomassan hauraudesta, pölyävyydestä ja suuresta tilavuudesta aiheutuvia ongelmia voidaan torjua pelleteimalla torrefioitu biomassassa. Pelletointi tarkoittaa biomassan tiivistämistä pieniksi lieriön malliseksi pelleteiksi, jolloin biomassan tiheys kasvaa ja pölyäminen vähenee. Pelletointi mahdollistaa erilaisia käsittely-, säilytys- ja kuljetusmahdollisuuksia biohiilelle. Lisäksi käsittely- ja kuljetuskustannukset vähenevät, koska biohiilipellettien energiatiheys on suurempi kuin biohiilen. Biohiilipelletit hylkivät jonkin verran kosteutta, mutta eivät kestä esimerkiksi sadetta, mikä täytyy ottaa huomioon varastoinnissa. (Koppejan ym. 2012, 10–12.) Kuviossa 6 on haketta, torrefioitua haketta eli biohiiltä ja siitä pelleteimalla tehtyjä biohiilipellettejä.



**Kuvio 6. Taustalla haketta, vasemmalla torrefioitua haketta ja oikealla biohiilipellettejä (Volama 2011)**

Biohiilipellettien tuotanto on usein kannattavinta lähellä raaka-ainelähdettä. Tällöin raaka-aineen kuljetuskustannukset torrefiointipaikalle ovat pienet matkan lyhyiden vuoksi ja kuljetuskustannukset biohiilen käyttöpaikalle ovat mahdollisimman matalat johtuen biohiilipellettien suuresta energiatiheydestä. Biomassan pelkkä torrefiointi voisi olla riittävää, jos biohiili käytetään lähietäisyydellä. Tällöin säästettäisiin pelletointikustannusten verran, mutta ongelmaksi voisi silti muodostua biohiilen suuri energiatiheys ja pölyntyvyys. (Deutmeyer 2012, 13–15; Koppejan ym. 2012, 10.)

### 3.2 Raaka-aineet ja niiden vaikutus biohiilen ominaisuuksiin

Torrefioitavaksi käyvät teoriassa lähes kaikki biomassat eli eloperäiset orgaaniset aineet. Torrefioinnilla erilaisista biomassoista saadaan edellä kuvatuilta fyysisiltä ominaisuuksiltaan samankaltaisia, mutta niiden kemiallisiin ominaisuuksiin vaikuttaa alkuperäisen biomassan ominaisuudet. (Koppejan ym. 2012, 6.) Biomassan, kuten muidenkin polttoaineiden, ominaisuuksiin vaikuttaa sen koostumus: kosteus, haihtuvat aineet, kiinteä hiili ja tuhka. Lisäksi polttoaineen käyttöön vaikuttavia ominaisuuksia ovat lämpöarvo, jauhautuvuus, haitallisten aineiden pitoisuudet sekä tuhkan

koostumus ja käyttäytymisominaisuudet. (Moilanen, Nieminen & Alén 1995, 91–92; Alakangas 2000, 35.) Taulukossa 3 on esitetty haketettujen puubiomassojen, pelletoidun puun ja torrefioidun ja pelletoidun puun koostumusta ja ominaisuuksia.

**Taulukko 3. Biomassojen ominaisuuksia (Muokattu lähteistä Alakangas 2000, 152; Koppejan ym. 2012, 9)**

	Raakabiomassa		Jalosteet	
	Metsätähdehake	Kokopuuhake	Puupelletit	Biohiilipelletit
Tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)	6 - 9	7 - 10	15 - 18	20 - 24
Kosteus (p-%)	50 - 60	45 - 55	7 - 10	1 - 5
Haihtuvat aineet (% db)	70 - 75	70 - 75	70 - 75	55 - 65
Kiinteä hiili (% db)	20 - 25	20 - 25	20 - 25	28 - 35
Tiheys (kg/i-m <sup>3</sup> )	250 - 400	250 - 350	550 - 750	750 - 850
Energiatiheys (GJ/i-m <sup>3</sup> )	2,5 - 3,2	2,5 - 3,2	7,5 - 10,4	15 - 18,7
Kosteuden hylkiminen	ei	ei	ei	kyllä
Biologinen hajoaminen	nopea	nopea	mahdollista	ei mahdollista
Jauhautuvuus	huono	huono	huono	hyvä
Db, dry basis = kuiva-aineesta				

Polttoaineen kosteudella tarkoitetaan sen sisältämää vesimäärää. Se ilmoitetaan yleensä painoprosentteina kokonaispainosta. Kosteus vaikuttaa negatiivisesti biomassan teholliseen lämpöarvoon, koska sen haihduttamiseen biomassaa polttaessa tarvitaan energiaa. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 39 - 40.) Ennen torrefiointia biomassa yleensä kuivataan n. 15 %:n kosteuteen (Koppejan ym. 2012, 3). Alkuperäisen biomassan kosteuspitoisuus ei näin ollen vaikuta biohiilen lopulliseen kosteuteen, mutta mitä kuivempaa biomassaa on, sitä vähemmän energiaa tarvitaan sen kuivaamiseen.

Kun polttoainetta lämmitetään hapettomissa olosuhteissa, osa siitä kaasuuntuu. Näitä kaasuuntuneita komponentteja kutsutaan haihtuviksi aineiksi. Haihtuvien aineiden määrä vaikuttaa polttoaineen syttymisominaisuuksiin ja sen palaessa muodostuvan liekin käyttäytymiseen. Kiinteä hiili taas tarkoittaa polttoaineen palavaa osaa, joka jää jäljelle, kun polttoaineesta poistetaan kosteus, haihtuvat aineet ja tuhkan osuus. Haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen osuudet ilmoitetaan yleensä prosentteina kuiva-ainepitoisuudesta. (Huhtinen ym. 2000, 40–41; Moilanen ym. 2000, 92.) Koska torrefioinnin aikana biomassaa lämmitetään hapettomissa olosuhteissa, osa sen haihtuvista aineista kaasuuntuu, eli haihtuvien aineiden määrä biohiilessä on mata-

lampi kuin alkuperäisessä biomassassa. Koska kokonaisuudessa tästä johtuen vähenee, biomassan kiinteän hiilen osuus kuiva-aineessa kasvaa.

Tuhka on polttoaineen sisältämä epäorgaaninen aine, joka jää jäljelle kun polttoaine on palanut täydellisesti. Sen määrä ilmoitetaan painoprosentteina kuiva-aineen painosta. Tuhka alentaa polttoaineen lämpöarvoa ja aiheuttaa usein ongelmia polttoaineen käsittely- ja polttolaitteistoihin. Tuhkan ominaisuuksista sulamiskäyttäytymistä ja alkuainekoostumusta käytetään yleisesti arvioitaessa polttoaineen soveltuvuutta käyttöön. Sulamiskäyttäytymisellä tarkoitetaan lämpötiloja, joissa tuhka muuttaa muotoaan ja sulaa. Sulamiskäyttäytymisen tunnuslämpötilat määräytyvät tuhkalta suoritettavista standarditesteistä. (Moilanen ym. 1995, 92, 95 - 96.) Torrefiointi ei vaikuta biomassan tuhkan määrään, sen koostumukseen tai sulamiskäyttäytymisominaisuuksiin (Deutmeyer 2012, 23). Tosin tuhkan suhteellinen määrä lisääntyy, koska osa kuiva-aineesta häviää torrefiointin aikana (Koppejan ym. 2012, 9). Taulukossa 4 on esitetty raakabiomassojen tuhkan määrä ja sulamiskäyttäytyminen. Biohiilen sisältämän tuhkan suhteellisen osuuden voidaan olettaa olevan hieman suurempi kuin raakabiomassan, mutta sulamiskäyttäytymisen samanlaista.

Tuhkan lisäksi biomassat sisältävät muita haitallisia kemikaaleja, kuten rikkiä ja klooria, jotka voivat olla haitaksi prosesseissa ja tuottaa haitallisia palamistuotteita. Koska torrefiointi tapahtuu verrattain matalassa lämpötilassa, suurin osa haitallisista kemikaaleista ei poistu biomassasta. Torrefioitavan biomassan tulisikin sisältää mahdollisimman vähän kemiallisia komponentteja, jotka voivat olla jatkokäytössä haitallisia. (Koppejan ym. 2012, 6 - 7.) Taulukossa 4 on esitetty raakabiomassojen tuhkapitoisuuden lisäksi myös suurimpia alkuaine- ja epäpuhtauspitoisuuksia.

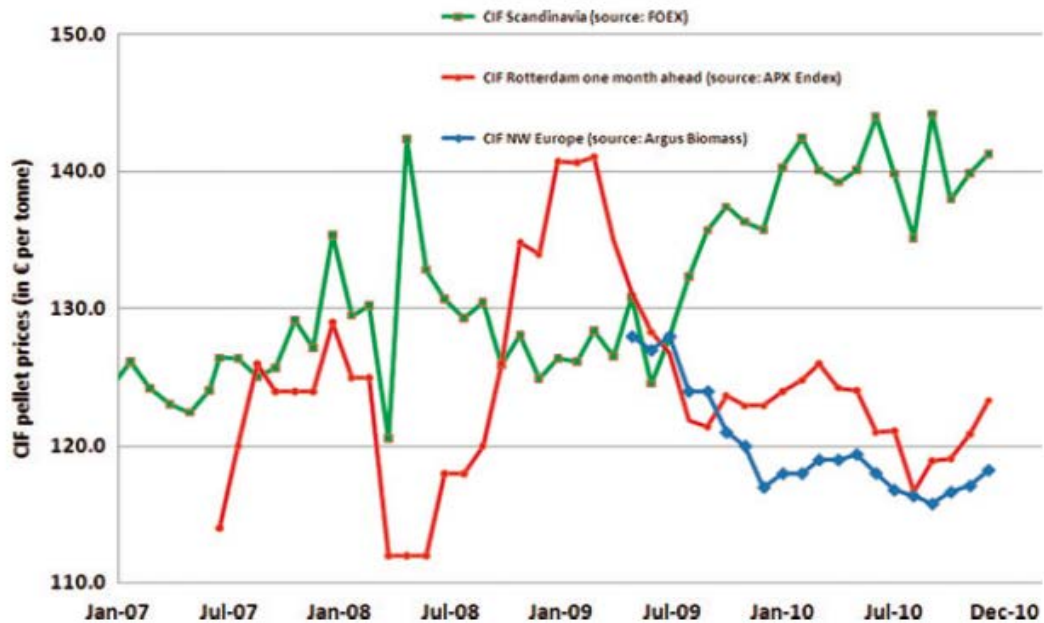
**Taulukko 4. Puubiomassojen alkuainekoostumus ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Muokattu lähteestä Alakangas 2000, 36, 38, 152)**

	Metsätähdehake	Kokopuuhake
Hiilipitoisuus (% db)	48 - 52	48 - 52
Vetyttöisyys (% db)	6 - 6,2	5,4 - 6
Typpipitoisuus (% db)	0,3 - 0,5	0,3 - 0,5
Rikkipitoisuus (% db)	< 0,05	< 0,05
Klooripitoisuus (% db)	< 0,01	< 0,01
Tuhkapitoisuus (% db)	1 - 3	1 - 2
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavissa olosuhteissa IT/ST/HT/FT* (°C)	1175/1205/1230/1250	1210/1250/1250/1275
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen pelkistävissä olosuhteissa IT/ST/HT/FT* (°C)	1175/1225/1245/1260	1230/1240/1245/1290
Db, dry basis = kuiva-aineesta *IT = muodonmuutospiste, ST = pehmenemispiste, HT = puolipallopiste, FT = juoksevuuspiste		

### 3.3 Arvio biohiilen hintatasosta

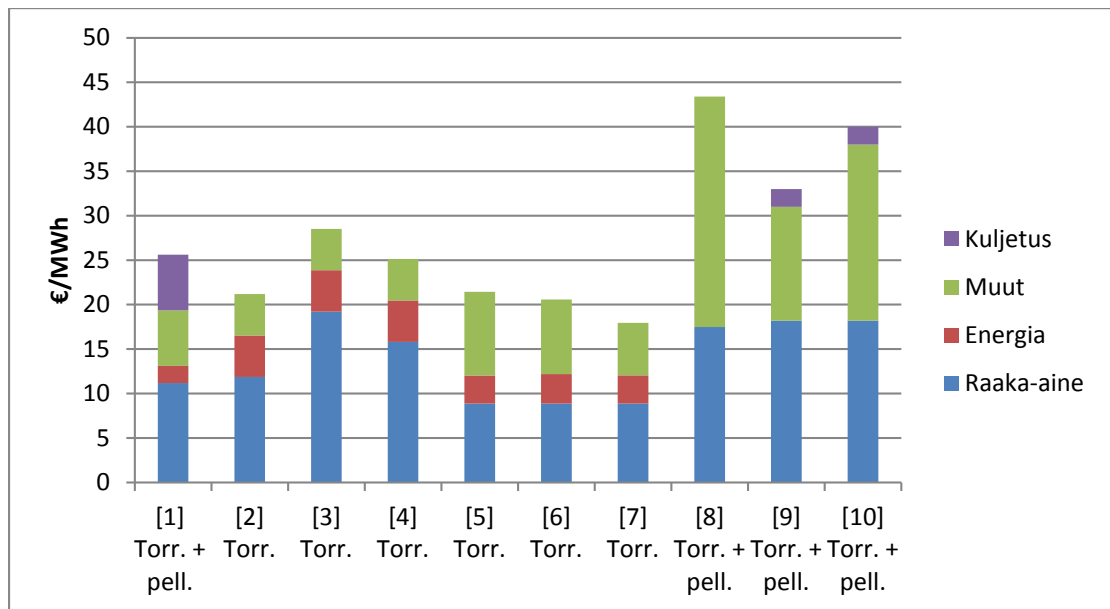
Biohiilellä ja biohiilipelleteillä ei ole vielä juurikaan kaupallisen kokoluokan tuottajia, vaan tuotanto on pientä ja muodostuu lähinnä demonstraatiolaitoksien tuotannosta. Biohiilipellettien kilpaileva tuote on puupelletit, joilla on jo omat markkinat. Biohiilipellettien hintatasoa voidaankin arvioida puupellettien hinnan avulla. Biohiilipellettien ja puupellettien raaka-aine on sama ja valmistusprosessi eroaa vain torrefioinnin osalta. Torrefioinnin aikana osa raaka-aineesta haihtuu, joten biohiilipellettien tuottamiseen tarvitaan enemmän raaka-ainetta kuin tavallisten puupellettien. Biohiilipellettien valmistamiseen tarvitaan myös enemmän energiaa, mutta niiden suuremman energiatihedden vuoksi niiden kuljettaminen tulee edullisemmaksi kuin puupellettien. Torrefioitujen pellettien tuotanto- ja kuljetuskustannusten on arvioitu olevan vain hieman korkeammat kuin tavallisten puupellettien (Deutmeyer 2012, 34).

Kuviossa 7 on suurten voimalaitoksien puupelleteistä maksamia hintoja Alankomaisissa ja Iso-Britanniassa ja keskikokoisten kaukolämpö- ja yhteistuotantolaitosten maksamia pelletin hintoja Pohjoismaissa. Energialaitoksien maksama hinta pelleteistä vuonna 2010 oli 115–145 €/t eli noin 25–32 €/MWh.



**Kuvio 7. Puupellettien kuljetuksen ja vakuutuksen sisältämä hinta (€/t) suurille voimalaitoksille Alankomaissa (punainen) ja Iso-Britanniassa (sininen) ja keskikoisille kaukolämpö- ja yhteistuotantolaitoksille Pohjoismaissa (vihreä) (Sikkema, Steiner, Junginger, Hiegl, Hansen & Faail 2010, 261)**

Monet tutkijat ovat tehneet omia arvioita biohiilen ja biohiilipellettien tuotantokustannuksista. Näihin arvioihin vaikuttaa raaka-aineen hinta, investointi- ja pääomakustannukset, torrefiointiin, kuivatukseen ja pelletointiin käytettävä energia ja työvoima-, huolto-, kunnossapito- ja kuljetuskustannukset. Arvioita on esitetty kuviossa 8. Kuvioista huomataan, että raaka-aineen hinta vaikuttaa suuresti tuotantokustannuksiin. Osassa arvioista on pelkän biohiilen tuotantokustannukset ja muutamassa on huomioitu myös pelletoinnista aiheutuvat kustannukset. Palkkien 9 ja 10 arviot pohjautuvat puupellettien tuotantokustannuksiin, joihin on lisätty arvio torrefiointikustannuksista. Kuviossa esitetyt hintatasot ovat kuitenkin vain arvioita, joiden monia lähtöarvoja on jouduttu olettamaan, ja ne poikkeavatkin paljon toisistaan. Tarkemman arvion biohiilipellettien mahdollisesta hintatasosta antaa todennäköisesti puupellettien hinta.



**Kuvio 8. Arvioita biohiilen ja biohiilipellettien tuotantokustannuksista**

Tiedot lähteistä [1] Koppejan ym. 2012; [2], [3], [4] Suopajärvi 2013b; [5], [6], [7] Bergman ym. 2005; [8] Arpiainen & Wilen 2014; [9], [10] Virkkunen, Flyktman & Raitila 2012;

## 4 Mahdolliset biohiilen käyttökohteet

Opinnäytetyössä tarkasteltaviksi käyttökohteiksi on valittu energia-, teräs- ja selluteollisuudet, koska niillä kaikilla on tarve vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä, jotta uusiutuvan energian käyttötavoitteisiin päästäisiin. Kaikki nämä teollisuudenalat ovat mukana päästökauppajärjestelmässä, eli niiden täytyy ostaa päästöoikeuksia aiheuttamilleen päästöille. Tosin tässä vaiheessa monet laitokset saavat vielä osan päästöoikeuksistaan ilmaiseksi. Päästöjä voisi olla mahdollista vähentää suuria määriä vaihtamalla fossiilisten polttoaineiden käyttö laskennallisesti päästöttömiin biopolttoaineisiin kuten biohiileen.

### 4.1 Energiateollisuus

Sähköä ja lämpöä tuotetaan erikseen omilla tuotantolaitoksissa ja yhteistuotannossa samalla voimalaitoksella. Varsinkin sähkön erillistuotannossa ja yhteistuotannossa käytetään suuria määriä kivihiiltä. Ilmastotavoitteisiin pääsemiseksi kivihiilen käyttöä



tulisi vähentää esimerkiksi korvaamalla sitä päästöttömillä polttoaineilla. Raakabio-  
massa ei yleensä sovellu sellaisenaan laitteistoihin, jotka on suunniteltu kivihiilen  
käyttöön. Biohiili muistuttaa ominaisuuksiltaan kuitenkin kivihiiltä, joten sen käyttö  
voisi olla mahdollista suurempinakin määrinä.

#### 4.1.1 Sähkön- ja lämmöntuotanto

Sähkö- ja lämpöenergiaa voidaan tuottaa erikseen omilla voimalaitoksilla tai yhteis-  
tuotannossa samassa laitoksessa. Pelkkää sähköä tuottavaa voimalaitosta kutsutaan  
lauhdevoimalaksi ja sähköä ja lämpöä tuottavaa voimalaa vastapainevoimalaksi, CHP-  
voimalaksi tai yhteistuotantolaitokseksi. Erillinen lämmöntuotanto tapahtuu yleensä  
pienehköissä lämpökeskuksissa. Yhteistuotantolaitokset tuottavat vähemmän sähköä  
kuin lauhdevoimalat, mutta niiden kokonaisenergiantuotanto voi olla yli kaksi kertaa  
suurempi. (Hellgrén, Heikkinen, Suomalainen & Kala 1999, 68–81.)

Voimalaitoksen käyttämät polttoaineet riippuvat sen kattilan polttotekniikasta. Kiin-  
teiden aineiden polttotekniikoita ovat arina-, leijupeti- ja pölypoltto. Arina- ja leijupe-  
titeknikat soveltuvat lähes kaikkien kiinteiden polttoaineiden polttamiseen. Arinoita  
käytetään lähinnä vain pienissä kattiloissa, kun taas leijupetikattiloita on uudemmissa  
ja suuremmissa kattiloissa. Pölypolttokattilat on suunniteltu alun perin käyttämään  
vain kivihiiltä ja ne ovat tavallisia vanhemmissa suurissa lauhde- ja yhteistuotantolai-  
toksissa. (Hellgrén ym. 1999, 60 - 65.) Koska biopolttoaineiden käyttö arina- ja lei-  
jupetikattiloissa on mahdollista ilman muutoksia, niitä ei tutkita tarkemmin. Tutki-  
muksessa keskitytään tarkemmin kivihiilen korvaamiseen pölypolttokattiloissa, koska  
näihin tavalliset biomassat eivät sovellu ilman muutoksia.

#### 4.1.2 Kivihiilen ominaisuudet ja hinta

Polttoaineiden ominaisuudet vaikuttavat niiden tekniseen käytettävyyteen energian-  
tuotantolaitosten kattiloissa. Eniten vaikuttavia ominaisuuksia ovat kosteus, lämpö-  
arvo, haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen määrät, jauhautuvuus, rikki- ja klooripitoi-  
suus sekä tuhkapitoisuus, tuhkan sulamiskäyttäytyminen, koostumus ja likaantumis-  
ja kuonaantumisominaisuudet. (Moilanen ym. 1995, 91.)

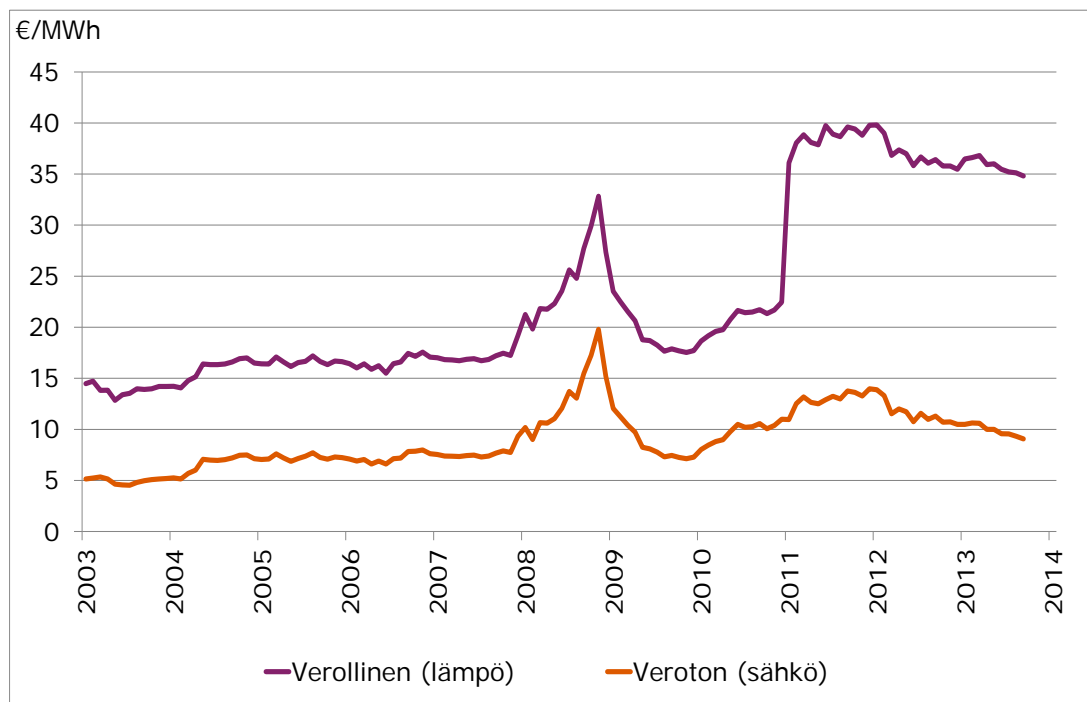
Polttoaineen kosteus vaikuttaa sen teholliseen lämpöarvoon, sillä ylimääräisen veden haihtumiseen tarvitaan energiaa, joka vähentää polttoaineen höyryyn luovuttamaa lämpöenergiaa. Koska suuri kosteuspitoisuus alentaa polttoaineen lämpöarvoa, polttoainetta tarvitaan enemmän saman energiamäärän tuottamiseen. Lisäksi suuri kosteuspitoisuus lisää savukaasuvirtoja ja kasvattaa puhallintehon tarvetta. Pölypoltto-kattiloissa kivihiili pyritään kuivaamaan ennen kattilaan syöttöä noin 6 %:n kosteuteen, koska kosteus voi aiheuttaa puhallusputkien tukkeutumista. Polttoaineen haihtuvien aineiden määrä puolestaan vaikuttaa sen syttymiseen. Paljon haihtuvia aineita sisältävät polttoaineet syttyvät alemmissa lämpötiloissa ja palavat nopeammin ja täydellisemmin kuin vähän haihtuvia aineita sisältävät polttoaineet. Varsinkin pölypoltossa on huomioitava polttoaineen syttymislämpötila, sillä mitä korkeampi se on, sitä hienommaksi polttoaine on jauhettava ennen polttoa. Jos polttoaine on liian suurikokoista, se ei ehdi palaa täydellisesti tulipesässä. (Huhtinen ym. 2000, 39–41.)

Tuhkapitoisuus vaikuttaa polttoaineen lämpöarvoon negatiivisesti ja se likaa kattilan lämpöpintoja, kuluttaa polttoaineen käsittelylaitteita ja saattaa muodostaa lämpöpinnoille syövyttäviä kerrostumia. Pölypolttokattiloista tuhkaa poistetaan joko kuivana tai sulana, sekä savukaasuista lentotuhkan muodossa. Jos tuhkaa poistetaan sulana kattilanpohjalta, kattilan lämpötilan täytyy olla suurempi kuin tuhkan sulamispisteen. Tällöin suurin osa tuhkasta sulaa jo kattilassa ja lentotuhkan määrä savukaasuissa on pieni. Jos kattilan lämpötila taas on alempi kuin tuhkan sulamis- tai muodonmuutospisteet, tuhkaa poistetaan kattilasta kuivana. Tällöin suurin osa kevyestä ja kuivasta tuhkasta lähtee kattilasta savukaasujen mukana. Tämä lentotuhka poistetaan savukaasuista esim. sähkösuodattimilla tai savukaasupesureilla. Savukaasuista puhdistetaan myös ympäristölle haitallisia rikin ja typen yhdisteitä. Polttoaineessa oleva rikki ja typpi reagoivat palaessaan hapen kanssa ja muodostavat rikkidioksidia, rikkitrioksidia ja typenoksideja. Rikin- ja typenoksidit ovat haitallisia ympäristölle ja lisäksi rikkitrioksidi reagoi savukaasuissa olevan veden kanssa muodostaen rikkihappoa, joka päästessään tiivistymään kattilan lämpöpinnoille aiheuttaa niiden nopeaa syöpymistä. (Huhtinen ym. 2000, 37, 41–46, 144–146.) Taulukossa 5 on esitetty kivihiilen ominaisuuksia.

Taulukko 5. Kivihiilen ominaisuuksia (Moilanen ym. 1995, 105)

	Kivihiili
Tehollinen lämpöarvo (MJ/kg, db)	28,7
Kosteuspitoisuus (%)	10
Haihtuvat aineet (% db)	29,5
Alkuainekoostumus (% db)	
Hiili C	76 - 87
Vety H	3,5 - 5
Happi O	2,8 - 11,3
Typpi N	0,8 - 1,2
Rikki S	<0,5
Kloori Cl	<0,1
Tuhkapitoisuus (% db)	14
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavissa olosuhteissa IT/HT/FT* (°C)	1100 - 1300 / 1230 - 1415 / 1270 - 1450
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen pelkistävässä olosuhteissa IT/HT/FT* (°C)	1000 - 1240 / 1090 - 1350 / 1130 - 1400
db, dry basis = kuiva-aineesta	
*IT = muodonmuutospiste, HT = puolipallospiste, FT = juoksevuuspiste	

Kivihiilen hinta voimalaitoksille on esitetty kuviossa 9. Kuviossa on erikseen sähköntuottajien maksama polttoaineveroton hinta sekä lämmöntuottajien maksama polttoaineveron sisältämä hinta. Tällä hetkellä kivihiilen polttoaineveroton hinta on n. 10 €/MWh ja verollinen n. 35 €/MWh.



Kuvio 9. Kivihiilen hinta sähkö- ja lämmöntuottajille (Energiavuosi 2013)

#### 4.1.3 Biomassojen käyttö pölypolttokattiloissa

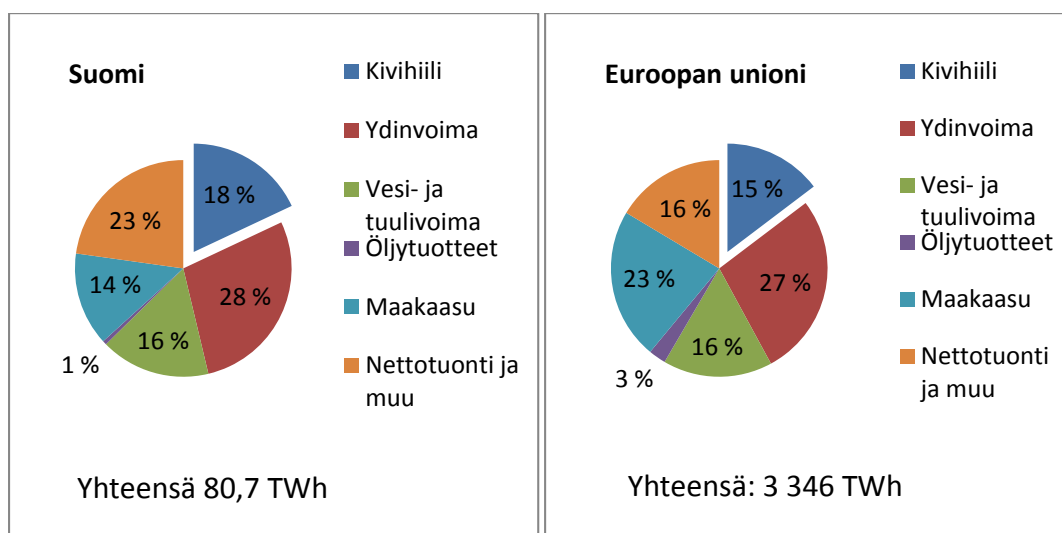
Vain pieniä käsittelemättömän biomassan osuuksia voidaan syöttää kivihiilen kanssa samoilla laitteistoilla pölypolttokattilaan, koska kivihiilimylyt eivät sovellu biomassalle ja biomassan alhainen lämpöarvo lisää polttoainevirran tarvetta. Biomassoille hankittavat omat käsittely- ja kuljetuslaitteistot mahdollistavat suurempien biomassamäärien käytön ja omat polttimet erottavat biomassan käytön kokonaan kivihielestä, jolloin molempien palaminen voidaan optimoida. (Flyktman, Kärki, Hurkainen, Helynen & Sipilä 2011, 38.) On kuitenkin arvioitu, että kivihiehellä tuotetusta tehosta jopa puolet voitaisiin tuottaa biohiilellä, ilman että laitteistoihin tarvitsee tehdä muutoksia. Tarkemmat korvausosuudet vaihtelevat kuitenkin laitoksittain, riippuen kattilan mitoitusarvoista. (mts. 44.) Biomassan käyttö lisää laitoksen huolto- ja kunnossapitokuluja jonkin verran, voi laskea kattilan käytettävyyttä ja vaikuttaa tuhkan laatuun ja hyötykäyttömahdollisuuksiin sekä kattilan päästöihin (mts. 56). Koppejanin ja muiden (2012, 28) mukaan Schakel (2011) on arvioinut puupellettien käytön lisäävän kivihiekipölykattilan kustannuksia noin 5 € per MWh puupellettejä. Suurin osa ylimääräisistä kustannuksista johtuu laitoksen polttoaineen käsittelyjärjestelmiin ja poltto-tekniikkaan tarvittavista muutosinvestoinneista ja alle kolmasosa kasvavista käyttö- ja huoltokustannuksista. Torrefioitujen pellettien käytön ei oleteta aiheuttavan ylimääräisiä kustannuksia laitokselle.

Metso Power, Pohjolan voima, UPM, Helen, Fortum ja VTT ovat tehneet yhteistyössä polttokokeita mäntyvoittoisesta rankahakkeesta valmistettujen biohiilipellettien ja kivihiilen jauhatuksesta ja yhteispoltosta 500 kW:n pölypolttolaitteistossa. Testejä tehtiin erisuuruuksilla biohiilipellettien osuuksilla polttoaineseoksessa sekä pelkillä biohiilipelleteillä. Testien tuloksista käy ilmi, että biohiiltä käyttämällä palamisessa syntyvät päästöt pienenevät. Typpioksidi- ja rikkidioksidipäästöt alenevat biohiiltä käyttäessä kaikilla biohiilen korvausosuuksilla ja CO- eli häkäpäästöt vähenevät, kun biohiiltä käytetään seospoltossa hiilen kanssa. Pelkän biohiilen käytön häkäpäästöt ovat kuitenkin suurempia kuin pelkkää kivihieiltä käyttäessä. Polton tehokkuus näyttää kokeiden perusteella kasvavan, kun biohiiltä käytetään, vaikka testeissä todettu biohiilen huonompi jauhautuvuus ei viitannutkaan siihen. (Anttila 2012.)

Jukola ja Huttunen (2013) ovat simuloineet biohiilipellettien soveltuvuutta polttoaineteholtaan 275 MW:n hiilivoimalaan. Heidän oletuksenaan on, että biohiilipelletit voivat korvata kivihiiltä 50 % polttoaineseoksen kokonaispainosta. Lisäksi he olettavat, että kivihiilen jauhautuvuus huononee, kun sitä jauhetaan samassa myllyssä biohiilipellettien kanssa. Simuloinnin tuloksien mukaan biohiilipelletit soveltuvat poltettavaksi kivihiilen kanssa, tosin suuremmilla osuuksilla liekin vakaana pysyminen voi olla ongelma. Simuloinnin mukaan lämmönsiirtyminen höyrytimeen vähenee hieinan biohiiltä poltettaessa ja tämän vuoksi kattilasta poistuvien kaasujen lämpötila nousee. Kokonaistuhkan määrä vähenee biohiiltä käyttäessä, mutta palamattoman hiilen osuus kasvaa lentotuhkassa. Tämä johtuu kivihiilen normaalia isommasta partikkelikoosta. Typenoksidipäästöt laskevat ja häkäpäästöihin ei oleteta merkittävää muutosta. Jukola ja Huttunen arvioivat, että biohiilen käyttö voi aiheuttaa korroosioriskin tulistimen alueelle, johtuen kattilasta poistuvien kaasujen korkeammasta lämpötilasta ja biomassasta peräisin olevasta tuhkan komponenteista. Jukola ja Huttunen ovat myös verranneet tuloksia tapaukseen, jossa kivihiili ja biohiili jauhettaisiin omissa myllyissä, jolloin kivihiilen partikkelikoko saadaan normaaliksi. Tämä vähentäisi monia päästöjä ja parantaisi lämmön siirtymistä höyrytimeen. (Jukola & Huttunen 2013.)

#### 4.1.4 Sähkön ja lämmön tuotantomäärät

Suomessa ja Euroopan unionin alueella sähköstä tuotettiin vuonna 2011 alle viides kivihiilellä. Kuviossa 10 on Suomen ja EU:n sähköntuotanto eriteltyinä käytettyjen polttoaineiden mukaan. Kuviossa ei ole eroteltu biomassojen, turpeen ja ruskohiilen käyttöä, vaan ne ovat kaikki nettosähköntuotannon kanssa samassa sektorissa.



**Kuvio 10. Suomen ja Euroopan unionin sähköntuotanto energialähteittäin vuonna 2011 (Sähkön tuotanto ja nettotuonti EU-maissa 2010)**

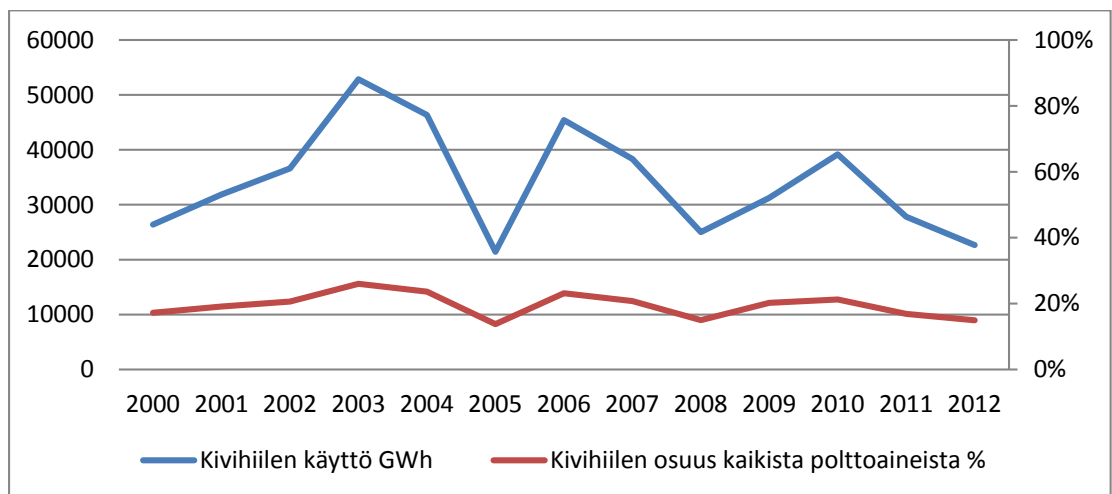
Taulukossa 6 on Suomen suuria kivihiiltä käyttäviä voimalaitoksia. Ainakin Hanasaaren, Salmisaaren, Martinlaakson, Suomenojan, Kymijärven, Naantalın ja Vaskiluodon laitoksissa on käytössä pölypolttokattila (Flyktman ym. 2011). Suurin osa laitoksista on yhteistuotantolaitoksia. Kymijärven ja Naantalın laitokset aiotaan korvata lähitulevaisuudessa biomassaa pääpolttoaineena käyttävillä laitoksilla (Lahti Energia 2014; Monipolttoainevoimalaitoksen investoinnin... 2013). Lisäksi Helsingin Energian tavoitteena on lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä 20 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteeseen aiotaan päästä joko rakentamalla Vuosaaren pääpolttoaineena haketta käyttävä voimalaitos tai lisäämällä Hanasaaren ja Salmisaaren laitoksien biopolttoaineiden käyttöä. Uusi voimalaitos käyttäisi korkeintaan 80 % biopolttoaineita ja muuten kivihiiltä. (Hiilineutraali tulevaisuus n.d.) Vanhojen laitoksien kivihiilen käytöstä pitäisi puolestaan korvata 40 % biomassalla tavoitteeseen pääsemiseksi. Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitoksilla on meneillään polttokokeet puupelleteillä. Kokeiden perusteella puupelleteillä voidaan korvata vain 5–7 % kivihiilestä ilman suurempia muutoksia laitteistoissa eli suurempi käyttö vaatisi laiteistoille teknisiä muutoksia mm. jauhimiin ja polttimiin ja lisäinvestointeja varastoihin ja kuljetinjärjestelmiin. Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitoksilla aloitetaan puupellettien pienimuotoinen käyttö vuonna 2014 ja lisäksi Helsingin Energia tutkii voisiko se tulevaisuudessa käyttää myös biohiiltä polttoaineena. (Lisää biopolttoaineita? N.d.)

**Taulukko 6. Suomen merkittävimpiä kivihiiltä käyttäviä voimalaitoksia**

Laitos	sähkö / kaukolämpö / prosessihöyry (MW)	Polttoaine
Hanasaari	220 / 445 / 0	kivihiili, suunnitteilla pellettien käyttö vuonna 2014
Kristiina 2	242 / 0 / 0	kivihiili, kokeiluja petrokoksilla ja biohiilellä
Kymijärvi 1	200 / 250 / 0	kivihiili, maakaasu
Martinlaakso	195 / 330 / 0	maakaasu, kivihiili
Meri-Pori	565 / 0 / 0	kivihiili
Naantali	256 / 350 / 80	kivihiili
Salmisaari	160 / 480 / 0	kivihiili, suunnitteilla pellettien käyttö vuonna 2014
Suomenoja	359 / 554 / 0	maakaasu, kivihiili
Tahkoluoto	235 / 0 / 0	kivihiili
Vaskiluoto 2	230 / 175 / 0	kivihiili
Suunnitelmia		
Kymijärvi 1:n korvaava laitos vuonna 2019	310	pääpolttoaine puuperäinen biopolttoaine
Naantalın hiilivoimalaitoksen kapasiteettia korvaava laitos vuodeksi 2017		pääpolttoaine biomassa

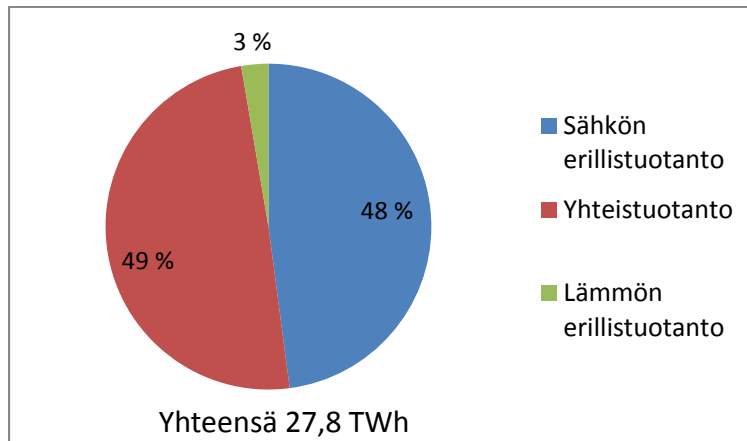
Tiedot lähteistä Fortum 2014; Pohjolan voima 2014; Helen 2014; Lahti Energia 2014; Vantaan Energia 2014; Naantaliin nousee... 2012; Monipolttoainevoimalaitoksen investoinnin... 2013.

Kivihiilen käyttö Suomen voimalaitoksissa on vaihdellut melko paljon vuosittain. Kuviossa 11 on kivihiilen käyttömääriä sähkön- ja lämmöntuotannossa 2000-luvulla sekä kivihiilen osuus kaikista energiantuotantoon käytetyistä polttoaineista.



**Kuvio 11. Kivihiilen käyttömäärät sähkön- ja lämmöntuotannossa Suomessa (Tiedot lähteestä Sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineet 2013)**

Vuonna 2011 kivihiiltä käytettiin sähkön- ja lämmöntuotannossa 27 800 GWh ja sen käyttö tuotantomuodoittain jakaantui kuvion 12 mukaisesti. Lähes kaikki kivihiili käytettiin pelkkää sähköä tuottavilla laitoksilla ja yhteistuotantolaitoksilla. Niissä käyttö oli lähes yhtä suurta. Lämmön erillistuotannossa kivihiilen käyttö oli vähäistä.



**Kuvio 12. Kivihiilen käytön jakautuminen Suomessa vuonna 2011 (Tiedot lähteestä Sähkön ja lämmön tuotanto sekä energialähteet 2011)**

## 4.2 Terästeollisuus

Noin 60 prosenttia maailman teräksestä valmistetaan rautamalmista tehdystä raakaraudasta. Raakaraudan valmistuksessa suurin päästöjen aiheuttaja on pelkistämisen prosessi, jossa rautamalmin rautaoksidit hapetetaan hiilen avulla rauta-atomeiksi. Hiili tuodaan prosessiin yleensä koksien muodossa, mutta monesti koksia myös korvataan kivihiilellä, öljyllä tai muulla fossiilisella polttoaineella. Näiden fossiilisten pelkistimien korvaaminen laskennallisesti päästöttömillä biopelkistimillä vähentäisi päästöjä.

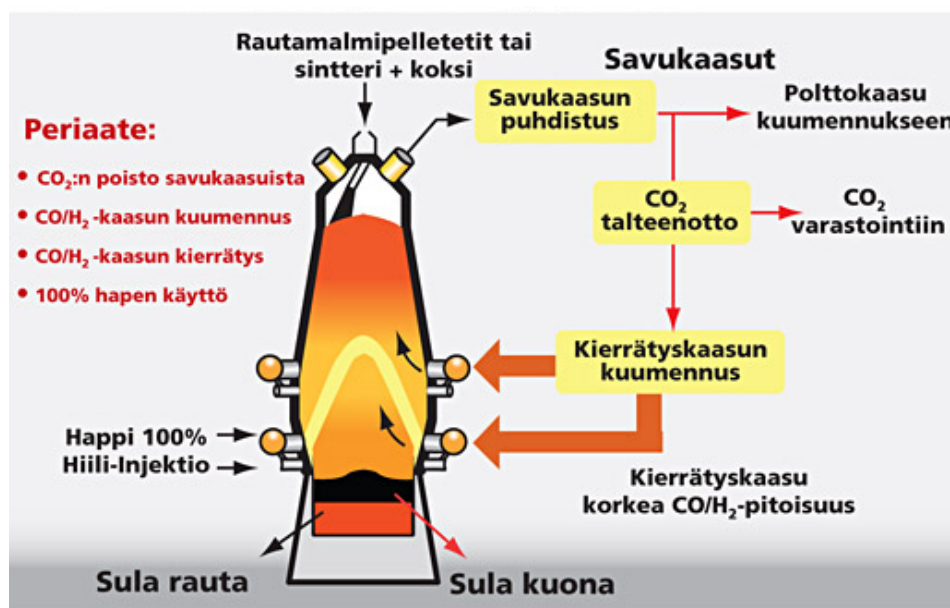
### 4.2.1 Raakaraudan valmistus masuunissa

Raakaraudan valmistus alkaa rautamalmien louhinnalla avolouhoksesta tai maanalaisista kaivoksista. Louhinnan jälkeen rautamalmi rikastetaan eli siitä erotetaan rautaa sisältämättömät sivukivet ja epäpuhtaudet. Rikastamista varten rautamalmi murska-



taan ja rikastuksen jälkeen hieno rautarikaste sintrataan, pelletoidaan tai briketoidaan isommiksi kappaleiksi. Sen jälkeen rautarikasteesta poistetaan happi, mikä tapahtuu hiilen avulla masuunissa. (Teräskirja 2009, 12–19.)

Masuuni on korkea jatkuvatoiminen kuilu-uuni, joka on rakennettu teräslevyistä ja vuorattu tulenkestävillä tiilillä ja jäähdytyslaatoilla. Se on kuvattu kuviossa 13. Masuunin yläosassa on panostuslaitteisto, jota kautta rautaraaka-aineet syötetään uuniin. Rauta on tässä vaiheessa rautaoksidien muodossa ja sen hapen poistamiseen, eli sen pelkistämiseen, tarvitaan hiiltä, joka panostetaan masuuniin metallurgisen koksen muodossa yläosan panostuslaitteiston kautta. Masuunin alaosaan puhalletaan masuunikaasuja polttamalla esikuumennettua 1000–1300 asteista ilmaa, joka reagoi koksen hiilen kanssa, jolloin syntyy hiilimonoksidia. Kaasut virtaavat ylöspäin masuunissa ja kuumentavat ja sulattavat raudan. Masuunin yläosassa hiilimonoksidi reagoi rautaoksidien kanssa ja pelkistää niitä. Masuunin alaosassa on kuumempaa ja siellä koksen hiili pystyy suoraan reagoimaan rautaoksidien hapen kanssa ja synnyttämään puhdasta rautaa. Kun raudan lämpötila on noussut masuunin alaosassa yli 1450 asteeseen, se sulaa ja valuu masuunin pesään. Puhdas raakarauta lasketaan masuunista 6–12 kertaa vuorokaudessa. (Teräskirja 2009, 20–23.)



Kuvio 13. Masuuni (Raunio 2008; alkup. Ruukki)

Masuuniin tulee rautaraaka-aineiden mukana jonkin verran sivukiveä, jonka oksidit voivat myös pelkistyä hiilellä ja liueta raakarautaan. Myös pelkistykseen käytetty koksi sisältää epäpuhtauksia, kuten rikkiä, joka myös osittain liukenee rautaan. Ne oksidit, jotka eivät pelkisty, muodostavat kaksin tuhkan ja masuuniin lisättyjen kuonanmuodostajien kanssa kuonan, joka jää kerrokseksi sulan raudan päälle. Kuona poistetaan masuunista raudasta erillään ja sitä voidaan käyttää mm. sementin valmistuksessa ja maan- ja tien rakennuksessa. (Teräskirja 2009, 22–23, 29.)

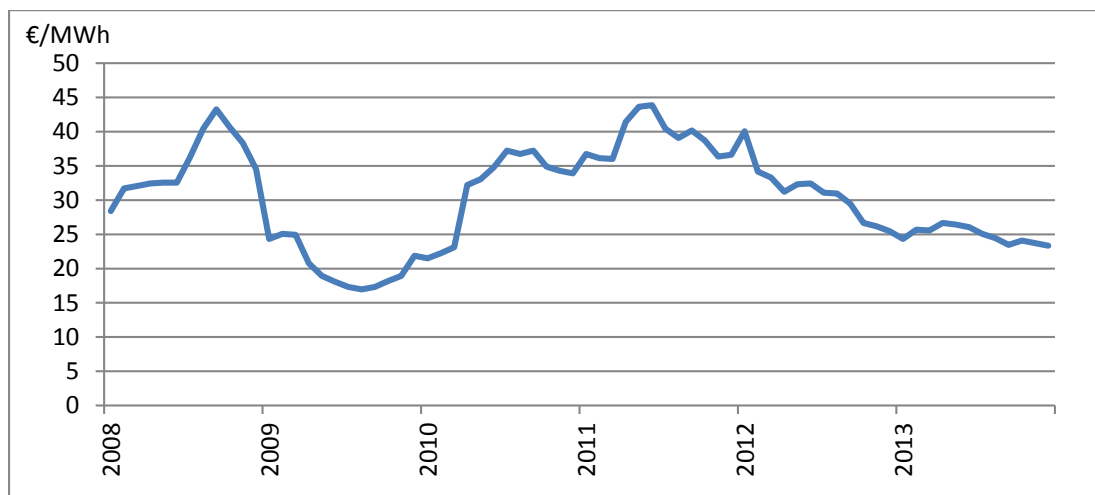
#### 4.2.2 Pelkistimien ominaisuudet ja hinta

Koksi valmistetaan paahtamalla hienoksi jauhattua kivihiiltä hapettomissa olosuhteissa 900–1200 asteissa uunissa (Teräskirja 2009, 30). Koksauksen aikana kivihiili sulaa tai tulee muokattavaksi ja jähmettyy uudelleen masuuniin sopiviksi kappaleiksi. Koksauksen aikana hiilestä haihtuu vetyä, hapetta, typpeä ja rikkiä ja jäljelle jää huokoinen koksi. (Mitchell 2013). Koksauksen kesto on 14–20 tuntia, jonka jälkeen koksattu hiili työnnetään uunista ulos täysin hehkuvana. Koksi täytyy sammuttaa palamisen estämiseksi joko vedellä jäähdytystornissa tai typpikaasulla kuivasammutuslaitteistossa. (Teräskirja 2009, 30.)

Koksin laatuun ja ominaisuuksiin vaikuttaa alkuperäisen kivihiilen ominaisuudet sekä koksauksen prosessi. Yleensä koksiin käytetään usean kivihiililajin sekoitusta, jotta sille saadaan kaikki vaaditut ominaisuudet ja vaadittu laatu. Koksiin käytettävässä hiilessä täytyy olla sopiva osuus reagoivia ja reagoimattomia komponentteja, verrattain alhainen määrä alkalimineraaleja, alhaiset tuhka- ja rikkipitoisuudet ja sen täytyy olla riittävän termoplastinen sitomaan komponentit yhteen eli sen täytyy sulaa tai muuttua muovattavaksi suurissa lämpötiloissa ja muuttua takaisin kiinteäksi lämpötilan laskiessa. (Mitchell 2013.) Metallurgiselta koksilta vaaditaan yleensä alle 10 %:n tuhkapitoisuus, alle 0,7 %:n rikkipitoisuus, alle 0,2 %:n alkalipitoisuus, alle 1 % haihtuvia aineita, hyvä kuumalujuus ja riittävä mekaaninen lujuus iskuja ja hankausta vastaan. Alhainen epäpuhtauspitoisuus on tärkeä valmistuvan raudan puhtauden kannalta ja kuumalujuutta ja mekaanista lujuutta tarvitaan masuunissa, jotta koksi ei hajoa rautaraaka-aineiden alla masuunissa. (Teräskirja 2009, 30.)

Koksin käyttöä raakaraudan valmistuksessa on pyritty vähentämään korvaamalla sitä kivihiilijauheella, maakaasulla tai öljyllä. Korvaajat syötetään masuuniin alhaalta yhdessä puhallusilman kanssa. Erilaisia kivihiililajeja energiasisällöltään matalasta ruskohiilestä korkean lämpöarvon omaaviin antrasiitteihin on kokeiltu koksin korvaamiseen. Kivihiililajin valintaan vaikuttaa eniten hinta ja saatavuus eikä niinkään lämpöarvo tai se, kuinka paljon kyseisellä kivihiililaadulla voidaan koksia korvata. Jos hintaero hiililaaduilla ei ole merkittävä valintaan vaikuttaa hiilen tuhkapitoisuus, haihtuvien aineiden määrä, kosteus ja hiilen jauhautumisominaisuudet. Injektoitavan kivihiilen tuhkapitoisuuden tulisi olla mahdollisimman pieni, yleensä alle 10 %. Tuhka vaikeuttaa hiilen jauhautumista ja masuunissa se jää kuonaksi raakaraudan pinnalle. Samoja ongelmia aiheuttavat hiilen korkeat rikki- ja alkalipitoisuudet. Haihtuvien aineiden määrä saa olla injektoitavassa hiilessä korkea, koska haihtuvat aineet edistävät hiilen palamista täydellisesti ja täten vähentävät masuunikaasujen hiukkas- ja pölymäärää. Injektoitavan hiilen kosteuspuitoisuuden tulisi kuitenkin olla mahdollisimman pieni. Kosteus hankaloittaa hiilen jauhamista ja sen haihtuminen masuunissa vaatii ylimääräistä energiaa. (Mitchell 2013.) Pelkistimiä tarvitaan raakaraudan tuotannossa paljon, jopa 450–550 kg yhtä rautatonna kohden (Järvinen 2009).

Koksia korvaavan kivihiilen hinta on samaa suuruusluokkaa sähköntuottajien maksaman verottoman kivihiilen kanssa. Koksia korvaavat heikompilaatuiset kivihiilet tai ruskohiilet voivat olla hinnaltaan edullisempiakin. Koksin hintakehitys Euroopassa on esitetty kuviossa 14. Jos koksia tuotetaan masuunin läheisyydessä, voivat tuotantokustannukset olla matalammat.



Kuvio 14. Koksin hinta Euroopassa (Tiedot lähteestä Met Coke Prices 2014)

### 4.2.3 Muiden pelkistimien käyttö masuunissa

Suopajärvi (2013a, 19) on tutkinut jalostettujen biomassojen käyttöä raakaraudan pelkistiminä. Hän on vertaillut mm. puuhiilen eli pyrolyysikäsitellyn biomassan, torrefioidun biomassan, bioöljyn ja synteesikaasun käyttömahdollisuuksia masuuniin injektoitavina pelkistiminä. Suopajärvi on tehnyt simulointitutkimuksen eri biojalosteiden soveltuvuudesta pelkistimeksi. Simuloinnissa käytettiin kahta eritavalla torrefioitua hakkuujätettä, joista toinen oli torrefioitu 250 asteessa ja toinen 300 asteessa. Ensimmäisen näytteen käytöllä oli negatiivinen vaikutus masuunin toimintaan, johtuen sen korkeasta happipitoisuudesta ja matalasta lämpöarvosta. Toisen näytteen happipitoisuus oli matalampi ja lämpöarvo suurempi ja sen käyttö vaikutti mahdolliselta, jos hinta olisi sopiva, tosin sekin aiheutti pieniä negatiivisia vaikutuksia mm. lisäämällä pelkistimien ominaiskulutusta masuunissa.

Suopajärvi, Iljana ja Haapakangas (2013, 55–62) ovat tehneet kokeita koksen valmistukseen käytettävän kivihiilen korvaamisesta puuhiilellä ja torrefioidulla biomassalla. Kokeissa valmistettujen koksen kylmälujuutta ja reaktiivisuutta verrattiin pelkästä kivihiilestä tehtyyn koksiin. Torrefioituna biomassana käytettiin 240 °C:ssa paahdettua metsähaketta, joka oli peltoitu torrefioinnin jälkeen. Kokeessa biohiilipelleteistä ja kivihiilestä tehtiin kahta koksia, jossa toisessa biohiiltä oli 5 % ja toisessa 10 %. Vertailun perusteella koksen kylmälujuus laskee, mitä enemmän biohiiltä seoksessa on. Bio- ja kivihiilestä valmistetun koksen kylmälujuus oli jopa huonompi kuin puu- ja kivihiilestä tehdyillä kokseilla. Kokeen mukaan biokoksen reaktiivisuus oli useassa tapauksessa parempi kuin tavallisen koksen, mikä lisää koksen palamisnopeutta masuunissa. Bio- ja kivihiilestä tehdyillä kokseilla reaktiivisuus oli kuitenkin samaa luokkaa tavallisen koksen kanssa. Suopajärven kokeiden mukaan biohiilen käyttö koksen teossa huonontaa koksen laatua.

Metallurgisiin prosesseihin soveltuvan koksen valmistamista pelkästään biomassoista on myös tutkittu ja erilaisille prosesseille on haettu patentteja. Esimerkiksi Outotec on patentoinut prosessin, jossa puiden kannoista valmistetaan hiilettämällä biokoksia. Kannot murskataan ja kuivataan ennen hiiletystä, mutta muuta esikäsittelyä niille ei tehdä. (Pat. WO2012/164162 2012).

#### 4.2.4 Raakaraudan tuotantomäärä

Suomessa koksia on käytetty 2000-luvulla vuosittain noin 7 000 GWh eli 850 000 tonnia. Tähän lukuun on otettu huomioon masuunikäytön lisäksi myös koksen muu teollinen käyttö. (Energian kokonaiskulutus energialähteittäin 2013.) Suomen ainoat raakarautaa tuottavat masuunit sijaitsevat Ruukin tehtaalla Raahessa. Masuuneissa on tällä hetkellä käytössä öljyinjektiolaitteisto, mutta ne tullaan vaihtamaan hiiliinjektiolaitteistoihin lähitulevaisuudessa. Investoinnin suuruudeksi on arvioitu noin 65 miljoonaa euroa ja se sisältää hiilen varastointi-, käsittely-, kuivaus- ja jauhatuslaitteistot. (Ruukki parantaa Raahen terästehtaan kustannustehokkuutta... 2014.) Raahen tehtaalla tuotettiin vuonna 2011 n. 2,2 miljoonaa tonnia terästä. Tästä määrästä reilu viidennes tehtiin kuitenkin kierrätysteräksestä, jolloin valmistusprosessiin ei tarvittu koksia. (Ympäristökatsaus 2011.)

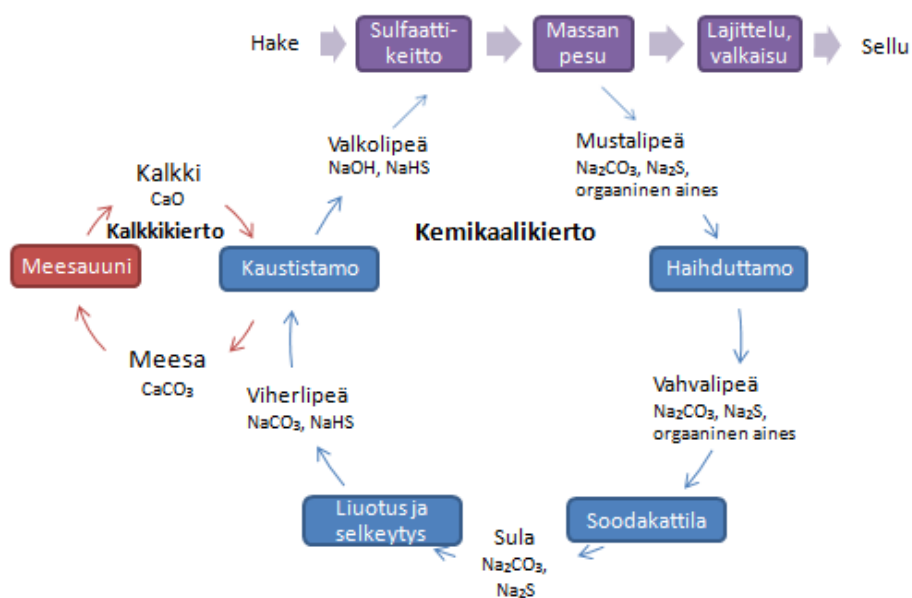
Muualla maailmassa raakaraudan tuotantomäärät ovat lähes kaksinkertaistuneet viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana. Vuonna 2003 raakarautaa tuotettiin maailmassa noin 670 miljoonaa tonnia ja vuonna 2012 yli 1 180 miljoonaa tonnia. Masuunissa raakarautaa tuotettiin näistä määristä molempina vuosina 93–94 prosenttia. Lähes kaikki uusi raakaraudantuotanto tapahtuu Aasiassa, pääasiassa Kiinassa, jossa valmistettiin vuonna 2012 yli puolet maailman raakaraudasta. Euroopan unionin alueella raakaraudantuotanto on vähentynyt. Vuonna 2003 raakarautaa tuotettiin vielä lähes 113 miljoonaa tonnia, mutta vuonna 2012 tuotantomäärä oli enää alle 92 miljoonaa tonnia. (Steel Statistical Yearbook 2013, 89–91.) Koksia käytettiin Euroopan unionin alueella vuonna 2012 noin 34 Mt (Coal consumption statistics 2013).

### 4.3 Selluteollisuus

Selluteollisuudessa suurin osa tarvittavasta energiasta tuotetaan laitoksella syntyvillä sivutuotteilla. Fossiilisia polttoaineita käytetään kuitenkin kalkkikierron meesauunissa, jossa kemikaaleja muutetaan lämmön avulla sellun valmistusprosesseissa uudelleen käytettävään muotoon.

#### 4.3.1 Selluntehtaan kemikaali- ja kalkkikierto

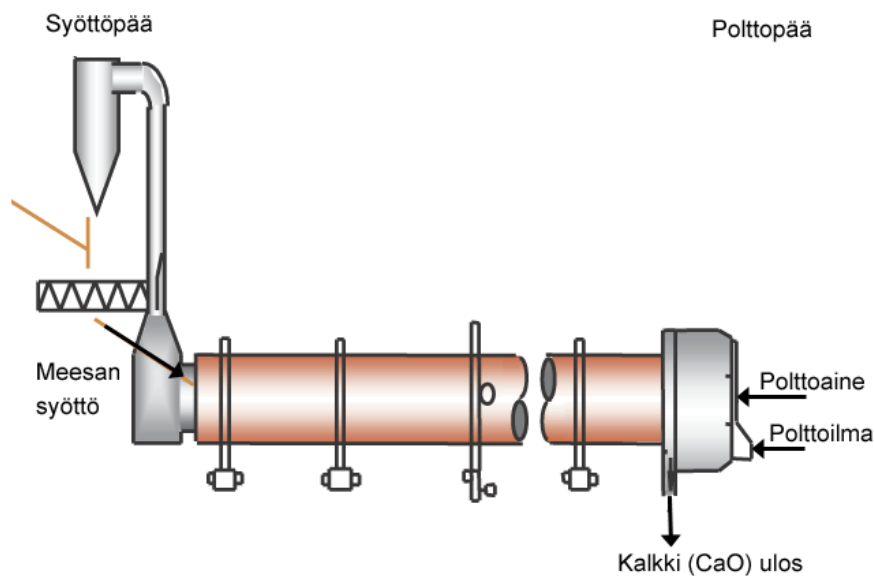
Sellua valmistetaan keittämällä puuraaka-ainetta alkalisessa liuoksessa, jota kutsutaan valkolipeäksi. Keiton tarkoitus on poistaa puukuituja toisiinsa sitova ligniini. Keitossa käytetyt kemikaalit muutetaan uudelleen käytettävään muotoon kemikaalikierrossa, ja keittokemikaaleihin liennut orgaaninen aines käytetään energiantuotantoon. Kuviossa 15 on esitetty selluntuotantoprosessi ja kemikaalikierto. (Klemetti, Kortelainen, Lytikäinen, Siitonen & Sironen 2001, 75–167.)



**Kuvio 15. Sellunvalmistuksen kemikaali- ja kalkkikierrat**

Yksi kemikaalikierron osa on kalkkikierto, jossa kaustisointiprosessissa tarvittavaa kalkkia tuotetaan kalsiumkarbonaateista lämmön avulla meesauunissa. Meesauuni, joka on esitetty kuviossa 16, on sylinterin muotoinen hieman kaltevasti vaakatasossa oleva tiilillä vuorattu teräsrakenne, joka pyörii 0,5–1,5 kierrosta minuutissa. Se on läpimitaltaan 2–4 metriä ja pituudeltaan 20–150 metriä. Meesa eli kaustisoinnissa syntynyt kalsiumkarbonaattia sisältävä aine syötetään meesauuniin sen korkeammalla olevasta syöttöpäädystä, josta se valuu uunin pyöriessä kohti uunin alemmaa päätä eli polttopäätä. Uunin polttopäässä palaa polttoaine, joka on yleensä maakaasu tai polttoöljy, ja savukaasut ohjataan kulkemaan meesan kanssa vastakkaisiin suuntiin. Palamiskaasut kuivattavat ja lämmittävät meesaa. Meesauunista voidaan erottaa neljä eri vyöhykettä syöttöpäädystä alkaen: kuivaus-, lämmitys-, reaktio- ja loppu-

käsittelyvyöhyke. Kuivausvyöhykkeellä vesi haihtuu ja lämmitysvyöhykkeellä kuivanut meesa lämpenee reaktiolämpötilaan. Kalsiumkarbonaatti hajoaa n. 900 °C:n lämpötilassa, mutta jotta hajoamisnopeus olisi tarpeeksi suuri, reaktiovyöhykkeen lämpötila pidetään n. 1 100 asteessa pitkissä uunissa ja lyhyemmissä n. 1 300 asteessa. Reaktiovyöhykkeessä kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksideiksi ja hiilidioksidiksi. Tämän jälkeen kalkki jäähdytetään, siirretään kalkkisiiloon ja ohjataan käytettäväksi uudelleen kaustisoinnissa. Kalkkikierron kaikkea kalkkia ei saada talteen, joten sitä joudutaan korvaamaan prosessin ulkopuolelta tuodulla kalkilla. Korvauskalkki sekoitetaan yleensä meesauunilla tuotettuun kalkkiin. (KnowPulp 2013; Klemetti, Kortelainen, Lyytikäinen, Siitonen ja Sironen 2001, 167.)



**Kuvio 16. Meesauuni (KnowPulp 2013)**

#### 4.3.2 Meesauunin polttoaineiden ominaisuudet ja hinta

Meesauunissa lämpö siirtyy liekistä meesaan lähinnä säteilemällä, joten polttoaineelta vaaditaan korkea palamislämpötila. Lisäksi lämpötilan täytyy pysyä vakaana ja olla helposti säädettävä, joten polttoaineen on oltava tasalaatuista. Lähes kaikissa meesauuneissa käytetään polttoaineena polttoöljyä tai maakaasua, joiden palamislämpötilat ovat korkeat ja lämpöarvot tasaiset. Polttoöljyn ja maakaasun ominaisuuksia on esitetty taulukossa 7. Näiden lisäksi polttoaineena voidaan käyttää sellutehtaan prosesseissa sivutuotteina syntyviä metanolia, mäntyöljyä ja hajukaasuja. Mäntyöljyn

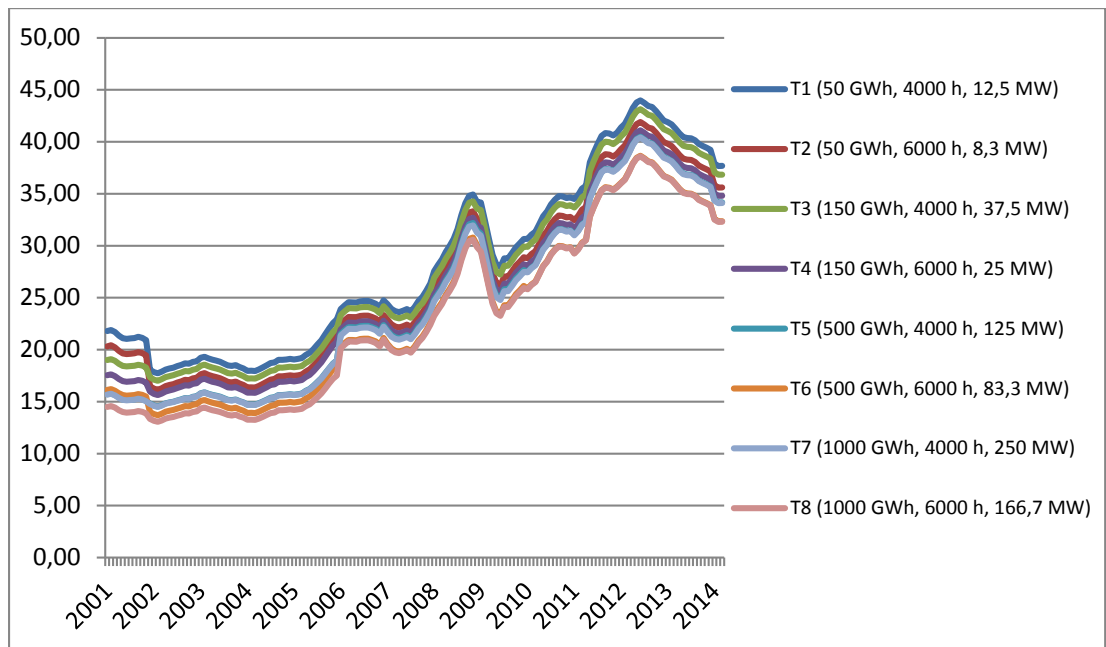
käyttö onnistuu samoilla laitteistoilla polttoöljyn kanssa, mutta metanoli vaatii oman polttimen. Nestemäisillä polttoaineilla voidaan korvata polttoöljyn käyttö jopa kokonaan. Hajukaasujen käyttö taas onnistuu vain pieninä osuuksina polttoaineseoksessa, sillä niiden kuljettamiseen käytetty höyry aiheuttaa ongelmia poltossa. (Arpalahti, Engdahl, Jäntti, Kiiskilä, Liiri, Pekkinen, Puumalainen, Sankala & Vehmaan-Kreula 1999, 190–192).

**Taulukko 7. Polttoöljyn ja maakaasun tyypillisiä ominaisuuksia (Arpalahti ym. 1999, 191)**

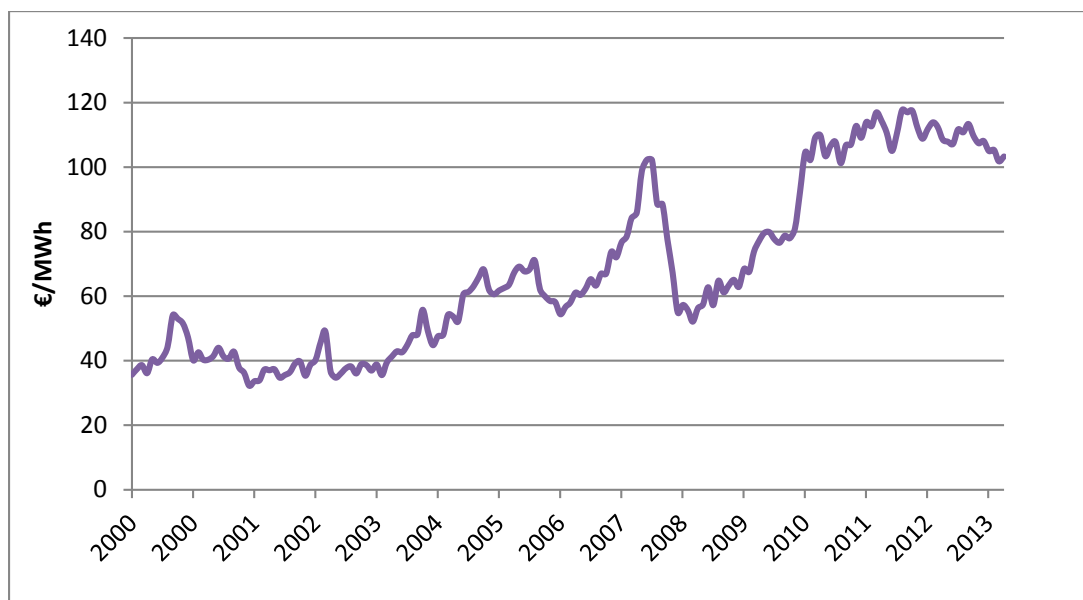
	Polttoöljy	Maakaasu
Lämpöarvo (MJ/kg)	40,7	48,9
Kosteus (p-%)	0,3	-
Hiili C (p-%)	85,8	73,9
Vety H (p-%)	11,2	24,5
Rikki S (p-%)	2,4	0
Happi O (p-%)	-	0,1
Typpi N (p-%)	0,8	1,5
Tuhka (p-%)	0,04	0

Maakaasun hintakehitystä on esitetty kuviossa 17 kuluttajatyypin mukaan. Maakaasun hinta sellutehtaalle riippuu polttoaineen tarpeen suuruudesta, mutta voidaan olettaa olevan n. 35 €/MWh. Kuviossa 18 on kuvattu kevyen polttoöljyn kuluttajahinnan kehitys. Kuluttajahinta sisältää polttoaine- ja arvonlisäveron sekä kuljetuksen asiakkaan säiliöön. Polttoainevero on kiinteä, ja vuonna 2014 se on 16,31 €/MWh. Arvonlisävero on 24 % polttoöljyn ja polttoaineveron summasta. (Lämmitysöljyn verotus 2014.) Sellutehtaiden ei tarvitse maksaa polttoaineveroa käyttämästään polttoaineesta. Polttoaineesta maksettu arvonlisävero taas voidaan siirtää tuotetun sellun hintaan (Arvonlisäverotus 2014). Polttoöljyn hinta sellutehtaille saadaan siis vähentämällä kuluttajahinnasta nämä verot.





**Kuvio 17. Maakaasun hinta kuluttajatyypin mukaan (Maakaasun hintatilastot 2014)**



**Kuvio 18. Kevyen polttoöljyn kuluttajahinta (Öljytuotteiden kuluttajahintojen kehitys 2013)**

Nestemäisten ja kaasumaisten sivutuotteiden lisäksi meesauunissa on mahdollista käyttää myös kiinteitä polttoaineita. Kiinteiden polttoaineiden valintaan täytyy kuitenkin kiinnittää huomiota, sillä ne voivat aiheuttaa erilaisia ongelmia. Suurin ongelma on kiinteiden polttoaineiden tuhka, jonka sisältämät aineet vaikuttavat meesauunin toimintaan, saatavan kalkin ominaisuuksiin ja sellutehtaan muihin prosesseihin. Haitallisimmat tuhkan mukana tulevat aineet ovat alumiini, pii, fosfori ja magnesium,

joita esimerkiksi kivihiilen tuhka sisältää niin paljon, ettei sitä voida käyttää meesaunin polttoaineena. Puuperäiset biopolttoaineet sisältävät huomattavasti vähemmän tuhkaa, tosin sen määrä ja koostumus riippuvat puulajista. Puupolttoaineissa ongelmaksi muodostuu kuitenkin suuri kosteuspitoisuus, joka hankaloittaa palamisen hallintaa. Suuri kosteuspitoisuus laskee liekin lämpötilaa ja vähentää lämmön siirtymistä meesaan. Tämä johtaa kalkinsaannon vähenemiseen. Jotta puupolttoaineita voitaisiin käyttää, ne täytyy kuivata alle 15 %:n kosteuspitoisuuteen, jolloin liekin lämpötila pysyy tarpeeksi korkealla, vaikka ei kuitenkaan yhtä korkealla kuin öljyä käyttäessä. Puupolttoaineita käytetään yleensä joko kuivattuna ja jauhattuna tai kaasutettuna. Kuivatussa ja jauhetussa puussa on edelleen sama määrä tuhkaa kuin raakapuussa, kun taas kaasutetusta puusta osa tuhkasta voidaan erottaa kaasuttimessa tai kaasutuksen jälkeen. (Arpalahti ym. 1999, 193.)

#### 4.3.3 Muiden polttoaineiden käyttö meesauuneissa

Wadsborn, Berglin ja Richards (2007) ovat keränneet tietoa biopolttoaineiden käytöstä meesauuneissa ruotsalaisilta sellutehtailta. Kyselyssä haluttiin kartoittaa, mitä polttoaineita meesauuneissa voidaan käyttää ja millaisia vaikutuksia niillä on uunin toimintaan ja kemikaalikiertoon. Tutkimuksessa on tarkemmin perehdytty viiteen ruotsalaiseen sellutehtaaseen, joista kolme käyttää meesaunin polttoaineena puun kuorta ja/tai sahanpurua kaasutettuna ja kaksi jauhattuna. Puun käyttö näillä sellutehtailta on aiheuttanut jonkin verran ongelmia. Ensimmäiset ongelmat aiheutuvat puuaineksen säilytyksestä ja jalostuksesta. Varastoissa ja kuivurissa on ollut tulipaloja ja jauhatus- ja kaasutuslaitteistoissa ongelmia, joiden vuoksi polttoainetta ei ole aina ollut saatavilla. Puuperäisillä polttoaineilla on kuitenkin pystytty korvaamaan 35–60 % vuosittaisesta öljyn käytöstä. Lisäksi ongelmia on syntynyt meesauniin, sillä kaksi tehdasta on ilmoittanut toistuvista renkaanmuodostumisista ja kolme tehdasta vuoden aikana useasti tarvittavista uunin vuorauksen korjauksista. Päästöjen lisääntymisen osalta tehtaiden vastaukset vaihtelevat. Puuperäisiä polttoaineita käyttäessä kolmella tehtaalla on huomattu suurempia typpioksidipäästöjä, kahdella tehtaalla suurempia häkäpäästöjä ja yhdellä tehtaalla suurempia rikkidioksidipäästöjä. Puupolttoaineiden käyttö on vaikuttanut myös tehtaiden tuottaman kalkin laatuun, sillä kolme tehtaista on ilmoittanut kalkin väri- ja laatumuutoksista. Prosessiin kuulumat-

tomien aineiden määrä on noussut neljällä tehtaalla, tosin vain yksi tehdas on raportoinnut korkeista epäpuhtausmääristä. Mihinkään vastauksista ei näytä vaikuttavan käyttäkö tehdas kaasutettua vai jauhattua puuta, vaan ongelmat ovat laitokohtaisia ja riippuvat laitoksen muuntautumiskyvystä.

#### 4.3.4 Sellun tuotantokapasiteetti

Taulukossa 8 on listattuna Suomen sellutehtaat ja niiden vuosittainen tuotantokapasiteetti. Tuotantokapasiteetti on yhteensä n. 7,5 miljoonaa tonnia. Meesauuni tarvitsee polttoainetta noin 0,6 MWh tuottaakseen yhden sellutonnin tarvitseman määrän kalkkia (Hiltunen 2009, 28; Benchmarking Energy Use in Canadian Pulp and Paper Mills 2008, 17). Näin ollen Suomen sellutehtaiden meesauunit tarvitsevat polttoainetta noin 4 500 GWh vuodessa. Suomen meesauunien polttoaineen käyttö voidaan karkeasti jakaa niin, että maakaasuverkon alueella olevat tehtaat käyttävät maakaasua ja muut polttoöljyä. Tällä jaolla Suomen sellutehtaat käyttävät maakaasua noin 2 000 GWh ja polttoöljyä noin 2500 GWh.

**Taulukko 8. Suomen sellutehtaat**

Laitos	Omistaja	Tuotantokapasiteetti (t/a)
Enocell	Stora Enso	450 000
Heinola	Stora Enso	265 000
Joutseno	Metsä Fibre	690 000
Kaukas	UPM	740 000
Kaukopää	Stora Enso	800 000
Kemi	Metsä Fibre	590 000
Kymi	UPM	530 000
Oulu	Stora Enso	360 000
Rauma	Metsä Fibre	650 000
Sunila	Stora Enso	370 000
Tainionkoski	Stora Enso	180 000
Varkaus	Stora Enso	225 000
Veitsiluoto	Stora Enso	375 000
Wisaforest	UPM	790 000
Äänekoski	Metsä Fibre	530 000

Tiedot lähteistä: UPM 2014; Stora Enso 2013; Metsä Fibre 2014.

## 5 Biohiilen soveltuvuus käyttökohteisiin

Tutkimuksessa on oletettu, että biohiiltä ei tuoteta käyttöpaikan läheisyydessä, vaan se kuljetetaan pelletteinä käyttöpaikalle. Biohiilipellettien käyttömahdollisuuksia eri teollisuudenaloilla on selvitetty vertaamalla niiden ominaisuuksia käsitellyissä prosesseissa yleisesti käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksiin ja arvioimalla niiden soveltuvuutta käytettyihin laitteistoihin. Teollisuudenalojen maksukyvyyn suuruutta on arvioitu yleisesti käytössä olevan poltto-aineen tai pelkistimen hinnan, päästöi-keuden hinnan ja biopolttoaineen käytölle saatavien tukien perusteella. Biohiilipellet- tien ominaisuuksia ja hinta-arvioita on esitelty luvussa kolme. Muiden polttoaineiden ominaisuuksia ja hintatietoja on esitelty teollisuudenalojen omissa luvuissa.

### 5.1 Energiateollisuus

Biohiilipelletit soveltuvat käytettäväksi monipolttoainekattiloissa ilman muutoksia laitteistoissa, koska ne on suunniteltu käyttämään myös biomassoja. Biohiilipellettien käyttö voisi mahdollistaa biomassojen kuljettamisen voimalaitokselle pidempien matkojen päästä, sillä suuremman energiatihyden ansiosta biohiilipellettien kulje- tuskustannukset energiamäärää kohden ovat pienemmät. Biohiilipellettien soveltu- vuutta monipolttoainekattiloihin ei kuitenkaan tarkastella enempää, vaan seuraavis- sa tarkasteluissa keskitytään biohiilen soveltuvuuteen pölypolttokattiloihin, joissa sillä on mahdollista alentaa suuresta kivihiilen käytöstä johtuvia päästöjä.

Kivihiiltä käytetään sähkön- ja lämmöntuotannossa suuria määriä. 2010-luvulla kivi- hiiltä on käytetty Suomessa vuosittain 23–39 TWh. Kivihiiltä käyttävät kattilat ovat teholtaan suuria, joten yhdenkin laitoksen muutos biohiilipellettejä polttoaineseok- sessaan osittain käytettäväksi vaatisi jo suuren määrän pellettejä. Jos esimerkiksi polt- toaineteholtaan 500 MW:n kattila, joka on käytössä 5000 tuntia vuodessa, pystyisi vaihtamaan 25–50 % polttoaineestaan biohiilipelletteihin, pellettejä tarvittaisiin vuo-

dessa 625–1 250 GWh eli 94 000–225 000 tonnia biohiilipellettien lämpöarvosta riippuen.

### 5.1.1 Biohiilipellettien tekninen soveltuvuus

Biohiilipellettien käyttö pölypolttokattiloissa ei ole ongelmattonta, koska ne on suunniteltu usein käyttämään pelkästään kivihiiltä. Polttoaineen tekniseen käytettävyyteen pölypolttokattiloissa vaikuttavat kosteus, lämpöarvo, haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen määrät, jauhautuvuus, haitalliset aineet ja tuhkan ominaisuudet. Lisäksi kivihiilen korvaamismahdollisuuksiin vaikuttaa biohiilipellettien kuljetus-, varastointi- ja käsittelyominaisuudet. Seuraavaksi biohiilipellettien ominaisuuksia verrataan kivihiilen ominaisuuksiin, joita on esitetty luvussa 4.1.2.

Torrefioitujen biohiilipellettien kosteuspitoisuus on huomattavasti pienempi kuin kivihiilen. Kivihiiltä joudutaankin usein kuivaamaan ennen kattilaan syöttämistä, jotta vältetään kosteuden aiheuttamilta puhallusputkien tukkeutumiselta. Koska biohiilipelletit ovat valmiiksi kuivempia, niitä ei todennäköisesti tarvitse enää kuivata ennen kattilaan syöttöä. Tämä säästää kuivaukseen käytettävä energiaa. Toisaalta biohiilipellettien pienempi lämpöarvo aiheuttaa suuremman massavirran tarpeen, joka lisää myllyn, kuljettimien ja syöttölaitteistojen energiankäyttöä. Biohiilipelleteissä on enemmän haihtuvia aineita kuin kivihiilessä ja vastaavasti vähemmän kiinteää hiiltä. Biohiilipellettien suuremman haihtuvien aineiden määrän ansiosta ne syttyvät matalammissa lämpötiloissa kuin kivihiili ja palavat nopeammin ja täydellisemmin. Korkeamman syttymislämpötilan omaavat polttoaineet pitää jauhaa hienommaksi, jotta ne ehtivät palaa täydellisesti tulipesässä. Tämä tarkoittaa, että biohiilipellettejä ei välttämättä tarvitse jauhaa yhtä hienoksi kuin kivihiiltä. Kuitenkin jos halutaan päästä pienimmillä laitteistoinvestoinneilla, kivihiili ja biohiilipelletit jauhetaan samassa myllyssä yhtä hienoksi.

Biohiilipelletit sisältävät kivihiiltä vähemmän haitallisia aineita, kuten rikkiä ja typpeä. Eli biohiilipellettien poltosta syntyy vähemmän ympäristölle haitallisia yhdisteitä. Biohiilipelletit sisältävät tuhkaa vähemmän kuin kivihiili, eli polttoprosessissa kattilaan jää vähemmän pohjatuhkaa ja savukaasuihin vähemmän lentotuhkaa. Biohiili-

pellettien tuhkan koostumus on kuitenkin erilainen kuin kivihiilen ja tästä johtuen sen sulamiskäyttäytyminen on erilaista. Biohiilipellettien tuhkan muodonmuutos- ja sulamislämpötilat ovat alempia kuin kivihiilen. Tämä tarkoittaa, että tuhka voi olla biohiilipellettejä käyttäessä eri olomuodossa, kuin pelkkää kivihiiltä käyttäessä. Jos kattilan tuhka poistetaan kuivana, kattilan lämpötila ei saa ylittää biohiilipellettien tuhkan sulamispistettä. Alempi tuhkan muodonmuutos- ja sulamispiste tarkoittaa myös sitä, että kattilan pintoihin tarttuu tuhkaa jo alemmissa lämpötiloissa eli kuo- naantumis- ja korroosioriskit kasvavat.

Biohiilipelletit eroavat kivihiilestä vedenhylkimisominaisuudeltaan. Biohiilipelletit eivät ole täysin vettä hylkiviä, joten niitä ei voida säilyttää ulkona, kuten kivihiiltä. Pelletit vaativatkin oman varastorakennuksen ja sieltä omat kuljetuslaitteistot kivihiilimyllylle.

Anttilan (2012) mukaan biohiilipellettien ja kivihiilen yhteispolttokokeissa todistettiin, että biohiilipellettejä käyttämällä laitoksen päästöt pienenevät. Jauhautuvuusteissa huomattiin, että biohiilipellettien jauhautuvuus oli huonompi kuin kivihiilen, mutta se ei vaikuttanut polton tehokkuuteen. Jukola ja Huttunen (2013) puolestaan olettivat kivihiilen jauhautuvuuden huononevat, kun sitä jauhetaan samoissa myllyissä biohiilipellettien kanssa. Tämä aiheutti sen, että vaikka biohiilipellettejä käytettäessä tuhkan määrä laski, lentotuhkassa oli suurempi määrä palamattomia aineksia. Eli kivihiili jäi myllyissä niin suureksi, ettei se ehtinyt palaa kokonaan kattilassa. Jukolan ja Huttusen mukaan kattilasta poistuvien kaasujen lämpötila kasvaa biohiilipellettejä käytettäessä, joka voi aiheuttaa tulistimen alueelle korroosioriskin, jos biohiilipellettien tuhka tarttuu sen pintaan. Heidän mukaansa tämä ongelma voitaisiin torjua jauhamalla kivihiili ja biohiili erillisissä myllyissä, jolloin kivihiili palaisi kokonaan kattilassa ja enemmän lämpöä siirtyisi höyrystimeen eikä savukaasujen mukana tulistimelle.

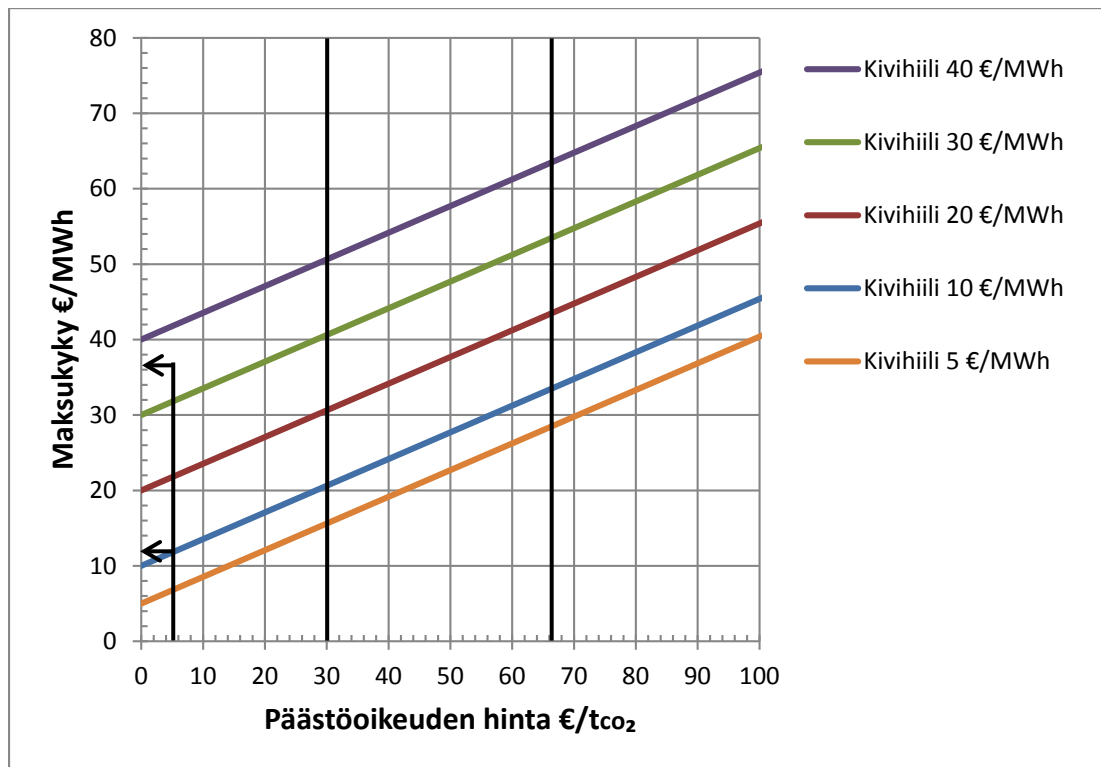
Biohiilipellettien ja kivihiilen ominaisuuksia vertailemalla saadut tulokset ovat samansuuntaisia muiden tekemien testien ja simulaatioiden kanssa. Biohiilipellettien jauhautuvuusominaisuudet eivät kuitenkaan ole kaikissa testeissä olleet samanlaisia. Anttilan (2012) mukaan biohiilipellettien jauhautuvuus on huonompi kuin kivihiilen,

tosin se ei vaikuttanut testeissä polton tehokkuuteen. Jukolan ja Huttusen (2013) mukaan taas kivihiilen jauhautuvuus huononee, kun sitä jauhetaan samoissa myllyissä kivihiilen kanssa. Biohiilipellettien jauhautuvuusominaisuuksia täytyykin tarkastella enemmän, ennen kuin niitä voidaan käyttää suurempina määrinä voimalaitoksissa. Se, voidaanko biohiilipellettejä käyttää samoissa laitteistoissa kivihiilen kanssa, vaikuttaa biohiilipellettien käytön aloittamisesta aiheutuviin kustannuksiin. Oletettavaa on kuitenkin, että biohiilipellettien käyttö on mahdollista kivihiilen kanssa pölypolttokattiloissa, kun huomioidaan tarkasti sen tuhkan käyttäytymisominaisuudet. Biohiilipellettien käyttö todennäköisesti lisää laitoksen omakäyttöenergian määrää, koska sen alhaisemman lämpöarvon takia laitteistojen pitää kuljettaa sitä massaltaan suurempia määriä. Toisaalta polttoaineen kuivaamiseen tarvittava energiamäärä voi laskea.

### 5.1.2 Energiateollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä

#### **Päästöoikeuden ja kivihiilen hinnan vaikutus**

Hintaan, jonka energiateollisuus pystyy maksamaan biohiilipelleteistä, vaikuttaa korvattavan kivihiilen hinta ja siitä maksettavien päästöoikeuksien hinta. Kuviossa 19 on esitetty energiateollisuuden maksukyky eri kivihiilen ja päästöoikeuden hinnalla. Kuviossa päästöoikeuden hinta on vaaka-akselilla ja kivihiilen eri hintoja on esitetty värikkäillä suorilla. Maksukyky voi lukea pystyakselilta päästöoikeuden ja kivihiilen hinnan perusteella. Kuvioon on merkitty nuolella maksukyky tämän hetkisen päästöoikeuden ja sähkön- ja lämmöntuottajien maksaman kivihiilen hinnan perusteella. Alempi nuoli osoittaa sähkön erillistuotannon tämän hetkisen maksukykyyn ja ylempi lämmön erillistuotannon maksukykyyn. Yhteistuotantolaitosten maksukyky jää erillistuotantojen maksukykyjen väliin. Kuvioon on lisäksi merkitty pystyviivoilla luvussa 2.4 esitetyt arviot päästöoikeuden hinnasta.

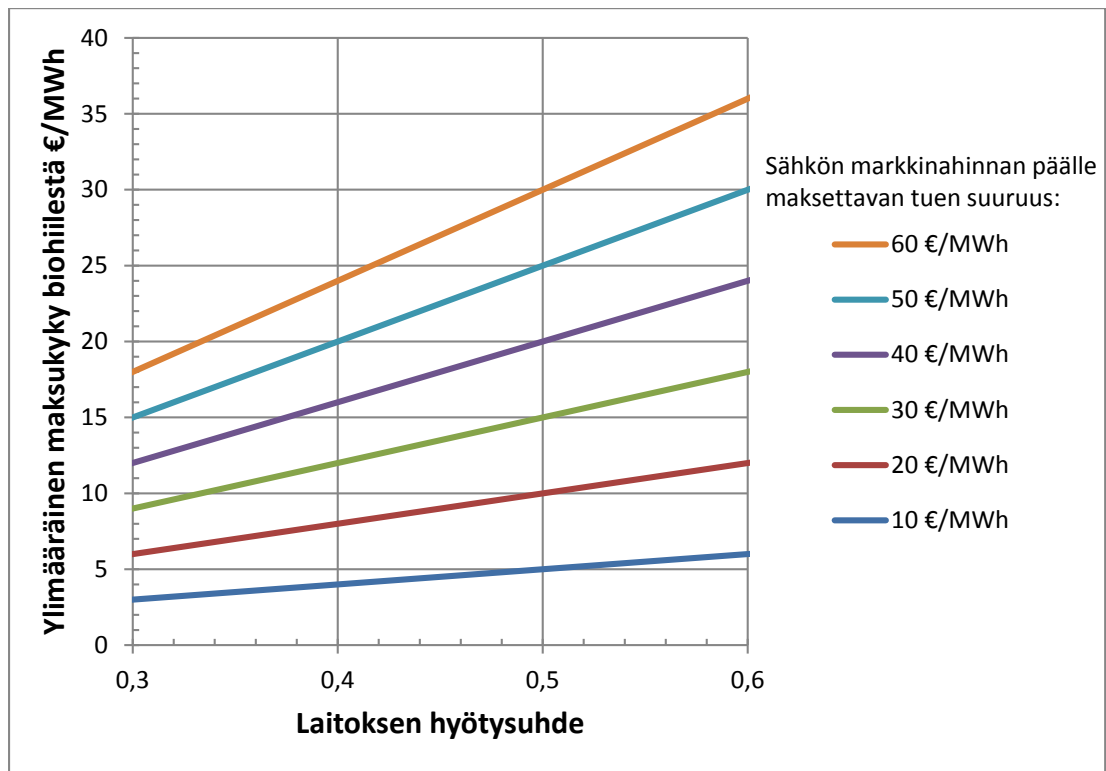


**Kuvio 19. Päästöoikeuden ja kivihiilen hinnan vaikutus energiateollisuuden maksukykyyn**

### Tukien vaikutus

Energiateollisuuden maksukykyä arvioidessa huomioon voidaan ottaa myös uusiutuvan sähkön tuotannolle saatavat suorat tuotantotuet ja uusiutuvan lämmön tuotannon saamat epäsuorat tuet verohelpotuksien muodossa. Kuviossa 20 on esitetty sähkön markkinahinnan päälle maksettavien syöttöpreemioiden ja vihreiden sertifikaattien vaikutus biohiilipellesteistä maksettavaan hintaan pelkkää sähköä tuottavilla laitoksilla. Uusiutuvan sähkön tuotantotuet maksetaan tuotetun sähkömäärän mukaan, jolloin niiden vaikutus maksukykyyn polttoaineesta riippuu laitoksen hyötysuhteesta. Vaaka-akselilla onkin laitoksen sähköntuotannon hyötysuhde, värillisillä suorilla on kuvattu tuotantotukien suuruutta ja hyötysuhteen ja oikean suuruisen tuen leikkauskohdasta voidaan lukea pystyakselilta ylimääräinen maksukyky. Käytännössä osa tuotantotuista menee kuitenkin biomassan käytöstä aiheutuviin ylimääräisiin käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin ja mahdollisiin laiteinvestointeihin, joten tuki ei ole täysin käytettävissä polttoaineen hankintaan.





**Kuvio 20. Syöttöpreemioiden ja vihreiden sertifikaattien vaikutus maksukykyyn biohiilestä**

Jos laitos on oikeutettu syöttötariffiin eli takuuhintaan uusiutuvasta sähköstä, sen maksukyky biohiilipelleteistä on vaikeampi arvioida. Syöttötariffin kuuluisi kattaa kaikki laitoksen kulut, eli polttoaineen osuus on vain osa siitä. Ylimääräisestä maksukykyä voidaan kuitenkin saada suuntaa-antava arvio vähentämällä tariffin suuruudesta sähkön markkinahinta ja käyttämällä saatua arvoa kuvion 20 sähkön markkinahinnan päälle maksettavana tukena.

Lämmöntuotantoa tuetaan usein verohelpotuksilla. Eli se kuinka paljon kivihiilen hintaa suurempi maksukyky biohiilelle on, riippuu kivihiilestä maksettavasta verosta. Erillisen lämmöntuotantolaitoksen maksukykyä biohiilelle voidaan arvioida kuvioista 19 valitsemalla kivihiilen hinnaksi sen verollinen hinta. Lämmöntuotannon maksukykyä arvioidessa on kuitenkin huomioitava, että se on oikeutettu melko suuriin määriin ilmaisia päästöoikeuksia ja teholtaan alle 20 MW:n laitoksien ei tarvitse hankkia päästöoikeuksia ollenkaan.

Yhteistuotantolaitokset ovat monessa maassa myös oikeutettuja suoriin ja epäsuoriin tukiin. Laitokset voivat maksaa veroa lämmöntuotantoon käyttämästään kivihiilestä,

mutta sähköntuotantoon käytetty polttoaine on verotonta. Tällöin kivihiilestä keskimäärin maksettua hintaan vaikuttaa laitoksen rakennusaste eli sen sähkön- ja lämmöntuotannon suhde. Keskimääräisen hinnan perusteella voidaan arvioida laitoksen maksukykyä biohiilipellesteistä kuviosta 19. Lisäksi yhteistuotantolaitokset voivat saada tuotantotukia uusiutuvan sähkön tuotannolle. Tuotantotukien vaikutus maksukykyyn biohiilipellesteistä riippuu laitoksen rakennusasteesta ja sähköntuotannon hyötyosuhteesta, joten sitä on hankalampi arvioida kuin pelkkää sähköä tuottavan laitoksen tapauksessa.

### **Maksukyky**

Päästöoikeuden hinta on ollut kolmannella kaudella matala, tällä hetkellä noin 5 €/MWh. Kuviosta 19 nähdään, että niin matalalla päästöoikeuden hinnalla, maksukyky biohiilelle on vain pari euroa suurempi kuin kivihiilen hinta. Maksukyky kuitenkin kasvaa lineaarisesti päästöoikeuden hinnan mukana. Jos päästöoikeus olisi esimerkiksi luvussa 2.4 esitettyjen arvioiden mukaisesti 30–66 €/tco<sub>2</sub>, olisi maksukyky biohiilipellesteistä kivihiilen hinnan lisäksi 11–23 €/MWh. Suomessa kivihiilen hinta sähköntuottajille on tällä hetkellä noin 10 €/MWh. Sähköntuotannon maksukyky biohiilipellesteille pelkkään kivihiilen ja päästöoikeuden hintaan verrattuna on tällä hetkellä noin 12 €/MWh, kuten kuvioon 19 piirretty alempi nuoli osoittaa. Päästöoikeuksien hinnan noustessa sähköntuottajien maksukyky voisi olla 21–33 €/MWh, mikäli kivihiilen hinta pysyy vähintään samalla tasolla kuin nyt.

Lisäksi sähköntuotannon maksukykyyn vaikuttaa uusiutuvan sähkön tuotantotuet. Taulukossa 1 esitettyjen eri maiden sähkön markkinahinnan päälle maksettavat tuotantotuet ovat suuruudeltaan 13–53,7 €/MWh. Tuen suuruus muutettuna maksukykyksi biohiilipelletille kuvion 20 mukaan on 4–32 €/MWh<sub>pa</sub> riippuen laitoksen hyötyosuhteesta. Tuotantotuen suuruus ja saaminen on kuitenkin valtiokohtaista ja riippuu laitoksen tuotantomuodosta ja muiden polttoaineiden käytöstä. Suomessa uusiutuvan sähkön tuotantotukea saavat tällä hetkellä vain metsähaketta käyttävät voimalaitokset ja puupolttoainetta käyttävät pienet laitokset.

Suomessa lämmöntuotanto maksaa kivihiilestä veroa ja tämän hetkinen hinta veroineen on noin 35 €/MWh. Eli lämmöntuottajat pystyvät maksamaan tällä hetkellä

biohiilipelleteistä kuvion 19 mukaan noin 37 €/MWh. Jos päästöoikeuden hinta kasvaa arvioiden mukaan, lämmöntuottajat voisivat tulevaisuudessa pystyä maksamaan biohiilipelleteistä 46–58 €/MWh. Erillinen lämmöntuotanto ei kuitenkaan juurikaan käytä kivihiiltä, vaan sitä käytetään enimmäkseen yhteistuotantolaitoksissa. Yhteistuotantolaitoksien maksama hinta kivihiilestä jää sähkön ja lämmön erillistuotantojen maksamien hintojen väliin ja näin ollen myös maksukyky biohiilipelleteistä jää erillistuotantolaitosten maksukykyjen väliin. Tässä esitetyissä arvioissa ei kuitenkaan ole huomioitu sitä, että tällä hetkellä lämmöntuotanto saa noin puolet päästöoikeuksistaan ilmaiseksi. Määrä tulee kuitenkin vähenemään vuosittain.

Luvussa 3.3 esitettyjen puupellettien hintojen ja biohiilipellettien hinta-arvioiden perusteella näyttää, että ainakin tämän hetken kivihiilen ja päästöoikeuden hinnoilla biohiilipellettien käyttö pelkkää sähköä tuottavissa laitoksissa ei ole kannattavaa. Suuremmillakin päästöoikeuden hinnoilla sähköntuotannon maksukyky tuskin riittää kattamaan biohiilipellettien tuotantokustannuksia ja kuljetuksia. Myöskään erillisen lämmöntuotannon maksukyky ei riitä korkeimpiin biohiilipellettien hinta-arvioihin, mutta pienemmät se kattaa varsin hyvin. Erityisesti, jos päästöoikeuden hinta nousee, lämmöntuotannon maksukyky biohiilestä on erittäin hyvä. Erillisiä lämmöntuotantolaitoksia, jotka käyttävät kivihiiltä polttoaineenaan ei kuitenkaan Suomessa juurikaan ole. Jäljelle jäävät yhteistuotantolaitokset, joiden maksukyky biohiilestä jää erillisten sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksien väliin. Yhteistuotantolaitostenkaan maksukyky ei välttämättä pysty kattamaan biohiilipellettien suurimpia tuotantokustannusarvioita edes tulevaisuudessa, mutta jos pellettien tuotantokustannukset saadaan pysymään kohtalaisen matalina, yhteistuotantolaitokset voisivat olla potentiaalinen biohiilipellettien käyttäjä.

## 5.2 Terästeollisuus

Terästeollisuudessa biohiilipelletit voisivat sopia joko koksen valmistuksen raaka-aineeksi tai koksia korvaavaksi pelkistimeksi masuuniin. Tutkittaessa biohiilipellettien soveltuvuutta koksen raaka-aineeksi, sen ominaisuuksia verrataan koksen valmistuksessa käytettävien parempilaatuisten metallurgisten kivihiilten ominaisuuksiin. Kun

taas tutkitaan biohiilipellettien soveltuvuutta kaksin korvaajaksi, sen ominaisuuksia verrataan yleisesti korvaajana käytettyyn kivihiileen, jonka ominaisuuksia on esitetty luvussa 4.1.2.

Suomessa käytetään vuosittain n. 7 000 GWh koksia ja tämän määrän voidaan olettaa kuluvat lähes kokonaan Ruukin Raahen tehtaan masuuneissa. Raahen masuuneihin ollaan tekemässä muutoksia niin, että lähitulevaisuudessa niissä voidaan käyttää kiinteitä pelkistimiä. Tämä voisi mahdollistaa myös biohiilipellettien käytön niissä. Jos käytetyn kaksin energiasisällöstä voitaisiin korvata edes 1–10 % biohiilipelleteillä, pellettejä tarvittaisiin vuodessa 70–700 GWh, eli 11 000–126 000 tonnia biohiilipellettien lämpöarvosta riippuen.

### 5.2.1 Biohiilipellettien tekninen soveltuvuus

#### **Koksiin käytettävän kivihiilen korvaaminen**

Koksilta vaaditaan alhainen tuhka-, rikki- ja alkalimineraalipitoisuus, pieni haihtuvien aineiden määrä, hyvä kuumalujuus ja mekaaninen lujuus. Osaan ominaisuuksista, kuten haihtuvien aineiden määrään, vaikuttaa koksausprosessi, mutta myös käytettävän kivihiilen ominaisuudet, kuten epäpuhtaudet, vaikuttavat kaksin laatuun. Kaksin valmistukseen käytetään hyvälaatuisia metallurgisia kivihiiliä, joiden ominaisuuksien oletetaan olevan parempia kuin energiantuotannossa käytettyjen kivihiilten. Tosin kaksin valmistukseen käytetään usean kivihiililajin sekoitusta, joten kaikkien kivihiililaatujen jokaisen ominaisuuden ei tarvitse olla täydellisiä.

Epäpuhtauksia, kuten tuhkaa ja rikkiä, on biohiilipelleteissä vähän verrattuna kivihiileen. Näin ollen biohiilipellettejä käyttämällä voitaisiin saada puhtaampaa koksia kuin kivihiilestä. Biohiilipellettien tuhka- ja rikkipitoisuuteen tosin vaikuttavat alkuperäisen biomassan ominaisuudet. Peltobiomassoista valmistetussa biohiilessä voi olla suurempia määriä epäpuhtauksia. Biohiilipellettien ja kivihiilen haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen osuudet ovat kuitenkin hyvin erilaiset. Pelleteissä voi olla monta kertaa enemmän haihtuvia aineita kuin kivihiilessä ja niiden kiinteän hiilen osuus on vastaavasti paljon pienempi kuin kivihiilen. Tämä tarkoittaa sitä, että biohiilipelleteistä

haihtuu koksauksen aikana suurempi osa pois kuin kivihiilestä eli samasta määrästä pellettejä saadaan vähemmän koksia kuin kivihiilestä.

Biohiilipellettien käyttö koksauksessa voisi olla laitteistojen puolesta mahdollista, koska biohiilipellettejä voidaan käsitellä samoissa laitteistoissa kuin kivihiiltäkin. Biohiilipelletit tarvitsisivat vain oman varaston, koska ne eivät ole täysin vettähylyviä. Biohiilipellettien alhainen kiinteän hiilen määrä kivihiileen verrattuna aiheuttaa kuitenkin sen, että biohiilipellettejä käytettäessä koksen saanto alenisi. Lisäksi Suopajärven, Iljanan ja Haapakankaan (2013) tutkimusten mukaan biohiilipellettien ja kivihii- len seoksesta tehdyn koksen kylmälujuus ja laatu on huonompi kuin tavallisen koksen. Näin ollen biohiilipellettien käyttö koksen tuotannossa ei vaikuta olevan kannattavaa.

### **Koksen korvaaminen**

Kun arvioidaan biohiilipellettien soveltuvuutta koksen korvaajaksi, niiden ominaisuuksia tulisi verrata koksiin. Koska koksia kuitenkin korvataan yleisesti injektoimalla masuuniin kivihiiltä, biohiilipellettien ominaisuuksia verrataan injektoitavalta kivihiileltä vaadittaviin ominaisuuksiin. Koksia korvaavan kivihii- len valintaan vaikuttaa usein hin- ta. Koksia on korvattu jopa edullisella ja huonolaatuisella ruskohiilellä, jonka ominai- suuksien voidaan olettaa olevan huonommat kuin tavallisen energiantuotannossa käytettävän kivihii- len ominaisuudet. Hinnan lisäksi valintaan vaikuttaa hiilen tuhkapitoisuus, haihtuvien aineiden määrä, kosteus ja jauhautumisominaisuudet.

Biohiilipellettien tuhkapitoisuus on alempi kuin kivihii- len, eli se ei ole este pellettien käytölle koksen korvaajana. Myös biohiilipellettien muut epäpuhtauspitoisuudet ovat alemmat kuin kivihii- len, joten pelkistyvään rautaan ei siirry niistä enempää epäpuh- tauksia kuin kivihii- len. Lisäksi raaka-raudan päälle kertyvän kuonan määrä todennä- köisesti vähenisi biohiilipellettejä käyttäessä. Koksia korvaavan kivihii- len haihtuvien aineiden määrä saa olla suuri, koska se edistää hiilen palamista masuunissa. Näin ollen biohiilipellettien suuresta haihtuvien aineiden määrästä ei ole haittaa injektioin- nissa. Toisaalta suuri haihtuvien aineiden osuus tarkoittaa pientä kiinteän hiilen osuutta, joten saman rautamäärän pelkistämiseen tarvitaan enemmän biohiiltä kuin kivihii- len. Lisäksi kivihii- len toimii masuunissa energianlähteenä ja myös siihen tarkoituk- seen vähemmän kiinteää hiiltä sisältävää ja pienemmän lämpöarvon omaavia biohii-

lipellettejä tarvitaan enemmän. Alhaisempi kiinteän hiilen määrä ja lämpöarvo tarkoittavat siis sitä, että biohiilipellettien käytöllä ei välttämättä voida korvata yhtä suurta koksimäärää kuin kivihiilellä. Biohiilipellettien käyttö voi vaatia suurempia massavirtoja, jotta energiaa saadaan syötettyä tarpeeksi paljon masuuniin. Tämä puolestaan lisää kuljettimien ja syöttölaitteistojen energiankulutusta.

Pelkistimien injektoiminen masuuniin on yleistä terästeollisuudessa, joten useissa masuuneissa on injektointilaitteisto valmiina. Jos masuuniin on injektoitu kiinteää pelkistintä, kuten kivihiilipölyä, laitteisto todennäköisesti sopii myös jauhettujen biohiilipellettien syöttöön. Kivihiiltä pelkistimenä käytävillä laitoksilla on yleensä kivihiilen murskain ja kuivuri ennen injektointilaitteistoja. Murskain käy luultavasti myös biohiilipellettien murskaamiseen, koska sen jauhautumisominaisuudet ovat samankaltaiset kuin kivihiilellä. Biohiilipellettejä ei välttämättä tarvitse kuivata ollenkaan tai ainakaan niin paljon kuin kivihiiltä, koska ne ovat jo valmiiksi huomattavasti kuivempia. Tämä säästää kuivaukseen käytettävää energiaa.

Masuuneissa, joissa käytetään jo kiinteää pelkistintä koksen korvaamiseen, biohiilipellettien käyttö voisi olla mahdollista ja melko helposti toteutettavissa. Biohiilipelletit tarvitsevat vain oman katetun varaston ja kuljetuslaitteistot sieltä murskaimelle. Masuuneissa, joissa koksia ei korvata millään tai korvaamiseen käytetään nestemäistä pelkistintä, biohiilipellettien käytön aloittaminen on haastavampaa. Tässä tapauksessa varaston lisäksi tarvittaisiin myös uudet kiinteän pelkistimen syöttöön soveltuvat syöttölaitteet sekä kuljettimet ja murskaimet.

Suopajärven (2013a) tekemien simulointitutkimuksen tuloksien mukaan biohiilen käyttö masuuneissa voi olla mahdollista, vaikka torrefioidun biomassan korkea happipitoisuus ja matala lämpöarvo aiheuttavat suuremman pelkistinmäärän tarpeen, kuin pelkkää koksia käytettäessä. Suopajärven tutkimuksesta käy ilmi, että matalassa lämpötilassa torrefioidun biohiilen lämpöarvo oli liian matala ja happipitoisuus liian korkea masuuniin. Korkeammassa lämpötilassa paahdetun biohiilen käyttö ei kuitenkaan aiheuta suuria negatiivisia vaikutuksia masuunin toimintaan.

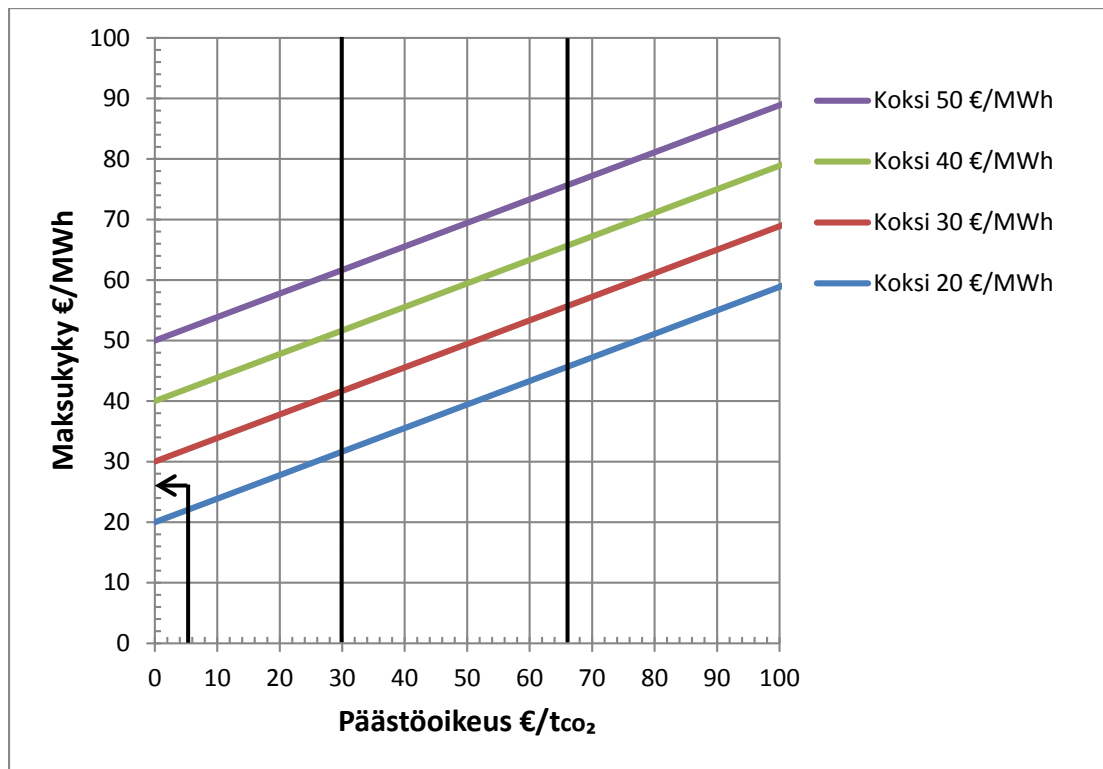
## 5.2.2 Terästeollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä

### **Koksihiilen korvaaminen**

Biohiilipellettien ja kivihiilen ominaisuuksia vertaillen huomattiin, että niiden haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen suhteet poikkeavat toisistaan paljon ja alhaisen hiilipitoisuuden vuoksi biohiilipellettien käyttö kivihiilen korvaajana johtaisi koksinsaannon alenemiseen. Tämä ei kannusta biohiilipellettien käyttöön taloudellisesti. Lisäksi Suopajärven ja muiden (2013) tekemien kokeiden perusteella biohiilen käyttö osana kivihiiliseosta heikentää koksinsaannon ominaisuuksia, ja biokoksia valmistetaan myöskin raakabiomassasta, jonka korvaaminen prosessissa biohiilellä ei ole taloudellisesti kannattavaa. Näin ollen ei voida pitää oletettavana, että biohiiltä käytettäisiin biokoksinsaannon raaka-aineena, eikä sen käytön kannattavuutta koksinsaannon korvaamisessa tutkita tarkemmin.

### **Koksin korvaaminen**

Terästeollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä riippuu koksinsaannon hinnasta ja tarvittavien päästöoikeuksien hinnasta. Kuviossa 21 on esitetty terästeollisuuden maksukyky biohiilelle eri koksinsaannon ja päästöoikeuden hinnoilla. Vaaka-akselilla on päästöoikeuden hinta ja erivärisillä suorilla on esitetty koksinsaannon hintoja. Valitsemalla päästöoikeuden ja koksinsaannon hinnat, voidaan niiden leikkauskohdasta lukea pystyakselilta terästeollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä. Kuvioon on merkitty nuolella maksukyky tämänhetkisen koksinsaannon ja päästöoikeuden hinnan perusteella ja pystyviivoilla luvussa 2.4 esitetyt arviot päästöoikeuden hinnan kehittymisestä.



**Kuvio 21. Terästeollisuuden maksukyky biohiillelle koksen korvaajana**

Koksen hinta Euroopassa on ollut vuonna 2013 noin 25 €/MWh, tosin jos koksia tuotetaan raaka-rautatehtaalla, sen tuotantokustannukset voivat olla matalammat. Tämän hetkisen päästöoikeuden hinnalla terästeollisuuden maksukyky biohiilipelletistä ei ole juurikaan koksen hintaa suurempi. Jos koksen hinta pysyy samana ja päästöoikeuden hinta nousee luvussa 2.4 esitettyjen arvioiden mukaan, ollen tulevaisuudessa 30–66 €/tCO<sub>2</sub>, terästeollisuuden maksukyky olisi 36–51 €/MWh. Huomioitavaa näissä arvioissa on kuitenkin se, että niissä terästeollisuuden on oletettu joutuvan ostamaan kaikki tarvitsemansa päästöoikeudet. Todellisuudessa se saa jonkin verran päästöoikeuksistaan ilmaiseksi. Ilmaisten oikeuksien määrä kuitenkin pienenee vuosittain.

Terästeollisuuden nykyinen maksukyky kattaa luvussa 3.3 esitetyt alimmat puupellettien hinnat ja biohiilipellettien hinta-arviot. Jos päästöoikeuden tai koksen hinta nousee, terästeollisuus pystyy maksamaan hyvin biohiilipelletistä. Toisaalta koksia korvataan myös halvoilla kivihiililajeilla, joiden hinta voi olla jopa alle 10 €/MWh. Tällaisten halpojen raaka-aineiden helppo saatavuus voi estää biohiilipellettien käyttöönottoa raaka-raudantuotannossa.



### 5.3 Selluteollisuus

Meesauuneissa käytetään polttoaineena perinteisesti maakaasua tai polttoöljyä. Näitä polttoaineita on korvattu monilla tehtailla onnistuneesti sellunvalmistuksessa syntyvällä jätetuulla. Koska puupolttoaineen käyttö on mahdollista meesauuneissa tietyillä laitteistomuutoksilla, tässä tutkimuksessa ei ole tarkemmin tarkasteltu biohiilipellettien soveltuvuutta meesauuneihin. Sen sijaan tarkemman tarkastelun aiheena on se, olisiko biohiilipellettien käyttö kannattavampaa kuin jätetuun, sillä sen käyttö voisi aiheuttaa vähemmän ongelmia prosessissa vaikka se hinnaltaan onkin varmasti kalliimpaa. Jätetuun ominaisuuksien oletetaan olevan samankaltaisia luvussa 3.2 esitetyn metsätähdehakkeen ominaisuuksien kanssa.

Taulukossa 18 esitetyt Suomen 15 sellutehdasta käyttävät vuosittain meesauuneissaan n. 4 500 GWh polttoainetta. Ruotsalaisilla sellutehtailla puuperäisillä polttoaineilla on pystytty korvaamaan 35–60 % fossiilisen polttoaineen käytöstä vuositasona. Jos yksi suomalainen sellutehdas pystyisi korvaamaan vastaavan määrän polttoaineestaan biohiilipelleteillä, pellettejä tarvittaisiin 105–180 GWh vuodessa, eli 16 000–32 000 tonnia biohiilipellettien lämpöarvosta riippuen.

#### 5.3.1 Biohiilipellettien tekninen soveltuvuus

Kiinteiden polttoaineiden käyttö aiheuttaa meesauunissa erilaisia ongelmia kuin kaasuisten ja nestemäisten polttoaineiden. Suurimmat ongelmien aiheuttajat ovat polttoaineiden suuret kosteuspitoisuudet ja polttoaineen mukana tulevan tuhkan sisältämät kemikaalit, jotka kerääntyvät selluteollisuuden kalkki- ja kemikaalikiertoon. Suuret tuhkapitoisuudet estävät kivihiilen käytön meesauunissa ja suuret kosteuspitoisuudet tekevät sellutehtaan puujätteen käytöstä hankalaa. Puujätettä käytetään kuitenkin meesauuneissa, koska sitä on helposti ja edullisesti saatavilla.

Biohiilipellettien ominaisuuksien perusteella ne voisivat soveltua puujätettä paremmin meesauuneihin. Biohiilipelletit sisältävät saman verran tuhkaa ja samanlaisia epäpuhtauksia kuin puukin, mutta niiden kosteuspitoisuus on paljon matalampi. Tuo-

reen puun kosteus voi olla jopa 50–60 % ja ne joudutaan kuivattamaan vähintään 15 %:n kosteuteen ja jauhamaan ennen polttoa. Biohiilipellettien kosteuspitoisuus on 1–5 % eli niitä ei tarvitse kuivattaa ollenkaan ennen meesauuniin syöttämistä. Näin ollen biohiilipellettien käyttöä varten ei tarvita kuivainta, vaan pelkästään jauhin. Ruotsalaisille sellutehtaille tehdyn kyselyn mukaan yksi puupolttoaineen saatavuutta rajoittavista tekijöistä on kuivaimella sattuneet tulipalot. Biohiilipellettien käytöllä tätä vaaraa ei siis ole. Lisäksi biohiilipellettien lämpöarvo on suurempi kuin jauhettun puun, joten sitä ei tarvitse syöttää uuniin yhtä suurella massavirralla. Tämä säästää kuljettimien- ja syöttölaitteistojen energiankäyttöä.

Hyvin alhaisen kosteuspitoisuuden ansiosta biohiilipellettien kosteuden haihduttamiseen meesauunissa menee vähemmän energiaa ja liekin lämpötila pysyy korkeampana kuin jauhettua jätepuuta käytettäessä. Biohiilipellettejä käytettäessä meesaan siirtyy enemmän lämpöä ja kalkkia voidaan saada enemmän kuin jätepuuta käytettäessä. Matalan kosteuspitoisuuden vuoksi biohiilipellettien poltosta syntyy myös vähemmän savukaasuja. Kalkkiin siirtyvät epäpuhtaudet ovat samoja molemmilla polttoaineilla, tosin määrät vaihtelevat biohiilipellettien raaka-aineen ja selluteollisuuden jätepuun lajista riippuen.

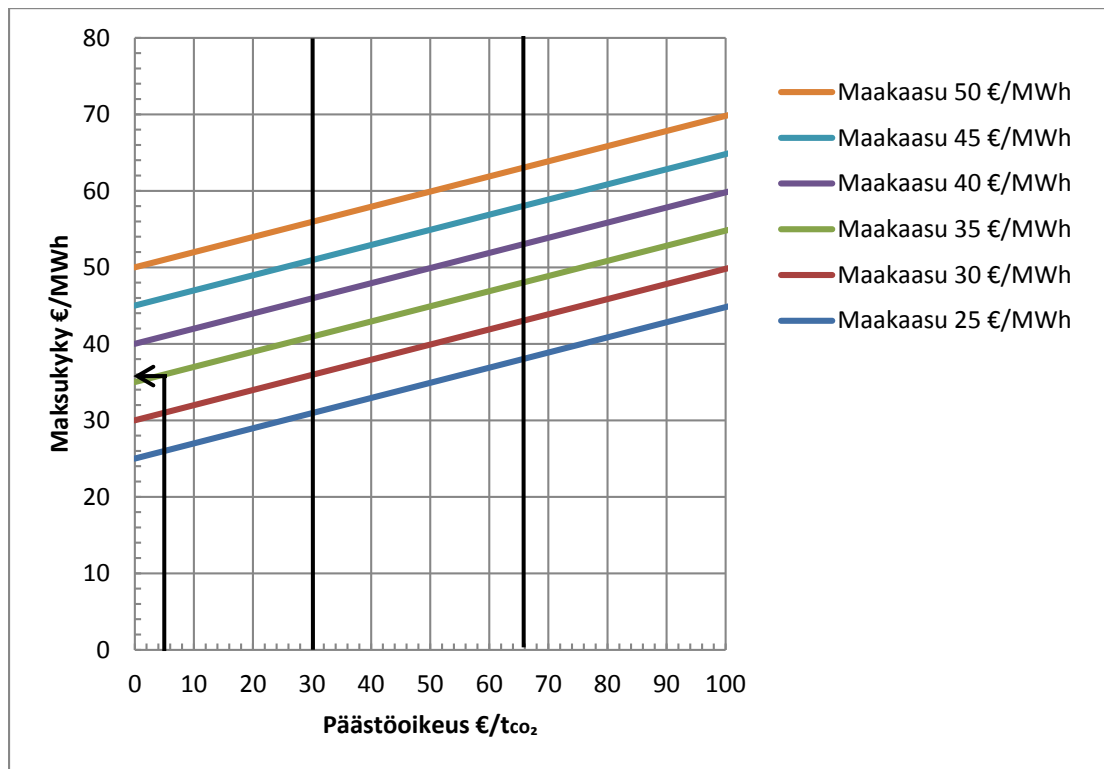
Jauhetun jätepuun käytön aloittaminen vaatii muutoksia ainakin syöttölaitteistoihin ja polttimiin ja lisäksi tarvitaan kuljetuslaitteistot, kuivain, jauhin ja mahdollinen varasto. Jos jätepuuta kaasutetaan, tarvitaan kaasutin, kuljetuslaitteistot kaasuttimelle ja syöttölaitteistot meesauuniin. Biohiilipellettien tapauksessa tarvitaan samat laitteistot kuin jauhettua puuta käyttäessä, mutta kuivain ei välttämättä ole tarpeellinen. Jätepuulle täytyy mahdollisesti rakentaa kuljetuslaitteisto sen syntypaikalta kuivaimelle ja jauhimille, kun taas biohiilipelleteille täytyy rakentaa varasto paikalle, johon niiden kuljetus onnistuu helposti.

### 5.3.2 Selluteollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä

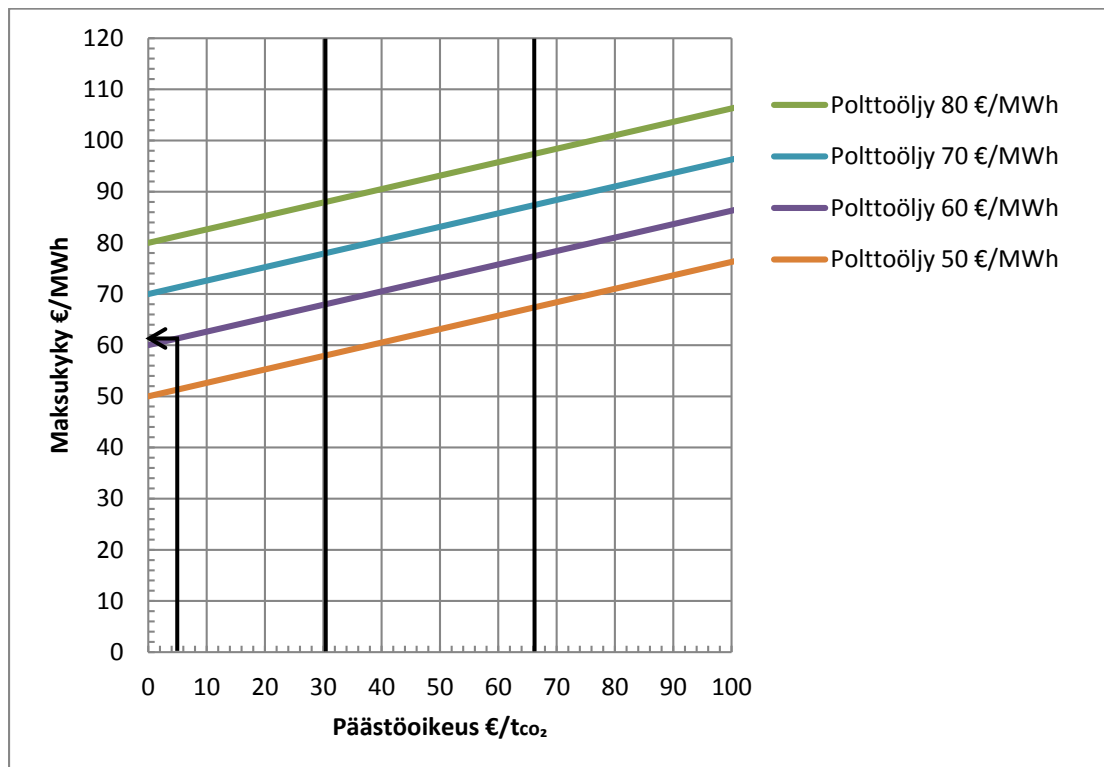
Biohiilipellettien käytön kannattavuuteen selluteollisuuden polttoaineena vaikuttaa se, onko laitoksen meesauunissa jo käytössä kiinteä polttoaine. Jos kiinteää polttoainetta ei ole käytössä, maksukykyyn vaikuttaa biohiilipellettien käytön aloittamisesta

aiheutuvat investointikustannukset. Jos laitos käyttää jätepuuta jauhattuna meesaunissa, suurin osa tarvittavasta laitteistosta on jo olemassa. Silloin biohiilipellettien käytön aloittamisen kannattavuuteen vaikuttaa se, kuinka paljon sen oletetaan parantavan prosessia verrattuna jätepuuhun. Jos laitos käyttää jätepuuta kaasutettuna, ei biohiilipellettien käyttö ole kannattavaa ainakaan jauhattuna, sillä tämä vaatisi kaasutuslaitteistojen tilalle uudet laitteistot. Tässä tapauksessa biohiilipellettien käyttöä voisi ajatella kaasuttimen raaka-aineena, jolloin maksukyky siitä olisi korvattavan raaka-aineen hinnan suuruinen, mutta sen vaihtoehdon kannattavuutta ei tarkastella tässä tutkimuksessa tarkemmin.

Jos laitos ei ole ennen käyttänyt kiinteää polttoainetta, maksukykyä tarkasteltaessa täytyy ottaa huomioon investointien suuruus. Kun laitteistojen hankinnoista ja muutoksista aiheutuvat kustannukset ja haluttu takaisinmaksuaika ovat tiedossa, voidaan maksukykyä biohiilipelleille alkaa hahmottelemaan tavallisesti käytetyn polttoaineen hinnan ja päästöoikeuden hinnan avulla. Kuvioista 22 voidaan arvioida maakaasua käyttävän laitoksen maksukyky biohiilipelleistä, kun huomioon otetaan päästöoikeuden hinta. Päästöoikeuden hinta on vaaka-akselilla ja maakaasun hinta on esitetty erivärisillä suorilla. Näiden kahden arvon perusteella selluteollisuuden maksukyky voidaan lukea pystyakselilta. Saadusta maksukykyvyydestä täytyy kuitenkin vähentää investointikuluihin menevä osuus. Kuvioista 23 voi vastaavalla tavalla arvioida öljyä käyttävän laitoksen maksukykyä. Polttoöljyn päästökerroin on suurempi kuin maakaasun, joten polttoöljyä käyttävien tehtaiden täytyy ostaa enemmän päästöoikeuksia käytettyä energiamäärää kohden. Tästä johtuen polttoöljyä käyttävillä laitoksilla päästöoikeuden hinta vaikuttaa maksukykyyn enemmän kuin maakaasua käyttävillä laitoksilla. Kuvioihin on merkitty nuolella maksukyvyt tämänhetkisen polttoaineen ja päästöoikeuden hinnan perusteella ja pystyviivoilla luvussa 2.4 esitetyt arviot päästöoikeuden hinnan kehittymisestä.



Kuvio 22. Selluteollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä maakaasun käyttöä korvattaessa



Kuvio 23. Selluteollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä polttoöljyn käyttöä korvattaessa

Maakaasun hinta on tällä hetkellä noin 35 €/MWh. Koska maakaasun poltosta aiheutuvat päästöt ovat pieniä, päästöoikeuden hinnan ollessa vain 5 €/tCO<sub>2</sub> selluteolli-

suuden maksukyky biohiilipelleteistä on vain hieman maakaasun hintaa suurempi, noin 36 €/MWh. Tosin tässä ei ole huomioitu laitteistojen hankinnan investointikuluja, jotka otettaessa huomioon laskevat maksukykyä. Jos päästöoikeuden hinta nousee aiemmin kerrottujen arvioiden mukaan ollen jopa 30–66 €/tco<sub>2</sub> ja maakaasun hinta pysyy vähintään tämän hetkiselä tasolla, selluteollisuuden maksukyky voisi olla 41–48 €/MWh. Öljyn hinnan oletetaan olevan sellutehtaille korkeampi kuin maakaasun. Öljyä käyttävien tehtaiden maksukyky biohiilipelleteistä olisi siis vielä maakaasulaitoksia parempi. Tosin myös niiden kohdalla tarvittavat laitteistoinvestoinnit vaikuttavat todelliseen maksukykyyn.

Luvussa 3.3 olevien puupellettien hintoihin ja biohiilipellettien hinta-arvioihin verrattuna selluteollisuuden maksukyky biohiilipelleteistä on hyvä. Jos tarvittavien laitteistoinvestointien kustannukset jäävät kohtalaisiksi, voisi biohiilipellettien käytön aloittaminen sellutehtaissa olla niille taloudellisesti kannattavaa, varsinkin jos päästöoikeuden hinta nousee. Toisaalta sellutehtailla on usein mahdollista käyttää myös omassa tuotannossa syntyneitä sivu- ja jätevirtoja, joiden käytön edullisuus voi olla este biohiilipellettien käytön aloittamiselle.

## 6 Pohdinta

### 6.1 Yhteenveto

Tutkimus keskittyi selvittämään, olisiko biohiilipellettien käyttö mahdollista energiateollisuudessa, terästeollisuudessa ja selluteollisuudessa. Energiateollisuuden osalta tarkastelu rajattiin vain suuriin kivihiiltä käyttäviin laitoksiin. Terästeollisuuden osalta tarkasteltiin masuuneissa käytettävän koksen korvaamista biohiilipelleteillä. Koksia korvataan monissa masuuneissa kivihiilijauheella, joten biohiilen mahdollista käyttöä verrattiin siihen. Selluteollisuuden meesauuneissa taas on käytetty jonkin verran puuperäisiä polttoaineita, joten biohiilipellettien käyttöä verrattiin siihen ja pohdittiin, olisiko biohiilipellettien käytöllä etuja verrattuna muihin puuperäisiin polttoaineisiin.

Biohiilipellettien käyttö on mahdollista kivihiiltä käyttävien pölypolttokattiloiden polttoaineena ainakin osana polttoaineseosta, sillä myös raakabiomassaa voidaan käyttää kivihiilen seassa pieniä määriä. Koska biohiilipellettien ominaisuudet muistuttavat kivihiiltä, biohiilipellettien osuudet polttoaineseoksesta voivat todennäköisesti olla suurempia. Biohiilipellettien lämpöarvo on pienempi kuin kivihiilen, minkä vuoksi biohiilipellettejä joudutaan syöttämään suurempia massavirtoja kuin kivihiiltä. Tämä lisää kuljetus- ja syöttölaitteistojen energiankäyttöä. Lisäksi biohiilipellettien ja kivihiilen tuhkan käyttäytymisominaisuudet ovat erilaiset, mikä täytyy ottaa huomioon kattilan lämpötiloissa. Jos kattilan lämpötila on liian korkea, biohiilipellettien tuhka voi tarttua kattilan pintoihin ja aiheuttaa korroosio- ja kuonaantumisongelmia.

Terästeollisuuden masuuneissa käytetään koksia raakarauta-aineiden pelkistämiseen. Biohiilipelletit voisivat sopia pelkistimeksi, jos masuunissa on jo valmiina kiinteän pelkistimen syöttölaitteistot. Muussa tapauksessa biohiilipellettien käytön aloittaminen vaatii muutoksia laitteistoihin. Biohiilipelleteillä on alempi lämpöarvo ja pienempi kiinteän hiilen osuus kuin kivihiilellä, joten ne eivät pysty korvaamaan yhtä suurta osuutta koksista kuin kivihiili tai ainakin niitä pitäisi syöttää suurempia määriä. Biohiilipellettien epäpuhtaus- ja tuhkapitoisuudet ovat matalampia kuin kivihiilen, joten niitä käyttämällä pelkistetty rauta voisi olla puhtaampaa ja masuuniin syntyisi vähemmän kuonaa.

Selluteollisuuden meesauuneissa käytetään yleensä öljyä tai maakaasua tuottamaan tarpeeksi suuri lämpö, jotta kalsiumkarbonaatti muuttuu uudelleen käytettäväksi kalsiumoksidiksi. Fossiilisia polttoaineita on korvattu joissakin masuuneissa selluntuotannossa syntyvällä jätetuulla eli biopolttaineiden käyttö meesauuneissa on mahdollista. Biomassat aiheuttavat kuitenkin jonkin verran ongelmia meesauuneissa, tosin ongelmien laatu ja suuruus vaihtelevat laitoksittain. Biohiilipelletit ovat ominaisuuksiltaan, kuten kosteuspitoisuudeltaan ja lämpöarvoltaan, jätetuuta sopivampi polttoaine meesauuniin. Niidenkin käyttö voi aiheuttaa ongelmia verrattuna fossiilisten polttoaineiden käyttöön, mutta ongelmat ovat todennäköisesti pienempiä kuin jätetuuta käytettäessä.

Käsiteltyjen teollisuudenalojen maksukykyyn biohiilipellesteistä vaikuttavat korvattavan polttoaineen hinta ja sen käytölle hankittavien päästöoikeuksien hinta. Energiateollisuuden maksukykyyn vaikuttaa lisäksi uusiutuvilla polttoaineilla tuotetulle sähkölle saatavat tuet ja lämmöntuotannon fossiilisista polttoaineista maksamat verot. Voimalaitoksilla biohiilen käytön aloittaminen vaatii todennäköisesti vähiten muutoksia laitteistoihin. Energiateollisuuden käyttämä kivihiili on kuitenkin halpaa ja sähköntuotannossa siitä ei tarvitse maksaa polttoaineveroja. Näin ollen pelkkää sähköä tuottavien laitosten maksukyky biohiilipellesteistä on huonoin. Laitokset, jotka tuottavat sähköä lisäksi lämpöä, maksavat lämmöntuotantoon käytetyistä polttoaineista veroa. Yhteistuotantolaitosten maksukyky biohiilipellesteistä onkin jonkin verran parempi ja lisäksi niissä biohiilipellesteillä voitaisiin lisäksi tuottaa enemmän uusiutuvaa energiaa kuin pelkkää sähköä tuottavissa laitoksissa. Terästeollisuuden käyttämä koksi on arvokkaampaa kuin energianteollisuuden käyttämä kivihiili. Masuuneissa voidaan kuitenkin käyttää myös halpoja kivihiililajeja korvaamaan koksen käyttöä osittain, joten maksukyky biohiilipellesteistä riippuu myös helposti saatavilla olevan halvan kivihiilen hinnasta. Lisäksi jos masuunissa ei ole ennen käytetty kiinteitä pelkistimiä, biohiilipellettien käytön aloittaminen vaatii muutoksia laitteistoihin, joiden investointikustannukset vaikuttavat maksukykyyn. Selluteollisuuden käyttämät fossiiliset polttoaineet ovat hinnaltaan korkeimpia, tosin niitä voidaan korvata tehtaalla syntyvällä jätepuulla, jonka käyttö on edullista. Selluteollisuudessa biohiilipellettien käytön aloittaminen aiheuttaa kuitenkin eniten laitteistoinvestointeja, varsinkin jos puupolttoaineita ei ole ennen käytetty, mikä laskee todellista maksukykyä.

Nykyisellä päästöoikeuden hinnalla maksukyvyt eivät korkeimmillaankaan ole juuri korvattavan fossiilisen polttoaineen hintaa suurempia. Tämän hetken maksukyvyt pelkästään fossiilisten polttoaineiden ja päästöoikeuksien hintojen perusteella ovat sähköä erillistuotannolla 12 €/MWh, lämmön erillistuotannolla 37 €/MWh, yhteistuotannolla erillistuotantojen väliltä, terästeollisuudella 27 €/MWh ja selluteollisuudella vähintään 36 €/MWh. Jos päästöoikeuden hinta nousee arvioiden mukaisesti 30–66 euroon ja uusiutumattomien polttoaineiden hinnat pysyvät vähintään nykyisellä tasolla, teollisuudenalojen maksamat hinnat fossiilisista polttoaineista ovat seuraavanlaiset: sähköä erillistuotanto 21–33 €/MWh, lämmön erillistuotanto 46–58 €/MWh, yhteistuotanto erillistuotantojen väliltä, terästeollisuus

36–51 €/MWh ja selluteollisuus 41–48 €/MWh. Maksukyky biohiilipelleteistä riippuu kuitenkin näiden hintojen lisäksi tarvittavien laitteistoinvestointien ja ylimääräisten käyttö- ja kunnossapitokulujen suuruudesta.

Määrältään eniten biohiilipellettejä voitaisiin käyttää energiantuotannossa, sillä kivihiiltä käyttäviä voimaloita on paljon ja kivihiilen käyttömäärät niissä ovat suuria. Jos biohiilipelleteillä voitaisiin korvata pieniäkin osuuksia kivihiiltä, biohiilipellettien tarve olisi suuri. Terästeollisuus käyttää myös paljon fossiilisia pelkistimiä, mutta biohiilipelletit voivat todennäköisesti korvata niissä vain pieniä osuuksia muista pelkistimistä. Selluteollisuuden meesauuneja on Suomessa useampia kuin masuuneja, mutta niiden energiantarve on paljon vähäisempää. Niissä on kuitenkin mahdollista käyttää suurempia osuuksia biopolttoaineita kuin masuuneissa, joten biohiilipellettien käyttäjänä yksi meesauuni voi olla suurempi kuin yksi masuuni.

## 6.2 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoite oli selvittää biohiilen käyttömahdollisuuksia energia-, teräs- ja selluteollisuudessa ja määrittää niiden maksukyky biohiilestä. Tutkimuksessa saatiin määriteltä biohiilen käyttökohteet eri teollisuudenaloilla ja biohiilen käytöstä aiheutuvia ongelmia näissä käyttökohteissa. Maksukyvyistä saatiin arvio käytettyjen polttoaineiden ja päästöoikeuksien hinnan perusteella, mutta arviota biohiilipellettien käytön aiheuttamista investointikustannuksista ja huolto- ja käyttökustannuksista ei tehty. Tarvittavat ylimääräiset kustannukset vaikuttavat maksukykyyn laskevasti, joten todelliset maksukyvyt ovat matalampia kuin työssä esitetyt arviot.

Käsitellyistä teollisuudenaloista suurimman määrän biohiiltä voisi käyttää energiateollisuus, jossa jo yhden kivihiilivoimalaitoksen muuttaminen biohiiltä osittain käyttäväksi takaisi suuren menekin biohiilelle. Biohiilen käyttöä voimalaitoksissa on myös tutkittu eniten, ja tutkimusten mukaan käyttö on mahdollista, tosin se voi vaatia muutoksia jauhimiin ja kuljettimiin. Käytön aloittaminen vaatiikin laitospohjaisen tutkimuksen, jolla kartoitetaan, millaisilla muutoksilla biohiilipellettien käyttö on mahdollista kyseisellä laitoksella. Yhteistuotantolaitosten maksukyky biohiilestä on



parempi kuin pelkkää sähköä tuottavien laitosten ja ainakin Suomessa ne voisivat tällä hetkellä olla potentiaalisimpia biohiilen käyttäjiä.

Teräs- ja sellutehtaissa biohiilen käytön aloittaminen vaatii vielä jatkotutkimuksia. Biohiilen käyttöä terästehtaiden masuuneissa on simuloitu, mutta käytön aloittaminen vaatii vielä käytännön kokeita ja todennäköisesti laitoskohtaisia tarkasteluja. Suomessa Ruukin Raahen tehtaassa masuunit tullaan muuttamaan kiinteitä pelkistimiä käyttäväksi, jolloin biohiili voisi soveltua niihin ilman muita muutoksia. Biohiilen käyttö selluteollisuudessa vaatii myös lisätutkimuksia ja kokeiluja. Suomessa kuitenkin monet sellutehtaat käyttävät kallista polttoöljyä, jonka vaihtaminen jopa edullisempaan biopolttoaineeseen voisi olla taloudellisesti kannattavaa tehtaalle. Biohiilen käyttöä selluteollisuudessa kannattaakin tutkia jatkossa lisää, sillä sellutehtaita on paljon ja jos biohiilen käyttö niissä onnistuu vähäisin ongelmin, selluteollisuus voisi olla suuri ja maksukyvyltään hyvä biohiilen käyttäjä.

## Lähteet

2030 framework for climate and energy policies. 2014. Artikkel. Euroopan Komissio. Viitattu 19.2.2014. [http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm).

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. Espoo: Valtion tieteellinen tutkimuskeskus VTT.

Anttila, M. 2012. Biohiilipellettien ja hiilen jauhatus- ja yhteispolttokokeet 0,5MW:n pölypolttolaitteistoissa. Seminaariesitys. Biohiilen tuotanto ja käyttö, edellytykset ja mahdollisuudet Suomessa -seminaari 29.11.2012 Espoo.

Arpalahti, O., Engdahl, H., Jäntti, J., Kiiskilä, E., Liiri, O., Pekkinen, J., Puumalainen, R., Sankala, H. & Vehmaan-Kreula, J. 1999. White liquor preparation. Teoksessa Chemical Pulping. Papermaking Science and technology –sarjan osa 6B. Helsinki: Fapet.

Arpiainen, V. & Wilen, C. 2014. Report on optimization opportunities by integrating torrefaction into existing industries. Sector-project. Viitattu 25.3.2014. [http://www.sector-project.eu/fileadmin/downloads/deliverables/SECTOR\\_D3.2\\_VTT\\_\\_final.pdf](http://www.sector-project.eu/fileadmin/downloads/deliverables/SECTOR_D3.2_VTT__final.pdf).

Arvonlisäverotus. 2014. Artikkel. Valtiovarainministeriö. Viitattu 14.5.2014. [http://www.vm.fi/vm/fi/10\\_verotus/04\\_arvonlisaverotus/index.jsp](http://www.vm.fi/vm/fi/10_verotus/04_arvonlisaverotus/index.jsp)

Benchmarking energy Use in Canadian Pulp and Paper Mills. 2008. Natural Resources Canada & Pulp and Paper Research Institute of Canada. Viitattu 10.4.2014. <http://198.103.48.133/industrial/technical-info/benchmarking/pulp-paper/pdf/benchmark-pulp-paper-e.pdf>.

Bergman, P.C.A. 2005. Combined Torrefaction and Pelletisation - The TOP process. ECN Biomass. Viitattu 19.2.2014. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf>.

Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R. & Kiel, J.H.A. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. ECN Biomass. Viitattu 19.2.2014. <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05013.pdf>.

Coal consumption statistics. 2013. Eurostat-tilasto. Euroopan komissio. [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Coal\\_consumption\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Coal_consumption_statistics).

Deutmeyer, M. 2012. Possible effect of torrefaction on biomass trade. IEA Bioenergy. Viitattu 28.2.2014. <http://www.bioenergytrade.org/downloads/t40-torrefaction-2012.pdf>

Energian kokonaiskulutus energialähteittäin. 2013. Energiatilasto 2012. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 31.3.2014. [http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2012/start.htm](http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2012/start.htm).

Energiavuosi 2013. 2014. Sähkö. Energateollisuus ry. Julk. 21.1.2014. Viitattu 28.3.2014. <http://energia.fi/kalvosarjat/energiavuosi-2013-s-hk>.

European Bioenergy Outlook 2013. Tilastoja. Koonnut Cristina Calderón. Aebiom European biomass association.

European Carbon Market to Remain Oversupplied Until 2027. 2013. Lehdistöiedote. Thomson Reuters Point Carbon. Viitattu 1.4.2014. <http://www.pointcarbon.com/aboutus/pressroom/pressreleases/1.2584441>.

Flyktman, M., Kärki, J., Hurskainen, M., Helynen, S & Sipilä, K. 2011. Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa. VTT Tiedotteita 2595.

Fortum. 2014. Fortumin energiantuotantolaitokset. Viitattu 28.3.2014. <http://www.fortum.com/fi/pages/default.aspx>, energiantuotanto.

Helen. 2014. Helsingin Energian voimalaitokset. Viitattu 28.3.2014. <http://www.helen.fi/Kotitalouksille/>, Neuvoa ja tietoa, Energiantuotanto, Voimalaitokset.

Hellgrén, M., Heikkinen, L., Suomalainen, L. & Kala, J. 1999. Energia ja ympäristö. Helsinki: Opetushallitus.

Hiilineutraali tulevaisuus. N.d. Artikkelin Helsingin Energian internet-sivuilla. Viitattu 31.3.2014. <http://www.helen.fi/Kotitalouksille/Neuvoa-ja-tietoa/Energia-ja-ymparisto/Hiilineutraali-tulevaisuus/>.

Hiltunen, A. 2009. Meesauunin vaihtoehtoiset polttoaineet. Kandidaatintyö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 10.4.2014. <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/50273/nbnfi-fe200910142249.pdf?sequence=3>.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. p., uud. p. Helsinki; Edita.

Jukola, P. & Huttunen, M. CFD Simulation of Biofuel and Coal Co-Combustion in a Pulverized Coal Fired Furnace. Seminaariesitys. Finnish-Swedish Flame Days -tapahtuma 17.–18.04.2013 Jyväskylä.

Järvinen, P. 2009. Hyvää tietää hiilestä. Energateollisuus ry ja Hiilitieto ry.

Kauden 2013–2020 ilmaisjako. 2014. Artikkelin Työ- ja Elinkeinoministeriö. Päivitetty 28.1.2014. Viitattu 17.3.2014. [http://www.tem.fi/energia/paastokauppa/kauden\\_2013-2020\\_ilmaisjako](http://www.tem.fi/energia/paastokauppa/kauden_2013-2020_ilmaisjako).

Klemetti, U., Kortelainen, V., Lyytikäinen, J., Siitonen, H. & Sironen, R. 2001. Paperimassan valmistus. Opetushallitus.

KnowPulp. 2013. Versio 12.0 (12/2013). Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö. Ylläpitäjä Prowledge Oy. Viitattu 18.3.2014. Jyväskylän Ammattikorkeakoulun lisenssillä.

Koppejan, J. Sokhansanj, S. Melin, S. & Madrali, S. 2012. Status overview of torrefaction technologies. IEA Bioenergy Task 32 report. Viitattu 20.2.2014. <http://www.ieabcc.nl/>, publications.

Kyoto emissions targets. 2014. Euroopan komissio. Viitattu 18.2.2014. [http://ec.europa.eu/clima/policies/g-gas/kyoto/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/g-gas/kyoto/index_en.htm).  
Lahti Energia. 2014. Lahti Energian voimalaitokset. Viitattu 28.3.2014. <http://www.lahtienergia.fi/lahti-energia/>, Energian tuotanto.

Lisää biopolttoaineita? N.d. Artikkelin Helsingin Energian internet-sivuilla. Viitattu 31.3.2014. <http://www.helen.fi/Kotitalouksille/Neuvoa-ja-tietoa/Energia-ja-ymparisto/Hiilineutraali-tulevaisuus/Lisaa-biopolttoaineita/>

Lämmitysöljyn verotus. 2014. Öljyalan keskusliitto. Viitattu 29.4.2014. <http://www.oil.fi/fi/lammitysoljy/lammitysoljyn-verotus>.

Maakaasun hintatilastot. 2014. Helsinki: Energiavirasto. Viitattu 14.4.2014. <http://www.energiavirasto.fi/maakaasun-hintatilastot>.

Marja-aho, L. 2011. Uusiutuvan energian tuet EU-maissa. Selvitys uusiutuvan energian tukimalleista sähkön ja lämmön tuotannossa EU-maissa. Erikoistyö. Helsinki: Aalto-yliopisto, Energiateollisuus. Viitattu 26.3.2014. [http://energia.fi/sites/default/files/energiateollisuus\\_raportti\\_28\\_9\\_2011\\_2.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/energiateollisuus_raportti_28_9_2011_2.pdf).

Metsä Fibre. 2014. Tuotantolaitokset. Metsä Fibre. Viitattu 31.3.2014. <http://www.metsafibre.fi/Yritys/Tuotantolaitokset/Pages/Default.aspx>.

Met Coke Prices. 2014. Europe 2008–2014. Tilasto metallurgisen koksen hinnasta. Päivitetty 21.3.2014. Steelonthenet.com. Viitattu 24.3.2014. <http://www.steelonthenet.com/files/blast-furnace-coke.html>.

Mitchell, G. 2013. Coal Utilization in the Steel Industry. Washington: American Iron and Steel Institute. Viitattu 21.2.2014. <http://www.steel.org/en/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Processes/Processes%20Info/Coal%20Utilization%20in%20the%20Steel%20Industry.aspx>.

Moilanen, A., Nieminen M. & Alén, R. 1995. Polttoaineiden ominaisuudet ja luokittelu. Julkaisussa Poltto ja palaminen. Toim. Risto Raiko. Helsinki: Teknillisten Tieteiden Akatemia TTA, 87 - 108.

Monipolttoainevoimalaitoksen investoinnin ajoituksesta on päätetty. 2013. Turun Seudun energiantuotannon lehdistötiedote. Julk. 17.12.2013. Viitattu 28.3.2014. <http://tset.fi/post/monipolttoainevoimalaitoksen-investoinnin-ajoituksesta-on-paetetty>.

Naantaliin nousee sähköä ja lämpöä tuottava monipolttoainelaitos. 2012. Artikkelin Rannikkoseutu-lehden nettisivuilla. Julk. 3.7.2012. Viitattu 28.3.2014.  
<http://www.rannikkoseutu.fi/Uutiset/1194751416964/artikkeli/naantaliin+nousee+sahkoa+ja+lampoa+tuottava+monipolttoainelaitos.html>.

Pat. WO 2012/164162 A1. 2012. Method for producing bio-coke. Outotec Oyj, Espoo, Finland. Maija-Leena Metsäranta. Julk. 6.12.2012. Viitattu 17.3.2014.  
[http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en\\_EP&FT=D&date=20121206&CC=CA&NR=2836840A1&KC=A1](http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20121206&CC=CA&NR=2836840A1&KC=A1).

Pohjolan voima. 2014. Pohjolan voiman voimalaitokset. Viitattu 28.3.2014.  
<http://www.pohjolanvoima.fi,voimalaitokset>.

Päästökauppa. 2014. Työ- ja elinkeinoministeriö. Päivitetty 23.1.2014. Viitattu 28.2.2014. <http://www.tem.fi/index.phtml?s=1017>.

Raunio, H. 2008. Masuunin savukaasujen kierrätysperiaate. Kuva. Julkaistu artikkelissa Nykytekniikalla fysiikan lait estävät päästövähennykset. Tekniikka ja Talous 20.10.2008. Viitattu 15.4.2014.  
<http://www.tekniikkatalous.fi/metalli/nykytekniikalla+fysiikan+lait+estavat+paastova+hennykset/a148197>.

Res Legal. 2014. Legal sources on renewable energy. Renewable energy policy database and support. Viitattu 26.3.2014. <http://www.res-legal.eu/>.

Ruukki parantaa Raahan terästehtaan kustannustehokkuutta uudella masuunien hiili-injektiolaitteistolla. 2014. Pörssitiedote. Rautaruukki. Julk. 9.4.2014. Viitattu 14.4.2014. <http://www.ruukki.fi/Uutiset-ja-tapahtumat/Uutisarkisto/2014/Ruukki-parantaa-Raahan-terastehtaan-kustannustehokkuutta-uudella-masuunien-hiili-injektiolaitteistolla>.

Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M. & Faail, A. 2011. The European wood pellet markets: current status and prospect for 2020. Julkaistu kausijulkaisussa *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 5, 250–278.

Steel Statistical Yearbook 2013. 2013. Bryssel: World Steel Association. Viitattu 3.3.2014. <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive/Steel-Statistical-Yearbook-2013/document/Steel-Statistical-Yearbook-2012.pdf>.

Stora Enso. 2013. Capacities by Mill in 2013. Stora Enso. Viitattu 31.3.2014.  
<http://www.storaenso.com/about/mills-capacities>.

Suopajärvi, H. 2013a. Masuunin toiminta käytettäessä erilaisia injektaitavia pelkistimiä -simulointitutkimus. Bioreducer: Biomateriapohjaiset pelkistysaineen mahdollisuudet -hanke. Oulun yliopisto. Viitattu 24.2.2014.  
[http://cc.oulu.fi/~kamahei/z/research/2013\\_06\\_11/WP4\\_2%20Masuunisimulointi\\_netti.pdf](http://cc.oulu.fi/~kamahei/z/research/2013_06_11/WP4_2%20Masuunisimulointi_netti.pdf).

Suopajärvi, H. 2013b. Biopelkistimen tuotannon hiilidioksidipäästöt, energiantarve ja taloudellisuus. Bioreducer-hanke. Oulun yliopisto. Viitattu 25.2.2014.  
[http://cc.oulu.fi/~kamahei/z/research/WP5-BiopelkistimienTuotannon-yv\\_nettti.pdf](http://cc.oulu.fi/~kamahei/z/research/WP5-BiopelkistimienTuotannon-yv_nettti.pdf).

Suopajärvi, H., Iljana, M. & Haapakangas, J. 2013. Biomateriapohjaisten ja vaihtoehtoisten raaka-aineiden ja tuotteiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Bioreducer: Biomateriapohjaisen pelkistysaineen mahdollisuudet. Oulun Yliopisto. Viitattu 17.3.2014. [http://www.oulu.fi/sites/default/files/content/WP2%201-Fysikaaliset%20ja%20kemialliset%20ominaisuudet\\_nettti.pdf](http://www.oulu.fi/sites/default/files/content/WP2%201-Fysikaaliset%20ja%20kemialliset%20ominaisuudet_nettti.pdf).

Sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineet. 2013. Tietokanta. Helsinki: Tilastokeskus. 31.3.2014.  
[http://pxweb2.stat.fi/Dialog/varval.asp?ma=020\\_salatuo\\_tau\\_102\\_fi&path=./database/StatFin/ene/salatuo/&lang=3&multilang=fi](http://pxweb2.stat.fi/Dialog/varval.asp?ma=020_salatuo_tau_102_fi&path=./database/StatFin/ene/salatuo/&lang=3&multilang=fi).

Sähkön ja lämmön tuotanto sekä energialähteet 2011. 2012. Energiatilasto 2012. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 31.3.2014.  
[http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2012/start.htm](http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2012/start.htm).

Sähkön tuotanto ja nettotuonti EU-maissa 2010. 2012. Energiatilasto 2012. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 11.4.2014.  
[http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2012/start.htm](http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2012/start.htm).

Teräskirja. 2009. 8.p. Tampere: Metallinjalostajat ry.  
The 2020 climate and energy package. 2014. Euroopan Komissio. Viitattu 18.2.2014.  
<http://ec.europa.eu/clima/policies/package/>.

The EU Emission Trading System. 2014. Euroopan komission sivustoilla olevaa tietoa päästökaupasta. Viitattu 12.2.2014.  
[http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm).

UPM. 2014. Selluntuotanto Suomessa. UPM. Viitattu 31.3.2014.  
<http://www.upm.com/FI/UPM/Liiketoiminnot/Sellu/Suomi/Pages/default.aspx>.

Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistäminen. 2010. Tiivistelmä EU:n lainsäädännöstä. Päivitetty 9.7.2010. Viitattu 18.2.2014.  
[http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/renewable\\_energy/en0009\\_fi.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/en0009_fi.htm).

Vantaan Energia. 2014. Vantaan Energian tuotantolaitokset. Viitattu 28.3.2014.  
<http://www.vantaanenergia.fi/fi/TietoaKonsernista/Sivut/default.aspx>, Tietoa konsernista, Tuotantolaitokset ja verkostot.

Virkkunen, M., Flyktman, M. & Raitila, J. 2012. Puuhiilen tuotanto Suomessa - mahdollisuudet ja haasteet. BalBic, bioenergian ja teollisen puuhiilen tuotannon kehittäminen -aloitusseminaari. VTT. Viitattu 25.3.2014.  
[http://www.balbic.eu/fi/ajankohtaista/2012/fi\\_FI/aloitusseminaarin\\_esitykset/\\_files/87145337845471165/default/Puuhiilen\\_tuotanto\\_Suomessa\\_VTT.pdf](http://www.balbic.eu/fi/ajankohtaista/2012/fi_FI/aloitusseminaarin_esitykset/_files/87145337845471165/default/Puuhiilen_tuotanto_Suomessa_VTT.pdf).

Volama, J. 2011. Kuva hakkeesta, biohiilestä ja biohiilipelleteistä. Julkaistu Miktech Oy:n luvalla.

Wadsborn, R., Berglin, N. & Richards, T. 2007. Konvertering av mesaugnar från olje-till biobränsleeldning: Drifterfarenheter och modellering. Tukholma: Värmeforsk. Viitattu 31.3.2014. <http://www.varmeforsk.se/rapporter?action=show&id=2957>.

World Energy Outlook 2011. Raportti. Pariisi: IEA–International Energy Agency. Viitattu 11.4.2014. [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011_WEB.pdf).

Ympäristökatsaus 2011. 2012. Raahen tehdas. Ruukki. Viitattu 17.4.2014. <http://www.ruukki.fi/~media/Files/Corporate%20responsibility/Ruukki-Raahen-ymparistokatsaus-2011.ashx>.

Öljytuotteiden kuluttajahintojen kehitys. 2014. Tilasto. Öljyalan keskusliitto. Viitattu 28.4.2014. <http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/12-oljytuotteiden-kuluttajahintojen-kehitys>.