

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

BH10A1200 Diplomityö ja seminaari

Timo Korpinen

**BIOPOLTTOAINEEN RINNAKKAISPOLTON KANNAT-
TAVUUSTARKASTELU HIILIPÖLYPOLTTOKATILASSA
MARTINLAAKSO 2:SSA**

Työn tarkastajat:

Professori, Tekniikan tohtori Risto Soukka

Professori, Tekniikan tohtori Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja:

Tuotantopäällikkö Marko Ahl

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Ympäristötekniikan osasto

Timo Korpinen

Biopolttoaineen rinnakkaispolton kannattavuustarkastelu hiilipölypolttokattilassa Martinlaakso 2:ssa

Diplomityö

2012

162 sivua, 45 kuvaa, 63 taulukkoa ja 8 liitettä

Tarkastajat: Professori Risto Soukka
Professori Esa Vakkilainen

Hakusanat: biopolttoaine; rinnakkaispolto; kaasutus; torrefioitu biohiili; bio-SNG; chlor out; IE-direktiivi.

Euroopan unionin asettamat tavoitteet kasvihuonepäästöjen vähennykselle johtavat vihreämpään teknologiaan. Tämä diplomityö on teoreettinen tutkimus, joka käsittelee biopolttoaineen rinnakkaispolton kannattavuutta Vantaan Energian Martinlaakso 2:sen hiilipölypolttokattilassa.

Työssä perehdytään viiteen eri biopolttoainevaihtoehtoon, joita tarkastellaan viidessä eri skenaariossa, jotka vastaavat: 10, 20, 30, 40 ja 50 % biopolttoaineen osuutta kattilassa tuotetusta energiasta. Skenaarioissa on pohdittu tarvittavia investointikustannuksia ja muutostöitä hiilipölypolttokattilassa. Tutkimuksessa on huomioitu myös uusi isojen laitosten päästöjä koskeva direktiivi, kattilan oletettava käyttöikä sekä biopolttoaineiden tuet. Saaduista arvioista on lopuksi laskettu vuosittainen polttoainekohtainen kustannusarvio ja investoinnin kannattavuusarvio.

Tuloksista voidaan päätellä, että sahanpurun mahdollisimman suuri hyötykäyttö on kannattavaa. Mikäli halutaan käyttää suuria määriä biopolttoainetta, (yli 20 % tuotetusta energiasta) ei sahanpuru ole varteenotettava vaihtoehto huonon saatavuutensa johdosta. Tällöin hakkeen kaasutuslaitos olisi paras ratkaisu, mutta laitoksen kannattavuus riippuu tulevista energiatuista. Ilman energiatukia sahanpurun hyötykäyttö on ainoa kannattava investointi.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Department of Environmental Technology

Timo Korpinen

Feasibility study of biofuel co-combustion in pulverized coal boiler at Martinlaakso 2

Thesis of the Degree of Master of Science in Technology

2012

162 pages, 45 figures, 63 tables and 8 appendices

Examiners: Professor Risto Soukka
Professor Esa Vakkilainen

Keywords: biofuel; co-combustion; gasification; torrefied biocoal; bio-SNG; chlor out; IE-directive.

Targets set by the European Union to reduce greenhouse gas emissions lead to green technology. This thesis is a theoretical study that deals with feasibility of biofuel co-firing of Vantaa Energy's Martinlaakso 2 pulverized coal combustion boiler.

The work focuses on five different biofuel options, which will be examined in five different scenarios, corresponding to: 10, 20, 30, 40 and 50 % biofuel share of the energy produce in the boiler. In these scenarios there have been consider necessary investment costs and conversions to pulverized coal combustion boiler. This study also takes into account the new industrial emission directive, assumed service life to the boiler as well as financial subsidies for biofuel. Finally, from estimated values there have been calculated annual fuel-specific cost estimate and investments viability assessment.

From the results can conclude that the maximized reuse of sawdust is profitable. If company chooses to use large amounts of biomass (over 20 % of the produced energy), sawdust is not an option due to its poor availability. Gasification of wood chips would then be the best option, but its viability depends on the future of energy subsidies. Without the energy subsidies sawdust is the only profitable investment.

ALKUSANAT

Aika menee niin nopeasti. Tämä diplomityö on tehty Vantaan Energia Oy:n Martinlaakson voimalaitoksella tammi-elokuun 2012 aikana. Työtä on tehty yli seitsemän kuukautta, joka tuntuu seitsemältä viikolta.

Haluaisin kiittää koko Vantaan Energian henkilökuntaa mahtavasta työilmapiiristä ja kannustavista sanoista. Erityiskiitokset tahtoisin antaa työn ohjaajalle Marko Ahlille sekä työssäni hyvin paljon auttaneille Pekka Karjalaiselle, Tarmo Mansnerille ja vuoron pojille. Haluaisin myös kiittää kaikkia, jotka oikolukivat työni.

Suuret kiitokset kuuluvat myös tarkastajille professori Risto Soukalle sekä professori Esa Vakkilaiselle.

Vanhemmilleni ja sisaruksilleni kuuluvat myös lämpimät kiitokset, sillä he ovat aina olleet kannustamassa ja tukemassa tekemissäni valinnoissa. Myöskään ei pidä unohtaa ystäviäni niin Espoon, Lappeenrannan kuin Norjakin suunnalta, joiden kanssa olen viettänyt elämäni merkkihetkiä.

Tahtoisin myös kiittää Lappeenrannan teknillisen yliopiston opiskelijoita ja opettajia upeasta kuudesta vuodesta; erityisesti Pelletin aktiivijäseniä, jotka ovat tehneet opiskeluajastani hauskan ja mielenkiintoisen.

Haikein mielin kiitän ja kumarran.

Vantaalla 10.8.2012

Timo Korpinen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	7
LYHENNELUETTELO	10
MÄÄRITELMÄT	12
1 JOHDANTO	13
2 MARTINLAAKSO 2:SEN ESITTELY	16
2.1 Hiilen varastointi ja kuljetus	17
2.2 Polttoaineen kuljettimet, murskaamo ja siilot.....	17
2.3 Hiilimyllyt.....	18
2.4 Kattila.....	19
2.5 Palamisilman esilämmitin.....	20
2.6 Sähkösuodatin	20
2.7 Rikinpoistolaitos	21
3 BIOPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET	23
3.1 Biopolttoaineet.....	23
3.1.1 Sahanpuru	24
3.1.2 Pelletti	25
3.1.3 Torrefioitu biohiili	29
3.1.4 Kaasutus.....	35
3.1.5 Bio-SNG	40
3.2 Tuhkan käyttäytyminen	47
3.2.1 Lämpöpintojen likaantumismekanismit.....	47
3.2.2 Korroosion muodostuminen ja ongelmat.....	49
3.2.3 Lisäaineiden vaikutus tuhkan käyttäytymiseen	50
3.2.4 Tuhkan hyötykäyttö	50
4 LAINSÄÄDÄNNÖLLISET TUET JA RAJOITTEET	52
4.1 Tämänhetkiset valtion ja EU:n tukemat polttoaineet.....	52
4.1.1 Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuki	52
4.1.2 Energiatuki	54
4.1.3 Kaukolämpövero helpotus ja hiilidioksidin päästöoikeus	55
4.2 Lainsäädännölliset muutokset toimintaympäristössä.....	56
4.2.1 RES-direktiivin säädökset.....	56
4.2.2 Industrial emission direktiivin säädökset.....	58
4.2.3 Jätelaki	60
4.2.4 Oletettavat muutokset uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotukeen.....	61
5 PÖLYPOLTTOKATTILAN TEKNILLISET OMINAISUUDET BIOPOLTTOAINEEN RINNAKKASIPOLTOSSA	65
5.1 Hiilivoimalaitoksen teknilliset rajoitteet biopolttoaineen rinnakkaispoltossa	66
5.1.1 Kuljetukseen ja varastointiin liittyvät rajoitteet.....	66
5.1.2 Polttoaineen kuljettimiin liittyvät rajoitteet	67
5.1.3 Hiilimyllyihin ja syöttöilmapuhaltimiin liittyvät rajoitteet.....	67

5.1.4 Kattilaan liittyvät rajoitteet	68
5.1.5 Rikinpoistolaitokseen liittyvät rajoitteet	69
5.1.6 Savukaasupuhaltimiin liittyvät rajoitteet	71
5.2 Tuhkan huomioiminen pölypoltossa	72
5.2.1 Tuhkan käyttäytyminen pölypoltossa	72
5.2.2 Tuhkan korroosion ja kerrostumisen ehkäiseminen rinnakkaispoltossa	74
5.3 Typpipäästöjen vähentäminen	81
5.3.1 Low-NO _x polttimet	81
5.3.2 SNCR, ei-katalyyttinen typenpoisto	82
5.3.3 SCR, katalyyttinen typenpoisto	83
5.3.4 NO _x :n pelkistys maakaasulla	84
5.4 Rikkipäästöjen vähentäminen	84
5.4.1 Kuiva rikinpoistomenetelmä	85
5.4.2 Puolikuivamenetelmä	86
5.4.3 Märkäpesurimenetelmä	86
5.4.4 Vähärikkinen polttoaine	87
5.5 Rinnakkaispoltoon muutettavan kattilan huomioitavat kustannukset	87
5.6 Biopolttoaineiden polttokokeilut	92
5.6.1 Sahanpurun poltto	92
5.6.2 Pelletin poltto	94
5.6.3 Torrefioidun biohiilen poltto	97
5.6.4 Paikallisesti kaasutuslaitoksella tuotetun biokaasun poltto	100
5.6.5 Bio-SNG:n poltto	107
5.6.6 Yhteenveto biopolttoaineiden polttokokeiluista	107
6 RINNAKKAISPOLTTOSENKAARIODEN LUOMINEN	109
6.1 Ensimmäinen skenaario: Sahanpurun polttaminen	112
6.1.1 Sahanpurun polttamiseen vaadittava logistiikka, varastointi ja saatavuus	112
6.1.2 Sahanpurun polttamiseen vaadittava laitosmuutokset	113
6.2 Toinen skenaario: Puupellettien polttaminen	114
6.2.1 Puupelletin polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus	114
6.2.2 Puupelletin polttamiseen vaadittava laitosmuutokset	115
6.3 Kolmas skenaario: Torrefioidun biohiilen polttaminen	115
6.3.1 Torrefioidun biohiilen polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus	116
6.3.2 Torrefioidun biohiilen polttamiseen vaadittava laitosmuutokset	117
6.4 Neljäs skenaario: Paikallisella kaasutuslaitoksella tuotetun biokaasun polttaminen	117
6.4.1 Biokaasun polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus	118
6.4.2 Biokaasun polttamiseen vaadittava laitosmuutokset	119
6.5 Viides skenaario: Bio-SNG:n polttaminen	120
6.5.1 Bio-SNG:n polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus	121
6.5.2 Bio-SNG:n polttamiseen vaadittava laitosmuutokset	121
7 SKENAARIOLASKENTA JA ARVIOINTI	122
7.1 Savukaasulaskujen vertailu	122
7.2 Biopolttoaineiden käyttäytyminen rikinpoistolaitoksessa	125
7.3 Biopolttoaineiden tuhkan koostumus	133
7.4 Biopolttoaineiden kustannuslaskelma ja kannattavuus	135
7.4.1 Kustannuslaskelma ja kannattavuus tämänhetkisin arvoilla	136
7.4.2 Kustannuslaskelman ja kannattavuuden arvioita tulevaisuudesta	139

7.5 Biopolttoaineiden hankinta	145
7.6 IE-direktiivin joustomahdollisuuksien hyödyntäminen.....	147
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	148
9 YHTEENVETO	151
LÄHDELUETTELO	152

Liitteet

SYMBOLILUETTELO

Kaavojen symbolit

A	Investoinnin vuotuinen annuiteetti	[€/a]
$C_{\text{höyry}}$	Veden höyrystymislämpö	[kJ/kg]
Cl	Klooripitoisuudenmäärä	[mg/MJ]
c_{ni}	Annuiteettitekijä	
c_{vesi}	Veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
dT	Veden lämpötilan nousu	[K]
$d\epsilon$	Kulutuksen vähenemisen tuoma taloudellinen hyöty	[€/a]
H	Polttoaineen hinta portilla	[€/MWh]
HK	Huolto- ja korjauskustannukset	[€/a]
$HKKL$	Hakkeen kuvaamiseen tarvittava kaukolämpö	[€/a]
HKL	Hakkeen kuivaamiseen tarvittava kaukolämpö	[MWh/a]
I	Investointi	[€]
I_0	Investointi ennen energiatukea	[€]
i	Investoinnin laskentakorko	[%]
i_{sis}	Investoinnin sisäinen korkokanta	[%]
K	Kulutussuhde	
KV	Kaukolämpövero	[€/MWh]
k_t	Vuotuinen erotuskassavirta biopolttoaineen ja hiilen välillä	[€/a]
M	Moolimassa	[g/mol]
$M_{\text{CaO,teor}}$	Teoreettinen 100 % kalkin kulutus	[mg/MJ]
$M_{\text{CaO,tod}}$	Todellinen 90 % kalkin kulutus	
m	Tuotteen määrä	
MK	Muuttuvat käyttökustannukset	[€/MWh]
N	Moolia savukaasussa	[mol/MJ]
n	Investoinnin pitoaika	[a]
P_e	Päästöoikeuden kolmen kuukauden keskiarvohinta	[€/t _{CO2}]
P_{ee}	Hiilidioksidipäästömaksu	[€/MWh]
P_{kh}	Kivihiilen kolmen kuukauden keskiarvohinta	[€/MWh]

Q	Ttarvittava lämpöenergia	[kWh/kg]
	Rikinpoiston lopputuotteen väheneminen	[t/a]
RVS	Rikin vähenemisen tuomat säästöt	[€/a]
SO ₂	Rikkidioksidinmäärä	[mg/MJ]
ST	Biopolttoaineella tuotetun sähkön tuotantotuki	[€/a]
T	Tuotettu energia	[MWh/a]
X	Biopolttoaineen osuus tuotetusta energiasta	[%]
η	Hyötysuhde	[%]
η_{bio}	Biopolttoaineen aiheuttama hyötysuhteen väheneminen	[%]
Δ	Muutos	

Alaindeksit

bio	Biopolttoaine
H ₂ O	Vesihöyry
hake	Hake
in	Sisäänmenevä
kalkki	Kalkki
kattila	Kattila
kh	Kivihiili
kuivain	Kuivain
L	Lämpö
LT	Jätteenä sijoitetun lentotuhka
out	Ulostuleva
RPL	Rikinpoiston lopputuote
S	Sähkö
sk	Savukaasu

Kemialliset yhdisteet

Al	Alumiini
Al ₂ O ₃	Alumiinioksidi

C	Hiili
CH ₄	Metaani
C ₂ H ₆	Etaani
C ₃ H ₈	Propaani
C ₄ H ₁₀	Butaani
CO	Hiilimonoksidi, eli häkä
CO ₂	Hiilidioksidi
CO ₃ ²⁻	Karbonaatti
Ca	Kalsium
CaCO ₃	Kalkkikarbonaatti, eli kalkkikivi
CaCO ₃ ·MgCO ₃	Dolomiitti
CaCl ₂	Kalsiumkloridi
Ca(OH) ₂	Kalsiumhydroksidi, eli sammutettu kalkki
CaO	Kalsiumoksidi, eli kalkki
CaSO ₃	Kalsiumsulfiitti
CaSO ₄	Kalsiumsulfaatti, eli veden kanssa reagoidessaan kipsi
Cl	Kloori
Cr	Kromi
Fe	Rauta
Fe ₂ O ₃	Rautaoksidi
FeS ₂	Rautasulfidi, eli pyriitti
H ₂	Vety
HCN	Syaanivety
HCl	Vetykloridi, eli vesiliuoksessa suolahappo
H ₂ O	Vesi
H ₂ S	Hydrosulfidi
K	Kalium
KCl	Kaliumkloridi
K ₂ O	Kaliumoksidi
KOH	Kaliumhydroksidi
K ₂ SO ₄	Kaliumsulfaatti
Mg	Magnesium
MgO	Magnesiumoksidi
Mo	Molybdeeni

N ₂	Typpi
N ₂ O	Dityppioksidi, eli ilokaasu
NO	Typpimonoksidi
NO ₂	Typpidioksidi
NH ₃	Ammoniakki
NH ₄ Cl	Ammoniumkloridi
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammoniumsulfaatti
NH ₄ HSO ₄	Ammoniumvetysulfaatti
NO _x	Typen oksidit
Na	Natrium
NaCl	Natriumkloridi, eli ruokasuola
Na ₂ O	Natriumoksidi
O ₂	Happi
P	Fosfori
P ₂ O ₅	Fosforioksidi
Si	Pii
Si _x O _y	Silikaatti yhdisteet
SO ₂	Rikkioksidi
SO ₃	Rikkitrioksidi
SO ₄ ²⁻	Sulfaatti-ioni
TiO ₂	Titaanioksidi
ZnO	Sinkkioksidi
ZnS	Sinkkisulfidi

LYHENNELUETTELO

AS	Ammoniumsulfaatti
BAT	Best available technology, eli paras mahdollinen tekniikka
C	Cutter wood, eli jyrsinpuu
CFB	Circulating Fluidized-Bed, eli kiertoileijupeti
CHP	Combined Heat and Power eli sähkön ja lämmön yhteistuotanto
ECA	Energy research Centre of the Netherlands

ECU	European Currency Unit, eli Euroopan valuuttayksikkö
IE-direktiivi	Directive on industrial emission, eli teollisuuspäästöjen direktiivi
IACM	In situ Alkali Chloride Monitor, eli paikanpäällä mittaava alkali kloridi monitori
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control, eli yhdenmukainen ympäristönsuojelu
LCP	Large Combustion Plants, eli suuria polttolaitoksia koskeva direktiivi
LUVO	Luftvowärmer, eli palamisilman esilämmitin
Mar. 2	Martinlaakso 2
MARI	Martinlaakson rikinpoistolaitos
RDF	Refuse Derived Fuel on kierrätyspolttoaine, joka on sekalaista yhdyskuntajätettä
REF	REcoverd Fuel on kierrätyspolttoaine, joka on lajiteltua yhdyskuntajätettä
RES-direktiivi	Renewable Energy Source directive, eli Euroopan parlamentin ja neuvoston asettama direktiivi 2009/28/EY, joka koskee uusiutuvasta energialähteistä peräisin olevan energian osuutta kokonaiskulutuksesta vuonna 2020
SCR	Selective Catalytic Reduction, eli selektiivinen katalyyttinen typenpoisto
SEM	Scanning electron microscope, eli skannaava elektroni mikroskoopi
SG	Synthetic Gas, eli synteettinen kaasu
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction, eli selektiivinen ei-katalyyttinen typenpoisto
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
TOP-pelletti	Torrefied pellet, eli torrefioitu pelletti
TVA	The Tennessee Valley Authority
VOC	Volatile Organic Compounds, eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
W	Willow, eli paju

WID	Directive on the Incineration of Waste, eli jätteenpolttodirektiivi
-----	---

MÄÄRITELMÄT

Biokaasu	Biopolttoaineista paikallisella kaasutuslaitoksella tuotettu kaasu
Bio-SNG	Biological Synthetic Natural Gas, eli biomassasta jalostettu synteettinen maakaasu
Ekonomaiseri	Syöttöveden esilämmitin
Eksoterminen reaktio	Kemiallinen reaktio, joka vapauttaa lämpöä
Sintraantuminen	Aineen kiinteytymistä sulamislämpötilaa alhaisemmissa lämpötiloissa
Sorbentti	Yleisnimi sammuttamattomalle kalkille ja aktiivihieille
Syöttötariffi	Uusiutuvilla energialähteillä tuotettu sähkön tuotantotuki
Torrefiointi	Biomassan käsittelytekniikka, jossa biomassaa käsitellään 200–300 °C:n lämpötilassa hapettomassa olosuhteessa

1 JOHDANTO

Euroopan unionin tavoitteena on ilmaston lämpenemisen pysäyttäminen pitkällä aikavälillä kahteen asteeseen. Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi Euroopan parlamentti ja neuvosto on asettanut direktiivillä 2009/28/EY (RES-direktiivi) tavoitteita, jotka koskevat uusiutuvista energialähteistä peräisin olevan energian osuutta kokonaiskulutuksesta vuonna 2020. Tällöin EU:n tavoitteena on tuottaa 20 % energian kokonaiskulutuksesta uusiutuvalla energialla. Uusiutuvia energialähteitä ovat muun muassa aurinkoenergia, vesivoima, tuulivoima, puuenergia, peltoenergia, biovoima ja maalämpö. Tavoitteet uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämisestä ja kasvihuonekaasujen vähentämisestä ovat EU:n jäsenvaltioita sitovia. RES-direktiivissä Suomelle asetettu tavoite on 38 %. Ilmasto- ja energiapolitiikan ministeriöryhmä esitteli huhtikuussa 2010 joukon edistämistoimia (Pekkarinen M. 2010), joilla voitaisiin täyttää Suomelle asetettu tavoite lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä vuoteen 2020 mennessä. Yhtenä edistystoimena oli korvata 7-8 TWh kivihiilen käytöstä sähkön ja lämmön tuotannossa biopolttoaineilla.

Euroopan parlamentti ja neuvosto ovat hyväksyneet teollisuuspäästöjen direktiivin 2010/75/EU (IE-direktiivi). IE-direktiivin tavoitteena on suojella ympäristöä ja terveyttä sekä yhtenäistää useita teollisuuden päästöjä sääteleviä direktiivejä yhdeksi kokonaisuudeksi. Tämä direktiivi sisältää tiukempia rajoituksia rikki-, typpi- ja hiukkaspäästöille ja se astuu voimaan vuodesta 2016 alkaen. IE-direktiivi korvaa muun muassa suurten polttolaitosten direktiivin (LCP).

Vantaan Energia Oy on yksi Suomen suurimmista kaupunkienergiayhtiöistä. Yhtiön omistavat Vantaan (60 %) ja Helsingin (40 %) kaupungit. Vantaan Energia tuottaa sekä myy sähköä ja kaukolämpöä. Lisäksi se tarjoaa maakaasua teollisuuden tarpeisiin. Yhtiö vastaa kaukolämpöverkostojen rakentamisesta ja huollosta Vantaalla. Merkittävin osa sähköstä syntyy sähkön ja lämmön yhteistuotantona Martinlaakson voimalaitoksella, joka käyttää pääpolttoaineina maakaasua ja kivihiiltä. Yksi Martinlaakson voimalaitoksen sähkön ja lämmön tuottajista on vuonna 1982 valmistunut polttoaineteholtaan 230 MW:n kivihiilipölykattila (Martinlaakso 2). Vantaan Energialla on oma yhteiskuntavastuustrategia, jossa vastuullisuudella on kolme ulottuvuutta: kannattava talous, sidosryhmien huomioiminen sekä ympäristöstä huolehtiminen, jossa vastuu ympäristöstä ja energiatehokkuuden paran-

tamisesta ovat keskeisiä lähtökohtia. (VE, a.) Yhtiö rakentaa Långmossebergeniin jätevoimalaa, jonka on suunniteltu vähentävän hiilenkäyttöä sähkön- ja lämmöntuotannossa noin 30 % ja yhtiön kokonaispäästöjä noin 20 % nykyisestä. Suunnitelmien mukaan jätevoimalan tulisi olla valmis vuonna 2014 ja se tulee korvaamaan Martinlaakson yhden käyttöikänsä loppuun tulevan tuotantoyksikön (Martinlaakso 1) viimeistään vuonna 2015. (VE, b.) Vantaan Energian yksi strategisista tavoitteista on vuonna 2016 tuottaa 40 % energiatuotannosta hiilidioksidivapaana, samalla kun 20 % energiatuotannosta on kokonaan uusiutuvalla energialla toteutettua. (VE, c.)

Vantaan Energia Oy:n strategiassa on päätetty keskittyä lämmön ja sähkön yhteistuotantoon. Yhteistuotanto on kannattavin tapa tuottaa lämpöä ja sähköä, jolloin polttoaineesta saadaan hyödynnettyä mahdollisimman paljon ja päästöt pysyvät mahdollisimman pieninä tuotettua energiamäärää kohden. Uusien päästädirektiivien, uusiutuvan energian tukien ja kivihiileen kohdistuvien verojen ansiosta on kannattavaa tutkia uusiutuvien energialähteiden tuomaa etuutta lämmön ja sähkön yhteistuotannossa. Monipuolinen energiantuotantorakenne lisää myös tuotantokykyä ja vähentää riskejä. Näihin riskeihin sisältyy epävarmuus tulevaisuuden energiantarpeesta, verotuksesta ja tuista. Tämänhetkinen uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuki päättyy tämän vuoden (2012) lopulla ja uudesta tuotantotuesta ei ole vielä varmuutta. Tulevaisuuden ennusteen mukaan lämmöntarve vähenee vuonna 2020. Tämä johtuu vanhojen rakennusten saneerauksista ja uusien rakennusten energia pihiydestä. Valtion tuet rakennusten saneerauksiin ja lait uusien rakennusten määräyksiin vaikuttavat olennaisesti tulevaisuuden energiantarpeeseen. (Ahl M. 2012.)

Tämän työn tavoitteena on löytää paras mahdollinen biopolttoaine, jota on mahdollista käyttää rinnakkaispolttoaineena Martinlaakso 2 kivihiilipölypolttokattilassa, jotta yhtiö pääsisi lähemmäksi tavoitetta tuottaa 20 % energiatuotannosta uusiutuvalla energialla. Työssä tulee tutkia kuinka paljon eri biopolttoaineita voidaan käyttää Martinlaakso 2:ssa ja minkälaisia investointeja tämä muutos vaatii. Investoinnissa tulee huomioida Martinlaakso 2 kesällä 2012 tehtävä kuntotarkastus. Tämänhetkinen kattilan käyttöiän liukuma takaraja on vuoteen 2023, mutta kesän 2012 aikana selviää kattilan todellinen käyttöikä. Tutkimukseen tulee sisällyttää myös uuden polttoainekonseptin taloudellinen näkymä ja IE-direktiivin asettamat uudet päästörajoitteet. Tällä hetkellä Martinlaakso 2 ylittää IE-direktiivin asettamat rikki- ja typpipäästöt. Työssä selvitetään, myös sitä millä keinoilla Martinlaakso 2 voi päästä asetettujen päästöarvojen alapuolelle. Typenoksidipäästöjen vä-

hentämismenetelmien soveltaminen Martinlaakso 2:een on rajattu työn ulkopuolelle, koska typenoksidipäästöt ovat pääosin riippuvaisia polttoteknisistä menetelmistä sekä tarkkaan typenoksidipäästöjen tarkasteluun tarvitaan tietokonemallintamisohjelma. Vaikka Vantaan Energian omistaa muitakin toimilaitoksia, tämä työ käsittelee vain Martinlaakso 2:n. Tässä työssä käsitellään muutoksia vain teorian pohjalta, eikä tehdä käytännön kokeita.

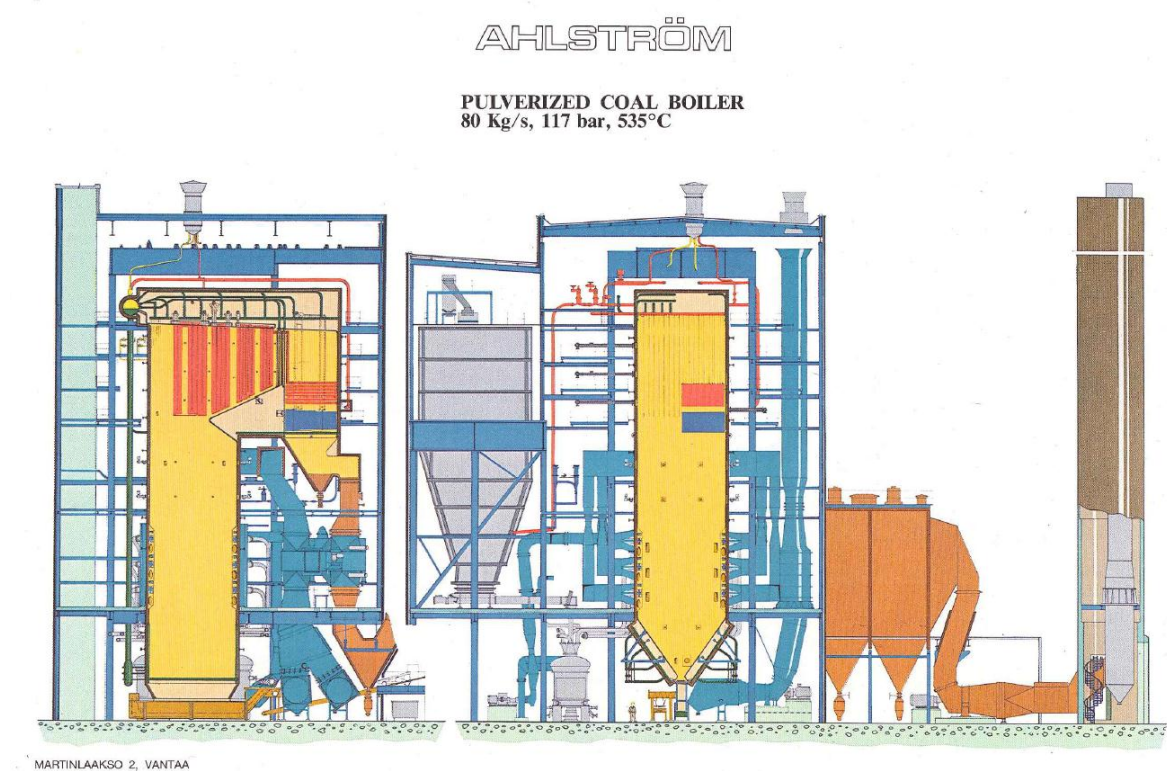
Työ on ajankohtainen, koska Martinlaakso 2:ssa joudutaan tekemään laitosmuutoksia joka tapauksessa uuden IE-direktiivin johdosta. Jos biopolttoaineen rinnakkaispoltto on kannattavaa, nämä laitosmuutokset voidaan suunnitella ja toteuttaa biopolttoaineen rinnakkaispolttolle sopivaksi.

Tämä työ toteutetaan teoreettisesti selvittämällä mahdollisia vaihtoehtoja erilaisten biopolttoaineiden rinnakkaiskäyttöön Martinlaakso 2:ssa. Työssä selvitetään eri biopolttoaineiden polttotekniikoita ja investointi- sekä käyttökustannuksia hiilipölypolttokattilassa. Työssä myös kartoitetaan eri metodeja päästöjen vähentämiseksi. Työn tekeminen ajoittuu tammi-kuusta elokuuhun 2012.

Työ aloitetaan esittelemällä Martinlaakso 2, jonka jälkeen selvitetään eri biopolttoaineiden ominaisuuksia, jossa käsitellään hiilipölypolttokattilan rinnakkaispolttoon soveltuvia biopolttoaineita yleisellä tasolla. Kolmanneksi käydään läpi tämänhetkisiä ja tulevia lainsäädännöllisiä muutoksia Suomen ja EU:n tasolla sekä valtion ja EU:n tukimenetelmiä tietyille polttoaineille. Tämän jälkeen tutkitaan hiilipölykattiloita teknisellä tasolla: kuinka biopolttoaine vaikuttaa näihin kattiloihin ja minkälaisia tekniikoita on saatavilla päästöjen vähentämiseksi. Tässä kappaleessa käydään myös läpi esimerkkejä hiilipölypolttokattilaan tehdyistä biopolttoaineiden polttokokeiluista ja tehdyistä muutoksista polttoaineiden käyttöönottoa varten. Tämän jälkeen luodaan skenaariot eri biopolttoainevaihtoehdoille, joissa pohditaan eri polttoaineiden tuomia laitosmuutoksia ja investointikustannuksia Martinlaakso 2:ssa. Viimeisenä tehdään laskelma ja arviointi, jossa vertaillaan skenaarioissa tarkasteltujen biopolttoaineiden eroja käyttöominaisuuksien, saatavuuden ja investointien kannalta. Arvioinnissa tulisi käydä ilmi, minkälainen biopolttoaine olisi paras mahdollinen Martinlaakso 2:ssa, kuinka paljon biopolttoainetta olisi mahdollista käyttää ja minkälaisia investointeja kyseinen biopolttoaine vaatii.

2 MARTINLAAKSO 2:SEN ESITTELY

Martinlaakso 2:nen (Mar. 2) on kuvan 1 mukainen A. Ahlström Oy:n toimittama nurkka-polttoinen kivihiilipölypolttolaitos, jonka on polttoaineteholtaan 230 MW ja on otettu käyttöön vuonna 1982. Mar. 2:nen tuottaa noin 1,1 TWh energiaa vuodessa, josta 1/3 on sähköä ja 2/3 on kaukolämpöä. Laitos toimii noin 85 % hyötysuhteella. (Karjalainen P. 2012.) Pääpolttoaineena kattilassa käytetään kivihiiltä, mutta siinä on mahdollista käyttää myös maakaasua ja raskasta polttoöljyä, niin yhdessä kivihiilen kanssa kuin erikseen. Käytetyistä polttoaineista kivihiilen osuus on ollut yli 90 % ja maakaasun alle 10 %. Laitosta voidaan käyttää kaikilla polttoaineilla täydellä teholla ja niitä voidaan käyttää myös samanaikaisesti. Laitosta ajetaan noin 5 000–6 000 tuntia vuodessa. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 20; Pöyry. 2010a, 11.)



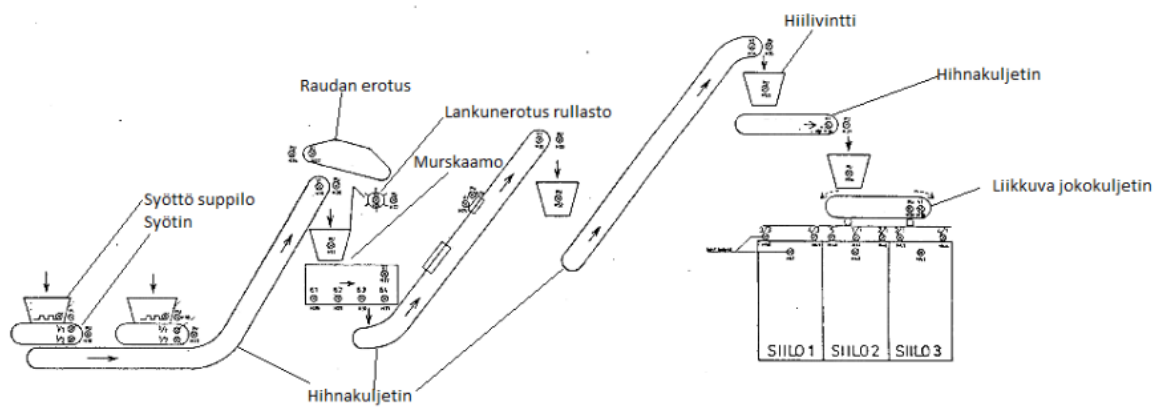
Kuva 1: Martinlaakso 2 yleiskuva

2.1 Hiilen varastointi ja kuljetus

Hiiltä varastoidaan hiilikentällä jonka pinta ala on noin 2 ha. Erilaatuiset hiilet varastoidaan omilla kasoilla, jolloin tiedetään tarkasti minkä laatuista hiiltä käytetään. Martinlaakson voimalaitoksessa pyritään käyttämään Venäläisen- ja Puolalaisen tai Kazakstanilaisen hiilen sekoitusta. Tavallisen ajokauden aikana kyseistä seosta poltetaan suhteessa 2/3 Venäläistä ja 1/3 Puolalaista tai Kazakstanilaista hiiltä. (VE sisäiset tiedostot) Hiiltä kuljetetaan Martinlaakson voimalaitokselle Kantvikin ja Inkoon satamista. (Lommi M. 2012)

2.2 Polttoaineen kuljettimet, murskaamo ja silot

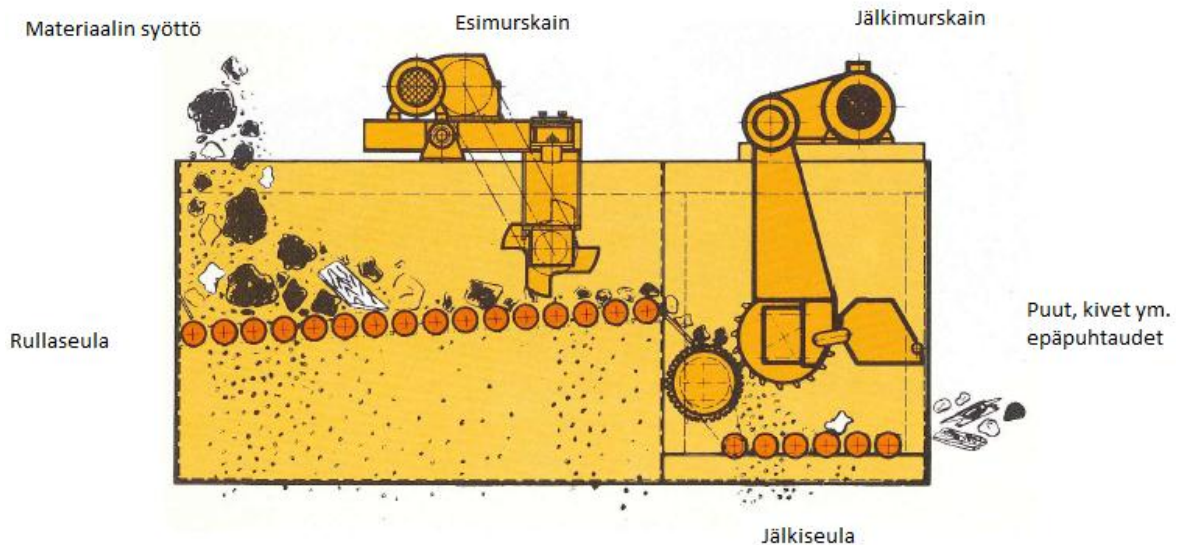
Hiili kuljetetaan hiilikentältä siloihin kuvan 2 mukaisesti. Kuljettimien pituus on yhteensä 425 m, nousu noin 60 m ja kapasiteetti on 600 t/h. Hiili lastataan syöttösuppiloihin, josta syötin annostelee hiilen hihnakuljettimille, joka johtaa murskaamoon. (VE sisäiset tiedostot)



Kuva 2: Hiilen kuljetinlaitteisto. (VE sisäiset tiedostot)

Murskaamo sisältää hihnamagneetin, lankunerotusrullaston ja rullaseulamurskaimen. Hihnamagneetti erottaa raudan ja lankunerotus rullasto erottaa hiilen seasta pitkät kappaleet. Tämän jälkeen hiili kulkee rullaseulamurskaimen läpi kuvan 3 mukaisesti, jossa se murskataan ja seulotaan kahteen otteeseen, esi- ja jälkimurskaimella sekä seulalla. Rullamurskaimen tarkoitus on murskata ylisuuri hiili ja hiilipaakut alle 30 mm raekokoon sekä poistaa sitä suuremmat murskautumattomat epäpuhtaudet. Tämän jälkeen hihnakuuljetin vie hiilen

risteysasemalle, josta toinen hihnakuljetin vie hiilen hiilivintille. Hiilivintiltä hiili jatkaa matkaa hihnakuljettimien kautta liikkuvaan jakokuljettimeen, joka siirtää hiilen hiilisiiloihin. Hiilisiiloja on kolme ja ne pyritään täyttämään siten, että Venäläistä hiiltä olisi siiloissa 1 sekä 3 ja Puolalaista tai Kazakstanilaista hiiltä olisi siilossa 2. (Roxon, 1986, liite 1, 7; VE sisäiset tiedostot)



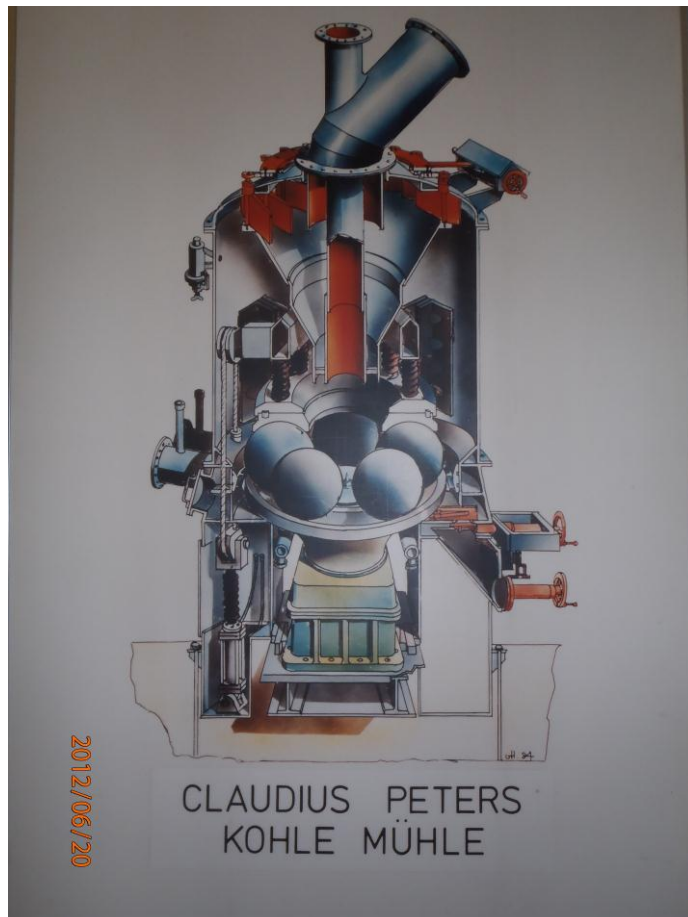
Kuva 3: Rullamurskain (Kone, 1984, 2.)

2.3 Hiilimyllyt

Martinlaakso 2:ssa on kolme Glaudius-Peters EM 59–585 –hiilimyllyä. Vuonna 1993 hiilimyllyt varustettiin pyörivillä seuloilla, jotka pudottivat hiilimyllyjen kapasiteettiä noin 4 %, eli 4,15:sta 4,0:n kg/s jolloin ilma/hiilisuhde on 2,6. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 235, 236.)

Hiilimyllyt toimivat kuvan 4 mukaisesti. Hiili johdetaan raaka-aineränniä pitkin alemman jauhinradan keskelle, josta se joutuu keskipakovaikutuksesta jauhatuskuulien alle. Jauhatuskuulat ovat paksuseinäisiä, onttoja, valettuja kuulia, jotka pyörivät kahden jauhinrenkaan välissä kuin kuulalaakeri. Vaadittu jauhatuspaine saadaan aikaan hydraulisesti säädettävillä painejousilla, jotka vetävät ylemmää jauhinrengasta alaspäin. Syöttöilma ja kantoilma tempaavat jauhetun aineksen mukaansa ja johtavat sen seulaan, josta riittävän hieno

kivihiili johtuu kattilaan ja suuremmat partikkelit virtavat takaisin jauhatustilaan. (A. Ahlsröm Oy. a, 4, 5; Lommi M. 2012.)



Kuva 4: Claudius-Peters EM 59–585 –hiilimylly

2.4 Kattila

Martinlaakso 2:sen kattila on polttoaineteholtaan 230 MW hiilipölypolttokattila, jonka höyryntuotto on 88 kg/s 117 bar, 535 °C. Alkuperäinen mitoitus höyryntuotto oli 80 kg/s. Kattila on kulmapolttoinen luonnonkiertokattila, jonka keittopinnoilla kiertävän vesimassan ja kattilan höyrymäärän suhdetta kuvaava kiertoaluku on noin 8-10. Kattilassa on kolme poltintasoa, joissa voidaan polttaa kivihiiltä, maakaasua ja öljyä. Vuonna 1993 kattilaan on asennettu Low-NO_x -polttimet, jotka syöttää tertiääri-ilmaa kattilan yläosaan. Yläilma- muutos vähensi NO_x päästöjä 320:stä 180:een mgNO_x/MJ. Kattilan hiilipolttimiin on asennettu venturikuristimet, joilla saadaan hiilipölylle riittävä virtausnopeus pienemmällä ilmamäärällä. Tämän ansiosta kantoilmaa määrää on voitu pienentää ja siirtää yläilmaksi

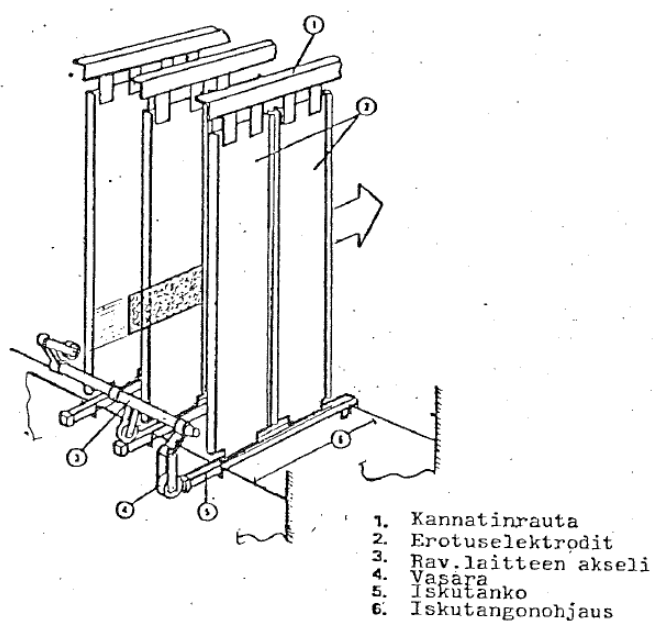
lisäämättä kokonaisilmamäärää. Kuristimien ansiosta palaminen saadaan stabiloitua ja liekki tuotua lähelle polttimia myös pienillä kuormamäärillä. (Lommi M. 2012; Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 235–238.)

2.5 Palamisilman esilämmitin

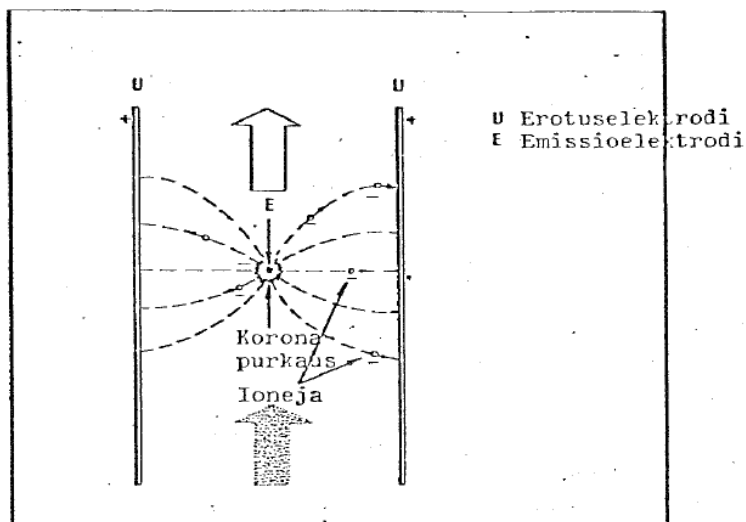
Laitoksella on käytössä Ljugström-ilmanesilämmitin (LUVO), joka on regeneratiivinen esilämmitin pyörivin varaajamassoin. LUVO:n lämpöelementit siirtyvät hitaasti pyörivän roottorin mukana savukaasukanavasta ilmanakanaan ja sieltä takaisin savukaasukanavaan. Lämpöelementtien ollessa kaasukanavassa se ottaa savukaasuista lämpöä, jonka se luovuttaa ilmanakavassa oloaikana takaisin palamisilmaan. Palamisilma johdetaan edelleen kattilan polttimille hiilimyllyjen kautta tai syöttöilmana. Savukaasu jäähtyy LUVO:ssa 373–125 °C ja polttoilma lämpenee 35–310 °C. LUVO:n lämpöpinta-ala on 13 870 m² ja roottorin kierrosluku normaalissa ajossa on 1,50 1/min. (A. Ahlsröm Oy. b, 2-4.)

2.6 Sähkösuodatin

Martinlaakso 2:ssa on käytössä alkuperäinen vuonna 1982 käyttöönotettu sähkösuodatin, joka toimii esipuhdistimena ennen rikinpoistolaitosta ja letkusuodattimia. Sähkösuodattimen erotusaste on 99,2 %. Sähkösuodatin toimii kuvien 5 ja 6 mukaisesti. Kattilasta virtaava puhdistamaton savukaasu imetään sähkösuodattimeen. Sähkösuodattimen tulospipilossa on kaksi kaasujakoverhoa. Verhon muodostaa ilmanohjainristikko, joka on asennettu niin, että savukaasun virtausnopeus on sama koko suodattimen poikkipinnalla. Kummallakin puolella on kolme suodatinkammiota, joissa hiukkaset erotetaan savukaasuista. Erotus tapahtuu kuvan 6 mukaisesti: emissiolangat varaavat ohivirtaavat pölyhiukkaset negatiiviseksi, jolloin positiiviset erotuselektrodit vetävät ne puoleensa. Erotettu pöly ravistetaan elektrodijärjestelmistä ravistuslaitteilla, jolloin pöly putoaa suodattimilta pohjasuppiloon ja tuhkalähettille. Tuhkalähettilmä erotettu pöly johdetaan pneumaattisesti tuhkaasiloon. (A. Ahlsröm Oy. c, 1, 2; Lommi M. 2012.)



Kuva 5: Sähkösuodattimen erotuselektrodi (A. Ahlsröm Oy. c, liite 2.)



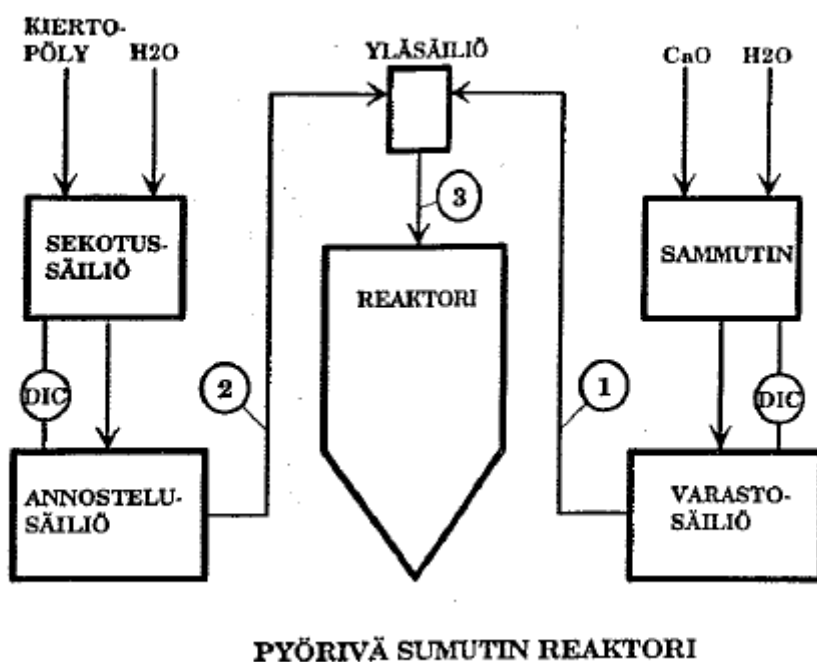
Kuva 6: Sähkösuodatinionien emittoituminen (A. Ahlsröm Oy. c, liite 5.)

2.7 Rikipoistolaitos

Martinlaakson rikipoistolaitos (MARI) on puolikuivamenetelmällä toimiva rikipoistolaitos, joka otettiin käyttöön vuoden 1993 lopussa. MARI on mitoitettu päästötasolle 70 mg

SO₂/MJ ja sen erotuskyky on 95 %. Mitoitetun hiilen klooripitoisuus on alueella 0,1-0,4 % saapumistilassa. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 1, 2.)

MARI:ssa on käytössä kuvan 7 mukainen NIRO-reaktori, jossa on pyörivä sumutinlaite. Sumutinlaiteeseen tuleva sammutettu kalkki (Ca(OH)₂) (1) ja kiertopölyliete (2) sekoitetaan reaktorin yläpuolella olevassa säiliössä, josta sumutettava liete (3) johdetaan reaktoriin. Reaktorissa sumutettu liete reagoi rikkidioksidimolekyylien kanssa. Reaktorissa erotettu kiintoaine johdetaan suoraan lopputuotesiiloon. Loput savukaasun kiintoaineesta erotetaan letkusuodattimessa. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 3.)



Kuva 7: Martinlaakson rikinpoistolaitoksen reaktorin toimintakaavio (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 67.)

Letkusuodattimissa on neljä kammiota, joista yksi voi olla kerrallaan pois käytöstä. Kerätty pöly kuljetetaan lähettimillä joko kiertopölysiiloon tai lopputuotesiiloihin. Lopputuotesiilo sijaitsee lentotuhkasiilon vieressä ja niiden välissä on lopputuotteen sekoituslaitteisto. Laitteistolla on mahdollista sekoittaa erilaisia lisäaineita, joiden käyttöön on varauduttu tilavarauksin. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 30, 31.) Lopputuote johdetaan pneumaattisesti lopputuotesäiliöön, josta se kuljetetaan loppusijoitukseen.

3 BIOPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET

Biopolttoaineiden käyttö on lisääntymässä. Lisääntynyt tietoisuus ympäristövaikutuksista ja fossiilisten polttoaineiden loppuminen johtavat uusiin innovaatioihin energiateollisuudessa. Biopolttoaineiden ominaisuudet poikkeavat paljon fossiilisista polttoaineista. Kosteuspitoisuus, sitkeys ja tuhkan käyttäytyminen ovat ehkä merkittävimpiä poikkeavuuksia. Tässä kappaleessa käydään läpi erilaisten biopolttoaineita ja niiden ominaisuuksia.

3.1 Biopolttoaineet

Biopolttoaineisiin kuuluvat, niin maissi sokeriruoko ja peruna kuin hakkuujätteet, maatalousjätteet ja purkupuutavarakin. Tässä kappaleessa esitellään vain muutamia erilaisia biopolttoaineita ja niiden tuotantotekniikoita, hintoja sekä saatavuutta. Nämä polttoaineet on valittu hiilipölypolttokattilaan soveltuvuuden perusteella.

Suomessa on käytössä laki kestävän metsätalouden rahoituksesta (Kemera) (544/2007). Tämä laki edistää puuntuotannon ja energiapuun käyttöä sekä turvaa metsien biologisen monimuotoisuuden. Eduskunta on myös säätänyt lain pienpuun energiatuesta (101/2011), jonka oli tarkoitus korvata Kemeran nojalla maksettavan energiapuun korjuu- ja haketustuet. Euroopan komissio ei ole kuitenkaan vielä hyväksynyt lakia pienpuun energiatuesta, vaan katsoo, että tuki tulisi maksaa sähköä ja lämpöä tuottaville laitoksille eikä energiakäyttöön tuotettavalle pienpuulle, joka korjataan nuorten metsien hoidon tai ensiharvennusten yhteydessä. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2012.) Nämä lait tai lakiehdotukset osoittavat valtion halua tukea ja edistää puun energiahyötykäyttöä. Tästä voidaan olettaa, että tulevaisuudessa puun energiahyötykäyttö tulee kasvamaan ja energiapuuta tulee enemmän markkinoille. Tukijärjestelmän ansiosta biopolttoaineen hinnannousu on maltillisempaa, vaikka käyttö lisääntyisi.

Biopolttoaineiden tulevaisuuden käyttöaste riippuu myös tulevista päästöoikeuksien hinnoista. Päästöoikeuksien hintataso riippuu hyvin paljon poliittisista päätöksistä ja sähkön hinnasta. (Vision Hunters, 2011, 11.) Vuonna 2013 alkavalla uudella päästökauppaudella on vähemmän ilmaisia päästöoikeuksia. (8.4.2011/311, 18 §, 19 §.)

3.1.1 Sahanpuru

Sahanpuru, jota syntyy sahateollisuuden sivutuotteena, on yksi mahdollinen polttoaine pölypoltossa. Sahoille päätyvästä raaka-aineesta vain 45 % päätyy sahatavaraksi. Loput päätyvät puuhakkeeksi (30 %), kuoreksi (10 %) ja puruksi (15 %). Sahat käyttävät hakkeen, kuoren ja osan purusta omaan lämmöntuotantonsa. Koska sellutehtailla on erittäin hyvä hakkeenmaksukyky (23 €/MWh), ei energiateollisuuden kannata kilpailla hakkeesta. Tällöin vain osa purusta voisi päätyä energiateollisuuden hyödynnettäväksi. (Vision Hunters, 2011, 24.)

Sahanpurun haittana on sen suuri tilavuus ja kosteuspitoisuus, jotka aiheuttavat ongelmia sen säilyvyydessä. Lisäksi purun pienen energiatiheyden takia sen kuljetus tulee kalliiksi. Liitteessä 1 taulukossa 59 näkyvät sahanpurun ja kivihiilen aineominaisuudet ja tuhkan aineisuus taulukosta 60. (Savolainen K. 2003, 369.)

Huonon saatavuutensa johdosta sahanpurua voitaisiin käytännössä polttaa vain pieniä määriä. Jos sahanpurua saadaan läheltä, on se hyvinkin kilpailukykyinen polttoaine halvan hintansa ansiosta. Sahanpurun porttihinta on arvioitu olevan noin 18 €/MWh. (Vision Hunters, 2011, 57.) Sahanpurua ei myöskään pystytä säilyttämään ulkoilmassa. Tällöin purulle täytyisi rakentaa varastosiilo, josta purua voitaisiin syöttää hiilikuljettimille tai omien kuljettimien kautta myllyille ja kattilaan.

Alla olevasta taulukosta 1 nähdään sahanpurun tuottamat savukaasupäästöt. Taulukossa on laskettu, kuinka paljonko savukaasu sisältää hiilidioksidia (CO_2), rikkidioksidia (SO_2), typpeä (N_2), vesihöyryä (H_2O) ja klooria (Cl) tuottaessa 1 MJ lämpöenergiaa. Laskuissa on oletettu, että kaikki polttoaineen tyyppi muodostaa typpikaasua, palaminen on täydellistä, tilanne ennen rikinpoistoa ja ilmankerroin on 1. Laskuissa on käytetty sahanpurun tehollisena lämpöarvona saapumistilassa 8 MJ/kg ja kosteuspitoisuutena 52,5 %, jolloin kosteaa sahanpurua tarvitaan 0,125 kg/MJ. (Alakangas E. 2000. 35, 35, 152.)

Taulukko 1: Sahanpurun poltossa muodostuvan savukaasun koostumus yhtä MJ:a kohden (Alakangas E. 2000. 35, 35, 152.)

Alkuainekoostumus	p-% kuiva-aine	Osuus [g/MJ]	Moolimassa [g/mol]	nx [mol/MJ]
C	50	29,69	12,0110	2,4717
H ₂	6,3	3,74	2,0160	1,8555
N ₂	0,3	0,18	28,0130	0,0064
O ₂	42,9	25,49	31,9990	0,7965
S	0,02	0,01	32,0660	0,0004
Cl	0,002	0,001	35,4500	0,00003
H ₂ O		65,63	18,0155	3,6427
Tuhka	0,45	0,27		
Yhteensä	100	125		8,7732

		Savukaasut [mol/MJ]				
Alkuainekoostumus	O ₂ tarve [mol/MJ]	CO ₂	SO ₂	N ₂	H ₂ O	Cl
C	2,4717	2,4717				
H ₂	0,9277				1,8555	
N ₂				0,0064		
O ₂	-0,7965					
S	0,0004		0,0004			
Cl						0,00003
H ₂ O					3,6427	
Tuhka						
Yhteensä	2,6033					
Ilman tyyppi (O ₂ tarve*3,77)	9,8143			9,8143		
Kuiva ilma (Ilman tyyppi + O ₂ tarve)	12,4175					
Kosteutta ilmassa (0,0049*Kuiva ilma)	0,0608					
Kosteaa polttoilmaa (Kuiva ilma + Kosteutta ilmassa)	12,4784					
Savukaasun komponentit		2,4717	0,0004	9,8206	5,4982	0,00003
Yhteensä						17,7909

3.1.2 Pelletti

Pelletin yleisin raaka-aine on ollut mekaanisen puunjalostuksen kuivat sivutuotteet, kuten kutterinlastu ja hiontapöly. Ensisijaisesti pelletin raaka aineeksi on käytetty kuivia puuraa-

ka-aineita. Tulevaisuuden tuotantomäärien kasvaessa joudutaan entistä enemmän käyttämään myös kosteita raaka-aineita, mutta ennen pelletöintiä puru on kuivattava 10–15 %:n kosteuteen. (Flyktman M. et al. 2011, 28)

Ennen tuotannon aloittamista raaka-aineesta on poistettava tuotantoa haittaavat epäpuhtaudet kuten kivet, metallit ja muovi. Kosteaa raaka-ainetta kuvataan joko kokonaan tai osittain (10 %:n kosteuteen) ennen materiaalin hienontamista, jonka jälkeen se syötetään vasaramyllyyn jauhattavaksi. Vasaramylly jauhaa raaka-aineen tasalaatuisen kokoiseksi ja sopivaksi puristusta varten. Myös syntynyt pöly otetaan talteen ja käytetään pellettien raaka-aineena. Raaka-ainetta siirretään puristusvaiheeseen esimerkiksi ruuvikuljettimen avulla. (Flyktman M. et al. 2011, 28.)

Pelletöitävän materiaalin tuotanto tapahtuu puristusrullien avulla kahdella eri perusmenetelmällä: joko reikälevyn eli tasomatriisin tai rei'itetyn sylinterin eli rengasmatriisin läpi. Prosessissa puumateriaalin lämpötila nousee ja aiheuttaa luonnollisten hartsien ja sideainesten (ligniinin) hetkellisen pehmenemisen. Sulanut ligniini muodostaa jäähtyttyään pellettien pinnalle kiiltävän koossa pitävän kerroksen, joka toimii niin sanottuna luonnollisena liima-aineena. Puristuttuaan matriisin reikien läpi leikkuuterät katkaisevat puristeen normaalisti noin 10–30 mm:n pituuteen. Mikäli pelletöintilaitte on varustettu leikkuuterillä, pelletit leikkautuvat matriisin alapinnalla painovoiman vaikutuksesta. (Flyktman M. et al. 2011, 28, 29.)

Puristuksen jälkeen kuumat pelletit on jäähdytettävä, jotta ne saavuttavat lopullisen lujuutensa. Jäähdytys tapahtuu puhaltamalla kylmää ilmaa pellettikerroksen lävitse. Lopuksi pelleteistä erotetaan raakapuru ja hienoaines kuljettamalle ne seulan (usein täryseula) läpi. Seulassa erotettu materiaali palautetaan tavallisesti takaisin tuotantoprosessiin. Seulonnan avulla saavutetaan tasalaatuisempaa polttoainetta, joka soveltuu paremmin jakeluun sekä aiheuttaa vähemmän ongelmia polttoaineessa. (Flyktman M. et al. 2011, 29.)

Eräässä kokeessa käytetty pelletöidyn sahanpurun sekoitus oli 80 % tammea ja 20 % mäntyä. Pelletöidyn biomassan ainekoostumus on esiteltynä liitteessä 1 taulukossa 61, jossa sitä on verrattuna eteläafrikkalaiseen hiileen. (Molcan P. 2009, 2328 – 2330) Kun taulukkoa 61 verrataan edellisessä luvussa esiteltyyn taulukkoon 59 sahanpurun alkuainekoostumuksesta, niin huomataan että, koska raaka-aineet ovat samaa materiaalia, aineominais-

suudetkin ovat samat. Pelletti on vain kuivattu ja kokoon puristettu versio sahanpurusta. Etuina pelletissä verrattuna sahanpuruun on tiheyden ansiosta halvempi kuljetus, suurempi energiatiheys ja parempi säilyvyys.

Pellettejä voidaan kuljettaa alhaisen kosteuspitoisuutensa ja korkean lämpöarvonsa vuoksi voimalaitokselle ympäri maailmaa. Suomen kannalta tämä ei välttämättä ole tarpeellista, koska Suomessa on jo nyt pellettien yltärinta. (Esmerk/Pohjolan Sanomat, 2012, 3.) Tämän lisäksi pohjoismaissa, Baltiassa ja Venäjällä on runsaasti pelletintuotantolaitoksia, joista voidaan helposti tuoda polttoainetta laivoilla.

Pellettiä täytyy varastoida kuivissa olosuhteissa, joka tarkoittaa joko varastorakennusta tai siiloa. Suurien määrien varastointi voimalaitosalueella on yleensä hyvin hankalaa tilanpuutteen johdosta. Tämän vuoksi pelleteille tulisi rakentaa välivarasto. Tällainen välivarasto voisi sijaita esimerkiksi satamien yhteydessä, jolloin laivoilla voitaisiin tuoda suuria polttoainemääriä suoraan välivarastoon. Satamien yhteydessä on tyypillisesti myös raide-liikennettä, jolloin junilla voitaisiin tuoda polttoainetta Venäjältä sekä Itä- ja Pohjois-Suomesta. Toinen välivarastointimahdollisuus on niin kutsuttu konttivarastointi, jossa polttoainetta tuodaan merikonteissa välivarastoon, josta ne kuljetetaan kuorma-autolla voimalaitokselle. Tyhjät kontit palautetaan pellettien tuotantolaitokselle. Tällöin erillistä varastorakennusta ei tarvita. Vaikka voimalaitos hyödyntäisikin välivarastointia, niin voimalaitosalueelle täytyy myös rakentaa polttoainevarasto tai siilo, johon polttoainetta voidaan varastoida, jotta se riittäisi suurten juhlapyhien yli, jolloin ympäristöluvut eivät salli polttoaineen kuljetusta.

Tällä hetkellä maailmanmarkkinoilla on ylikapasiteettia pelleteistä. Pellettien käyttö ei ole lisääntynyt niin nopeasti kuin oletettiin ja Pohjois-Amerikasta virtaava halpa energiapuu heikentää Eurooppalaisten pellettitehtaiden kilpailukykyä. Suomessa on jouduttu sulkemaan useampi pellettitehdas vuoden 2011 aikana yltärinton johdosta. Suomessa on enää jäljellä parikymmentä pellettilaitosta. (Esmerk/Pohjolan Sanomat, 2012, 3.) Pellettien tulevaisuudennäkymät ovat kuitenkin epävarmat. Pellettien käytön uskotaan kasvavan rajusti erityisesti EU-27 maissa ja Pohjois-Amerikassa. Pellettien kysynnän uskotaan kaksinkertaistuvan noin 30 milj. tonniin vuoteen 2020 mennessä. Jos EU-27 alueella korvattaisiin 5 % käytetystä kivihiilestä pelletillä, vastaisi tämä noin 32 milj. tonnien pellettien kulutusta. Pellettien porttihinna on noin 30 €/MWh. (Vision Hunters, 2011, 31, 36.)

Alla olevasta taulukosta 2 nähdään pelletin tuottamat savukaasupäästöt. Taulukossa on laskettu, kuinka paljonko savukaasu sisältää CO₂:a, SO₂:a, N₂:ä, H₂O:ä ja Cl:a tuottaessa 1 MJ lämpöenergiaa. Laskuissa on oletettu, että kaikki polttoaineen typpi muodostaa typ-pikaasua, palaminen on täydellistä, tilanne ennen rikinpoistoa ja ilmankerroin on 1. Las-kuissa on käytetty pelletin tehollisena lämpöarvona 17 MJ/kg ja kosteuspitoisuutena 9 %, jolloin kosteaa pellettiä tarvitaan 0,0588 kg/MJ. (Alakangas E. 2000. 152.)

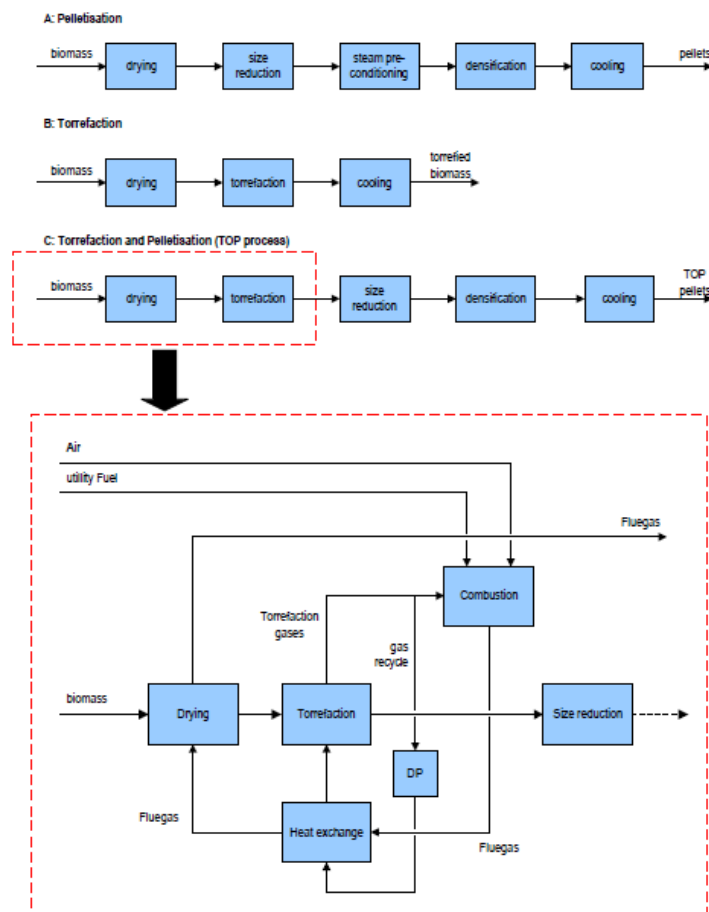
Taulukko 2: Pelletin poltossa muodostuvan savukaasun koostumus yhtä MJ:a kohden (Alakangas E. 2000. 152.)

Alkuaineikoostumus	p-% kuiva-aine	Osuus [g/MJ]	Moolimassa [g/mol]	nx [mol/MJ]
C	50	26,76	12,01	2,2283
H ₂	6,3	3,37	2,02	1,6728
N ₂	0,3	0,16	28,01	0,0057
O ₂	42,8	22,90	32,00	0,7155
S	0,02	0,01	32,07	0,0003
Cl	0,0076	0,004	35,45	0,0001
H ₂ O		5,29	18,02	0,2939
Tuhka	0,6	0,32		
Yhteensä	100	58,82		4,9167

		Savukaasut [mol/MJ]				
Alkuaineikoostumus	O ₂ tarve [mol/MJ]	CO ₂	SO ₂	N ₂	H ₂ O	Cl
C	2,2283	2,2283				
H ₂	0,8364				1,6728	
N ₂				0,0057		
O ₂	-0,7155					
S	0,0003		0,0003			
Cl						0,0001
H ₂ O					0,2939	
Tuhka						
Yhteensä	2,3496					
Ilman tyyppi (O ₂ tarve*3,77)	8,8579			8,8579		
Kuiva ilma (Ilman tyyppi + O ₂ tarve)	11,2074					
Kosteutta ilmassa (0,0049*Kuiva ilma)	0,0549					
Kosteaa polttoilmaa (Kuiva ilma + Kos-teutta ilmassa)	11,2623					
Savukaasun kom-ponentit		2,2283	0,0003	8,8636	1,9667	0,0001
Yhteensä						13,0590

3.1.3 Torrefioitu biohiili

Torrefiointitekniikka on uusi puubiomassan käsittelymenetelmä. Torrefioinniksi kutsutaan, biomassan käsittelyä 200–300 °C:n lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa, jolloin siitä haihtuvat vesi sekä osa haihtuvista aineista. Torrefiointin aikana biomassa kuivuu lähes täydellisesti, jonka jälkeen kosteuden imeytyminen tuotteeseen on hyvin vähäistä. Torrefioitu biomassa voidaan pelletöidä, jolloin kuljettaminen ja käsittely helpottuvat. Tätä tuotetta kutsutaan TOP-pelletiksi (torrefied pellet), joka on lähes hydrofobinen eikä vety ulkova-rastoinnissa. Pellettien, torrefiointin ja TOP-pellettien tuotantokaaviot nähdään kuvassa 8. (Bergman P. 2005, 12; Flyktman M. et al. 2011, 29.) Kirjallisuudessa torrefiointinille on useita synonyymejä. Esimerkiksi paahtaminen, hidas- ja lievä pyrolyysi sekä korkealämpötilainen kuivaus. (Bergman P. et al. 2005, 13.) TOP-pelletistä käytetään myös nimitystä musta pelletti (black pellet).



Kuva 8: Pellettien (A), torrefiointin (B) ja TOP-pellettien (C) tuotantokaaviot (Bergman P. 2005, 14.)

Torrefioitua polttoainetta voidaan valmistaa useasta erilaisesta biomassasta ja silti tuotteelle saavutetaan samat ominaisuudet, koska puu- ja kasviperäiset biomassat koostuvat samanlaisista rakennusaineista: selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Samat käsittelyolosuhteet eivät kuitenkaan tuota aina samanlaista lopputuotetta kaikille materiaaleille. Puun torrefiointin lopputuote sisältää noin 70–80 % alkuperäisestä massasta ja noin 80–90 % alkuperäisestä energiasisällöstä, jolloin lopputuotteen lämpöarvo kohoaa 10–22 %. Lämpöarvon kohoaminen on puuperäisillä biomassoilla olkibiomassoja suurempaa. (Bergman P. 2005, 12; Flyktman M. et al. 2011, 29) Kuitenkin samankaltaiseen torrefiointin lopputuotteen laatuun päästään, kun jokaiselle biomassalle käytetään omia operointi-olosuhteita. (Bergman P. Kiel J. 2005, 5.) Puun, torrefioidun biomassan ja kivihiilen ominaisuuksia voidaan verrata taulukossa 3.

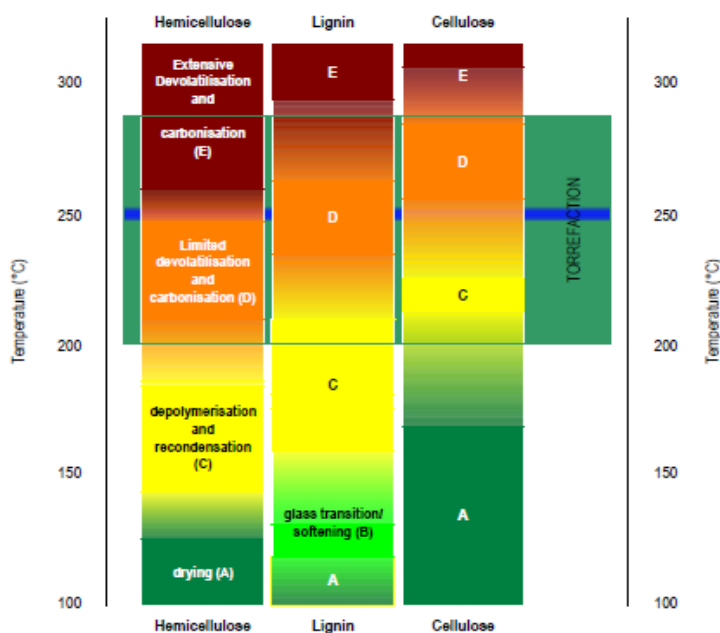
Taulukko 3: Puupolttoaineiden ja kivihiilen ominaisuuksia (Alakangas E. 2000,130; Flyktman M. et al. 2011, 30)

	Kokopuuhake, mänty	Torrefioitu biomassa	Puupelletti	TOP- pelletit	Kivihiili
Kosteus, %	45	3,0	7,0	1,0	10
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (kosteaa)	7,5	19,9	16,2	21,6	24,8
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg (kuiva)	19,3	20,4	17,7	22,7	27,9
Tiheys, kg/irto-m ³	330	230	650	750 – 850	
Energia tiheys, GJ/i-m ³	3,1	4,6	10,5	14 – 18,5	

Biomassaa torrefiointiprosessi on kuvan 8 kaavion B mukainen. Prosessissa biomassaa kuivataan ensin kuivurissa, jonka jälkeen polttoaineen kuivuminen ja paahtuminen jatkuvat hiilletysreaktoreissa lähes hapettomissa olosuhteissa. Biomassaa lämmitettäessä tapahtuvat seuraavat reaktiot eri lämpötilatasoilla: 100–200 °C, vesi höyrystyy ja poistuu biomassasta, 200–280 °C, biomassan sisältämä hemiselluloosa kasaantuu ja kemiallisissa sidoksissa ollut vesi sekä osa helpoiten haihtuvista aineista vapautuvat, yli 280 °C, reaktioista tulee eksotermisiä ja kaikki haihtuvat aineet poistuvat materiaalista, jolloin biomassaa hiiltäytyy. Hemiselluloosassa, ligniinissä ja selluloosassa tapahtuvat reaktiot ovat kuvassa 9. Biomass-

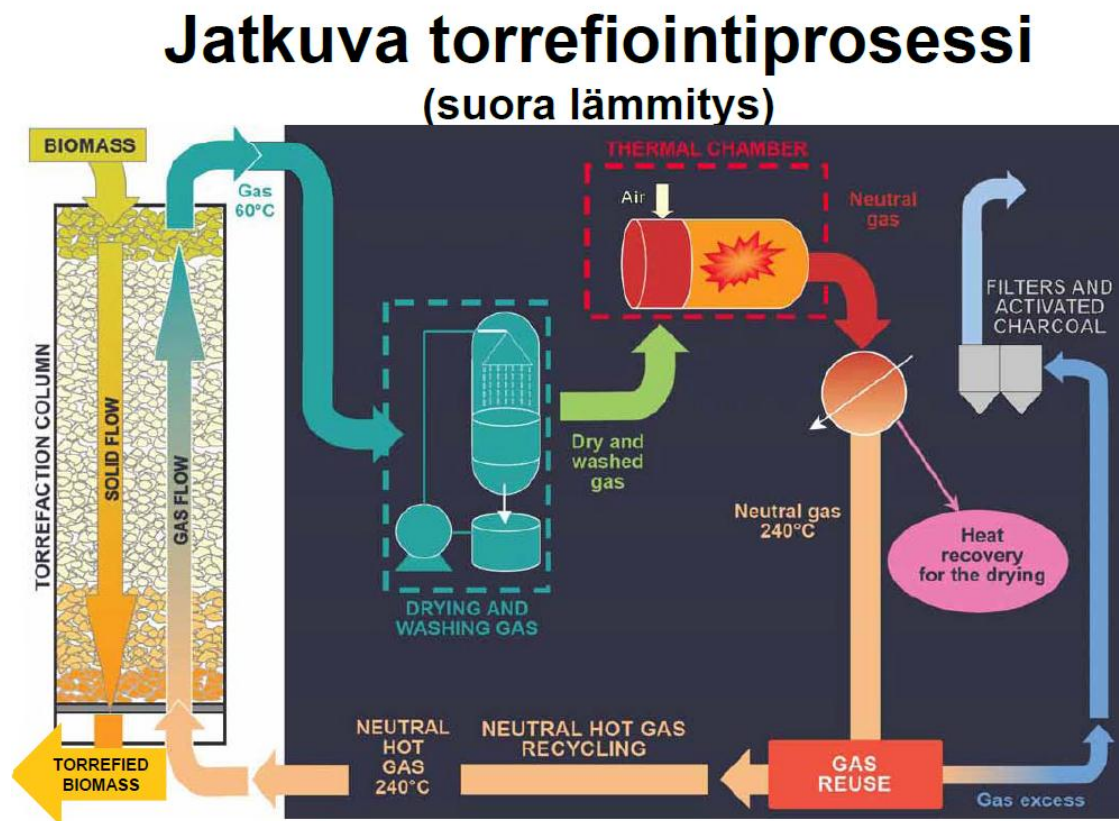
sa muuttuu jauhamiskelpoiseksi hiilletysreaktorissa tapahtuvassa kuumakäsittelyssä, jolloin sen käyttöominaisuudet paranevat. (Hämäläinen E. Heinimö J. 2006, 10.)

Biomassan esikuivatuksen jälkeen biomassan kosteuspitoisuus tulee olla 15 % tai alle, jolloin biomassan torrefiointi on energiatehokasta ja torrefiointikaasu energiapitoista. Suurempi kosteuspitoisuus pidentää torrefiointi aikaa ja palamattomien aineiden määrä kasvaa torrefiointi kaasussa, joka täytyy lämmittää 300:sta °C:sta vähintään 900 °C:een, jotta saavutetaan adiabaattinen palamisprosessi. Tämä alin palamislämpötila tarvitaan myös, jotta varmistetaan, että kaikki orgaaniset aineet palavat. (Kleinschmidt C. 2011, 4.) Torrefiointi on melko hidas prosessi. Bergman P. et al.:n (2005, 31, 45.) tutkimuksien mukaan energiatehokkain torrefiointi tapahtuu 260–300 °C lämpötilassa 7,5–30 min ajassa, torrefioidusta biomateriaalista riippuen. Tällöin biomassalle saavutettiin samanlainen jauhattavuus kuin bitumiselle hiilelle ja hyvä syttyvyys verrattuna tavalliseen biomassaan. Pidemmällä ajanjaksolla päästään hyvään torrefiointi lopputuotteeseen, mutta energiatehokkuus kärsii. Alemmilla lämpötiloilla torrefioidun lopputuotteen jauhattavuutta ei saada tarpeeksi hyväksi. Tutkimuksessa käytettiin biomateriaalina puuhaketta, pajua ja purkupuuta. Torrefiointiprosessiin ei vaikuta niinkään partikkelin koko kuin viipymätön pyrolyysi. Yleisimmät käytettävät puulastut ovat 2 cm paksuisia, jolloin niitä voidaan torrefioida ilman lämmönsiirrollisia rajoitteita. (Bergman P. Kiel J. 2005, 5.)



Kuva 9: Fysikaalis-kemialliset tapahtumat pääpiirteittäin hemiselluloosassa, ligniinissä ja selluloosassa lämpötilan kasvaessa (Bergman P. et al. 2005, 14.)

Torrefiointi menetelmiä on kahta perustyyppiä, panostyyppinen ja jatkuvatoiminen. Menetelmän valintaan vaikuttaa torrefiointimäärät, tilaratkaisut sekä investoinnin osuus. Panostyyppinen torrefiointilaitteiston rakenne on sahatavarakuivaamon tapainen halli, jonne ladataan panostyyppisesti puuainesta ja kuivatetaan lasti kerrallaan. Tämän menetelmän kuivauskapasiteetti jää pieneksi verrattuna jatkuvatoimiseen prosessiin, jolloin panostyyppinen torrefiointimenetelmä ei sovellu energiatuotannossa käytettävän polttoaineen valmistamiseksi. Jatkuvatoiminen torrefiointimenetelmä on kuvan 10 mukainen menetelmä, jossa jatkuvalla syötöllä syötetään biomassaa prosessiin ja lopputuotteena saadaan torrefioitua biomassaa. (Hämäläinen E. Heinimö J. 2006, 12.)



Kuva 10: Jatkuva torrefiointiprosessi (Agar D., Wihersaari M. 2010)

Torrefiointiprosessi on energiaomavarainen torrefiointin osalta, sillä prosessista vapautuvien kaasujen poltosta saatava energia riittää toteuttamaan torrefiointin, mutta kostea raaka-aine tarvitsee lisäenergiaa. Energiataseen kannalta on tärkeää, että TOP-pellettien tuotanto integroidaan kuivauksen osalta esimerkiksi sähkö- ja lämmöntuotantoon. Tällöin kuten kuvasta 10 huomataan, kuivausenergia voidaan ottaa energiatuotannon sivukaasuista

ja torrefioinnissa biomassasta haihtuvat kaasut voidaan syöttää sähkön- ja lämmön tuotantoprosessiin. (Flyktman M. et al. 2011, 30) Liitteessä 2 (Kiel J. 2011.) on esitelty useampia jatkuvatoimisia torrefiointi tekniikoita. Tekniikat muuttuvat hieman, mutta perusidea on kaikissa sama. Yhtenä esitellyistä tekniikoista on Rotaweven (2010) kehittämä menetelmä, jossa metsätähteistä haihdutetaan vesi mikroaaltojen avulla. Tällöin metsätähte saadaan kuivattua alle 4 % kosteuspitoisuuteen ja energiasisältö kasvaa 30 %.

Torrefioitukaasu sisältää orgaanisia happoja ja primäärejä tervoja, jotka pitää hajottaa jälkipolttimella. Vaikka tervat, jotka muodostuvat torrefioinnin aikana hajoavat jälkipolttimessa, voivat ne johtaa vakaviin ongelmiin kondensoituessaan tuotteeseen tai sisäisiin laitteistoihin. Tervojen muodostuminen kasvaa eksponentiaalisesti lämpötilan funktiona. (Kleinschmidt C. 2011, 7.)

Torrefioidun tuotteen käsittelyssä, murskauksessa ja pelletöinnissä voi ilmetä ongelmia. Torrefioitu biomassa on erittäin reaktiivista pulveroituna, joka voi aiheuttaa räjähdysvaaran. Murskauksen jälkeen torrefioitu biomassa tulisi pitää inerttinä, jotta vältettäisiin spontaaninen palaminen. Pelletöiminen on myös haasteellista, koska torrefioidussa biomassassa ligniinin konsentraatio vähenee, joka on biomassan luonnollinen sitova tekijä. Tästä syystä pelletöinnissä täytyy käyttää biologisia lisäaineita. (Kleinschmidt C. 2011, 8.)

Yllä olevasta taulukosta 3 nähdään että torrefioitu puu on tuoreen puun ja hiilen välimuoto. Käsittelyn ansiosta torrefioidusta biomassasta tulee hauraampaa ja helposti jauhautuvaa, jolloin sitä voidaan jauhaa hiilimyllyssä hiilen seassa tai pelletöidä varastointia ja kuljetusta varten. Vähäisen kosteuspitoisuuden vuoksi TOP-pelletti hylkii vettä, jonka ansiosta sitä voidaan säilyttää ulkona kivihiilen tapaan. TOP-pelletti käyttäytyy hiilen tapaan myös poltettaessa eikä houkuttele enää puulle ominaisia tuhohyönteisiä. Suuremman energiatiheydensä ansiosta kuljetuskustannukset TOP-pelletissä ovat tavallista pellettiä pienemmät. (Hämäläinen E. Heinimö J. 2006, 15.)

Torrefioidun pelletin ja biohiilen tuotanto on hyvin vähäistä. Useat polttolaitokset havittelevat suuria määriä torrefioitua biohiiltä koepolttoon, mutta suurien määrien saaminen on tällä hetkellä hyvin hankalaa. Suuria TOP –pelletti tuotantolaitoshankkeita on suunnitteilla ympäri Eurooppaa, josta yksi on Ristiinassa. Ristiinaan kaavaillun tehtaan tuotantotavoite on noin 200 000 tonnia vuodessa. (Miktech Oy, 2012.) Yksi mahdollisuus on investoida

omaan TOP –pelletin tuotantolaitokseen tai tuotanto yhteistyöhön, mutta tällainen tuotantolaitos vaatii suuria investointeja ja tuotantolaitoksen tulisi olla kaupunkialueen ulkopuolella. (Vision Hunters, 2011, 212.) TOP -pellettiä voidaan kuljettaa laivoilla ympäri maailmaa suuren energiatihetyensä ansiosta ja sitä voidaan varastoida hiilikentällä hiilen lailla. Tämä helpottaa varastointikustannuksia ja logistiikkaa. TOP –pelletin porttihinna on arvioitu olevan noin 35 €/MWh.

Alla olevasta taulukosta 4 nähdään torrefioitun biohiilen tuottamat savukaasupäästöt. Taulukossa on laskettu, kuinka paljonko savukaasu sisältää CO₂:a, SO₂:a, N₂:ä, H₂O:ä ja Cl:a tuotettaessa 1 MJ lämpöenergiaa. Laskuissa on oletettu, että kaikki polttoaineen typpi muodostaa typpikaasua, palaminen on täydellistä, tilanne ennen rikinpoistoa ja ilmankerroin on 1. Laskuissa on käytetty torrefioitun biohiilen tehollisena lämpöarvona 21,6 MJ/kg ja kosteuspitoisuutena 1 %, jolloin kosteaa torrefioitua biohiiltä tarvitaan 0,463 kg/MJ. (Alakangas E. 2000, 130; Chew J.J., Doshi V. 2011, 4216; Flyktman M. et al. 2011, 30; Sarvelainen H. 2011, 36.)

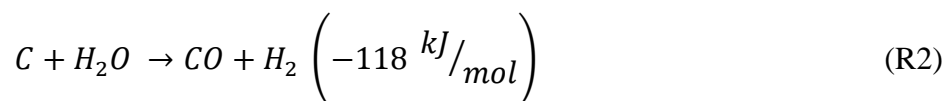
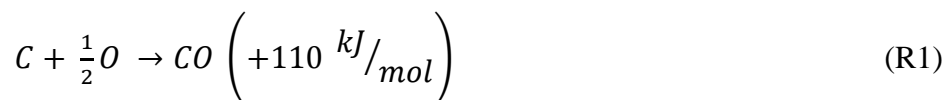
Taulukko 4: Torrefioitun biohiilen poltossa muodostuvan savukaasun koostumus yhtä MJ:a kohden (Alakangas E. 2000, 130; Chew J.J., Doshi V. 2011, 4216; Flyktman M. et al. 2011, 30; Sarvelainen H. 2011, 36.)

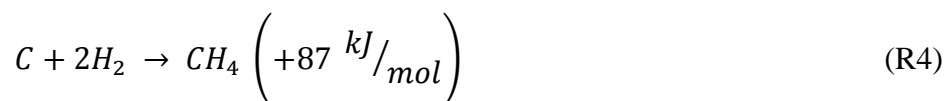
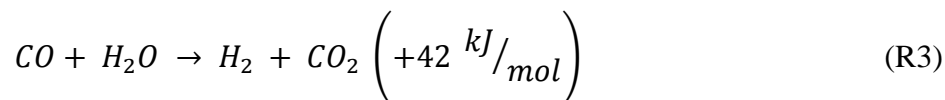
Alkuainekoostumus	p-% kuiva-aine	Osuus [g/MJ]	Moolimassa [g/mol]	nx [mol/MJ]
C	56	25,67	12,011	2,137
H ₂	5,5	2,52	2,016	1,250
N ₂	0,06	0,03	28,013	0,001
O ₂	37,82	17,33	31,999	0,542
S	0,02	0,01	32,066	0,0003
Cl	0,002	0,001	35,45	0,000
H ₂ O		0,46	18,016	0,026
Tuhka	0,6	0,28		
Yhteensä	100	46,30		3,956

		Savukaasut [mol/MJ]				
Alkuainekoostumus	O ₂ tarve [mol/MJ]	CO ₂	SO ₂	N ₂	H ₂ O	Cl
C	2,1369	2,1369				
H ₂	0,6252				1,2504	
N ₂				0,0010		
O ₂	-0,5417					
S	0,0003		0,0003			
Cl						0,00003
H ₂ O					0,0257	
Tuhka						
Yhteensä	2,2207					
Ilman tyyppi (O ₂ tarve*3,77)	8,3722			8,3722		
Kuiva ilma (Ilman tyyppi + O ₂ tarve)	10,5929					
Kosteutta ilmassa (0,0049*Kuiva ilma)	0,0519					
Kostea polttoilmaa (Kuiva ilma + Kosteutta ilmassa)	10,6448					
Savukaasun komponentit		2,1369	0,0003	8,3732	1,2761	0,00003
Yhteensä						11,7865

3.1.4 Kaasutus

Kaasutuksen tarkoituksena on muuttaa kiinteiden polttoaineiden haihtuvat ja haihtumattomat aineet kaasumaiseen muotoon. Haihtuvat aineet kaasuntuvat (pyrolysoituvat) pelkän lämpötilan vaikutuksesta hapettomassa tilassa. Haihtumattomien aineiden (jäännöshiilen) kaasutus edellyttää kaasutuskasujen käyttöä ja hiilen reaktiota niiden kanssa. Eli käytännössä hiiltä poltetaan ali-ilmalla, jolloin polttoaine ei saa riittävästi ilmaa täydelliseen palamiseen. Ali-ilmalla poltettaessa korkeassa lämpötiloissa tapahtuu seuraavat reaktiot (R1)–(R4):





Reaktiotuotteet riippuvat kaasutusaineesta, mutta pääasiassa syntyvät polttokaasut ovat hiilimonoksidia ja vetyä. Taulukosta 5 nähdään tyypillisiä kaasutuksessa syntyvien kaasujen koostumuksia. (Huhtinen M. et al. 2004, 179.)

Taulukko 5: Kaasutuksessa syntyvien kaasujen koostumuksia (til -%) (Huhtinen M. et al. 2004, 180.)

Polttoaine ja kaasutustapa	CH ₄	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Lämpöarvo MJ/Nm ³
Hiili (ilmakaasutus)	3 – 5	17 – 22	10 – 17	10 – 12	23 – 35	11 – 35	4,2 – 5,5
Hiili (happikaasutus)	0 – 7	25 – 44	40 – 60	2 – 18	2 – 7	-	9,5 – 11,7
Öljy (happikaasutus)	-	43 – 46	48 – 50	5 – 6	1 – 3	-	10,9
Puu (ilmakaasutus)	1 – 6	8 – 20	10 – 20	9 – 15	42 – 56	0 – 27	3,3 – 5,1

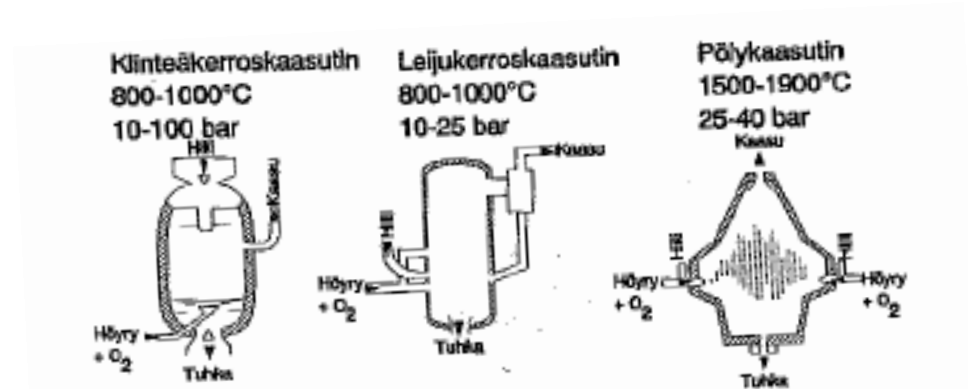
Kaasutuksessa polttoaine voidaan kaasuttaa joko kokonaan (kokonaiskaasutus) tai osittain, jolloin jäännöshiili otetaan erikseen ja poltetaan sitten erillisessä hiilikattilassa. Hiili on vaikeasti kokonaan kaasutettava polttoaine, jolloin osittaiskaasutus olisi yksinkertaisempi ja halvempi vaihtoehto. Osittaiskaasutuslaitokset ovat huomattavasti halvempia, mutta ne tarvitsevat reaktorin ohella polttokattilan. Suuria määriä haihtuvia aineita omaaville puu- ja biopolttoaineille kokonaiskaasutus on taas huomattavasti helpompi toteuttaa. (Huhtinen M. et al. 2004, 180.)

Kaasuttimessa tarvittava lämmöntuotanto tapahtuu polttamalla polttoainetta ali-ilmalla. Normaalisessa käytössä, polttoaineen syöttönopeudella määritellään tuotekaasun ominaisuuksia ja ilman/hapen määrällä säädellään kaasutuslaitoksen lämpötilaa. Joissain ratkaisuissa lämpö tuodaan reaktoriin epäsuorasti esimerkiksi kierrättämällä kattilan kuumaa leijukerroshiekkaa tai kuumia savukaasuja kaasutinreaktorin kautta. Ilmakaasutuksessa saadaan matalalämpöarvoista tuotekaasua, jonka lämpöarvo on 3-6 MJ/Nm³, koska ilman

mukana tulee suuria määriä palamatonta typpeä. Paineistetussa kaasutuksessa kombivoi-
malaitoskytkennässä ilmakaasutuksen vaatima ilma otetaan kaasutinreaktoriin kaasuturbiin-
in kompressorin jälkeen. Ilmanpainetta on nostettava kompressorin jälkeisestä paineesta
vielä useita baareja, jotta voitetaan putkistoissa ja kaasuttimessa syntyvät painehäviöt.
Kompressorin on tämäntyyppisissä laitoksissa suurin yksittäinen omakäyttösähkön kulutta-
ja. (Huhtinen M. et al. 2004, 180; Nieminen J. Kivelä M. 1998, 252.)

Puhtaalla hapella kaasuttaessa tuotekaasun lämpöarvo lähes kaksinkertaistuu ($10\text{--}12$
 MJ/Nm^3). Kallis ja energiaa kuluttava hapenerotuslaitteisto on happikaasutuksen suurin
haittapuoli. Hapen erotuksessa ilma jäähdytetään $-160\text{ }^\circ\text{C}$:een ja tislataan siitä happi ja typ-
pi erilleen. Erotettu typpi voidaan johtaa kaasuturbiinin polttokammioon, jossa se laskee
palamislämpötilaa ja vähentää typenoksidien muodostusta. (Huhtinen M. et al. 2004, 180.)

Kaasutusreaktorit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: kiinteisiin kerroskaasuttimiin, pölykaa-
suttimiin ja leijukerroskaasuttimiin. Jos kaasutinreaktoria jäähdytetään, toteutetaan se rea-
torin paineastian sisäpuolella olevalla putkistolla, johon syötetään höyrystettävää vettä.
Höyrystetty vesi voidaan joko syöttää höyryturbiiniin tai käyttää kaasuttimessa. Tällöin
kaasutin toimii tavanomaisen höyrykattilan tavoin. Alla olevasta kuvasta 11 voidaan nähdä
kyseiset kolme kaasutusreaktorimallia. (Huhtinen M. et al. 2004, 181.)



Kuva 11: Kaasutusreaktorityypit ja niiden tyypilliset toiminta-arvot paineistetussa kaasutuksessa (Huhtinen M. et al. 2004, 181.)

Yllä olevan kuvan 11 mukaisesti vastavirtaperiaatteella toimivassa kiinteäkerroskaasutti-
messä polttoaine syötetään kaasuttimen reaktorin yläosaan. Syötetty polttoaine on partikke-
likooltaan $3\text{--}50\text{ mm}$. Ilman ja hapen tai vesihöyryn seos johdetaan kaasuttimen alaosasta

reaktoriin. Polttoaine valuu hitaasti alas kuivumis-, pyrolyysi-, pelkistys-, ja palamisvyöhykkeiden läpi. Kiinteäkerroskaasuttimia on myös myötävirtaperiaatteen sekä yhdistetyn myötä- ja vastavirtaperiaatteen mukaan toimivia. Reaktorin alhaisen lämpötilan (800–1000 °C) vuoksi tuotekaasussa esiintyy tervoja ja ammoniakkaa. Kaasun metaanipitoisuuden nostamiseksi paineistetuissa kaasuttimissa on käytetty jopa 100 baarin painetta. (Huhtinen M. et al. 2004, 181.)

Hiilipölyä kaasutetaan pölykaasuttimessa, jossa hiilen hiukkaskoko on noin 0,1 mm. Hiilipöly syötetään reaktoriin kuvan 11 mukaisesti sivuseinän alaosaan yhdessä kaasutuskaasuna käytetyn hapen ja vesihöyryn kanssa. Reaktorin lämpötila pidetään yleensä korkeana (1500 °C). Vaikka hiukkanen on lyhyen aikaa reaktorissa, saadaan korkean lämpötilan ja pienen hiukkaskoon ansiosta tuotekaasuun suuri CO- ja H₂-pitoisuus tervapitoisuuden jäädessä mitättömäksi. Korkean lämpötilan johdosta tuhka poistetaan reaktorin alaosaan sulana. Yleensä paineistetuissa pölykaasuttimissa paine on noin 25 baaria. (Huhtinen M. et al. 2004, 181.)

Leijukerroskaasuttimissa polttoaine kaasutetaan inertin leijuivan materiaalin sisällä (esimerkiksi hiekka), kuten leijukerroskattiloissakin. Leijuva materiaali toimii lämmönsiirtimenä ja pitää lämpötilan tasaisena prosessin aikana. Materiaalin iskeytyminen polttoaineeseen edesauttaa haihtuvien aineiden irtoamista hiukkasista. Kaasutuskaasuna käytetään leijutuskaasua. Kaasutuslämpötilan on oltava tuhkan sulamispistettä alhaisempi eli noin 800–1000 °C. Kaasuttimessa vallitsevan tasaisen lämpötilajakauman ja hyvän sekoittumisen ansiosta leijukerrostekniikka soveltuu erityisesti epähomogeenisten ja huonolaatuisten polttoaineiden kaasutukseen. (Huhtinen M. et al. 2004, 181; Nieminen J. Kivelä M. 1998, 252.)

Kaasutuksessa voidaan käyttää useita erilaisia polttoaineita. Todennäköisin polttoaine olisi kuitenkin metsähake. Hakkeen käyttäminen perustuu sen halpaan hintaan (noin 20 €/MWh). Hakkeeksi päätyvät hakkuutähteet, pienpuu, kannot ja metsäteollisuuden käyttöön kelpaamattomat tukit. (Alakangas E. 2000, 48.) Metsähakkeen heikkoutena on sen alhainen tehollinen lämpöarvo ja suuri kosteuspitoisuus, jonka vuoksi sitä on kannattavaa hankkia vain alle 200 km päästä käyttökohteesta. Tämä rajoittaa hankintamahdollisuuksia ja kasvattaa kilpailua suurten rannikkokaupunkien lähistöillä. (Vision Hunters, 2011, 14.)

Hakkeen logistiikka riippuu haketettavasta materiaalista. Hakkuutähteet ja pienpuu haketetaan yleisimmin tienvarressa ja kuljetetaan hakkeena suoraan käyttöpaikalle. Kannot ja järeä runkopuu kuljetetaan yleensä suoraan käyttöpaikalle ja haketetaan siellä. (Vision Hunters, 2011, 10.) Toinen vaihtoehto on kuljetus haketettavaksi välivarastoon, josta hake siirretään käyttöpaikalle, mutta ylimääräinen varastointi, lastaus ja purkaus lisäävät polttoaineen hankintakustannuksia merkittävästi. Metsähakkeen logistiikka tarkoittaa jatkuvaa polttoaineen tuontia voimalaitosalueelle.

Hakkeen varastointi on ongelmallista, koska se on orgaanista ainetta ja se voi alkaa käydä. Tästä johtuen haketta voidaan varastoida aumoissa, mutta tuuletus tulee varmistaa, jotta auma ei syty palamaan. Pitkäaikainen varastointi aumoissa vähentää hakkeen orgaanisia ainesosia, joka ei ole toivottua. Tästä syystä haketta ei yleensä varastoida ilman suojaa, jonka vuoksi sille on rakennettava varastointia varten voimalaitosalueelle siilo tai jokin muu suojarakennus. Hakkeen suuren tilantarpeen vuoksi siilon koko tulee optimoida siten, että siilon koko on tarpeeksi suuri varastoimaan riittävästi polttoainetta pitkienkin juhlapyhien yli, mutta tarpeeksi pieni, jotta siilo ei peitä koko voimalaitosaluetta.

Metsähakkeen käyttö oli vuonna 2010 noin 12,4 TWh ja sen on oletettu kaksinkertaistuvan vuoteen 2020 mennessä. Lisääntyvä metsähakkeen kysyntä saattaa tuottaa ongelmia tulevaisuudessa. Metsähakkeen saatavuus riippuu myös voimakkaasti markkinahakkuiden määrästä. (Vision Hunters, 2011, 11.)

Alla olevasta taulukosta 6 nähdään hakkeen tuottamat savukaasupäästöt. Taulukossa on laskettu, kuinka paljonko savukaasu sisältää CO₂:a, SO₂:a, N₂:ä, H₂O:ä ja Cl:a tuottaessa 1 MJ lämpöenergiaa. Laskuissa on oletettu, että kaikki polttoaineen tyyppi muodostaa typipikaasua, palaminen on täydellistä, tilanne ennen rikinpoistoa ja ilmankerroin on 1. Laskuissa on käytetty hakkeen tehollisena lämpöarvona 12,5 MJ/kg ja kosteuspitoisuutena 30 %, jolloin kosteaa haketta tarvitaan 0,08 kg/MJ. (Alakangas E. 2000, 35, 36, 53, 150, 152.) Hake on kuivattu 30 % kosteuspitoisuuteen 55 % saapumistilastaan.

Taulukko 6: Hakkeen kaasutuksessa ja poltossa muodostuvan savukaasun koostumus yhtä MJ:a kohden (Alakangas E. 2000, 35, 36, 53, 150, 152.)

Alkuainekoostumus	p-% kuiva-aine	Osuus [g/MJ]	Moolimassa [g/mol]	nx [mol/MJ]
C	50	28	12,01	2,3312
H ₂	6,1	3,42	2,02	1,6944
N ₂	0,4	0,22	28,01	0,0080
O ₂	41,47	23,22	32,00	0,7258
S	0,02	0,01	32,07	0,0003
Cl	0,0076	0,004	35,45	0,0001
H ₂ O		24	18,02	1,3322
Tuhka	2	1,12		
Yhteensä	100	80		6,0921

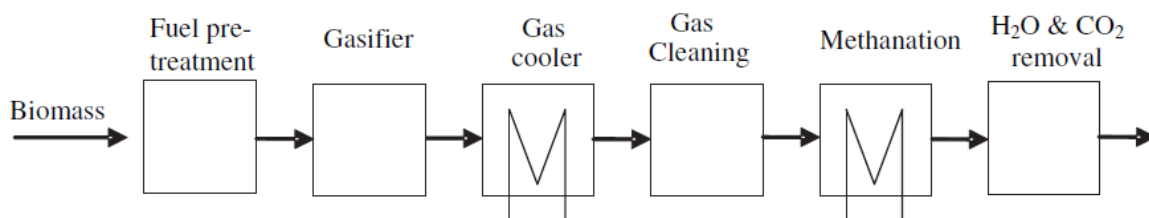
		Savukaasut [mol/MJ]				
Alkuainekoostumus	O ₂ tarve [mol/MJ]	CO ₂	SO ₂	N ₂	H ₂ O	Cl
C	2,3312	2,3312				
H ₂	0,8472				1,6944	
N ₂				0,0080		
O ₂	-0,7258					
S	0,0003		0,0003			
Cl						0,0001
H ₂ O					1,3322	
Tuhka						
Yhteensä	2,4530					
Ilman tyyppi (O ₂ tarve*3,77)	9,2477			9,2477		
Kuiva ilma (Ilman tyyppi + O ₂ tarve)	11,7007					
Kosteutta ilmassa (0,0049*Kuiva ilma)	0,0573					
Kosteaa polttoilmaa (Kuiva ilma + Kosteutta ilmassa)	11,7580					
Savukaasun komponentit		2,3312	0,0003	9,2557	3,0266	0,0001
Yhteensä						14,6140

3.1.5 Bio-SNG

Bio-SNG, eli biomassasta tuotettu synteettinen maakaasu (Synthetic Natural Gas), on kaasutettua biomassaa, joka vastaa palamisarvoiltaan ja sisällöltään maakaasua. SNG -

tekniikkaa on tutkittu jo 70-luvulla, mutta lähes kaikki hankkeet ovat kaatuneet alhaisen maakaasuhinnan johdosta. The Dakota Gasification Companyn SNG laitos on kuitenkin selvinnyt tähän päivään asti. Laitos käyttää polttoaineena ruskohiiltä, mutta tekniikka on lähes sama biopolttoaineille. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 303.) Bio-SNG:lle on useita synonyymejä: SBG, eli synteettinen biokaasu, bio-SNG, eli biomassasta tuotettu synteettinen maakaasu/luonnonkaasu ja korvaava maakaasu (Substitute Natural Gas) tarkoittavat kaikki samaa.

Bio-SNG:n tuotto tapahtuu samalla tavalla kuin edellisessä kappaleessa 3.1.4 kuvattu polttoaineen kaasutus. Tämä tekniikka eroaa kuitenkin kaasun puhdistuksen osalta tavallisista kaasutuslaitoksista. Puhdistuksen jälkeen biokaasu on niin puhdasta, että se voidaan paineistaa ja syöttää maakaasuputkea pitkin voimalaitoksille. Bio-SNG:n yksinkertaistettu tuotantokaavio on kuvassa 12. Kuvasta nähdään, että biomassa esikäsitellään ja kaasutetaan, jonka jälkeen synteettinen kaasu (SG) lauhdutetaan ennen puhdistusta, jossa poistetaan pienhiukkaset ja rikki. Tervan poisto riippuu kaasutustekniikan käyttämästä kaasutuslämpötilasta. Noin 850 °C käyttävät kaasutustekniikat tarvitsevat tervanpoistoa, toisin kuin suurilla lämpötiloilla (noin 1300 °C) sitä ei tarvita. Puhdistettu SG metanoidaan, jossa CO ja H₂ muutetaan CH₄:ksi ja CO₂:ksi. Lopuksi kaasu kuivataan ja poistetaan hiilidioksidi. Lopputuotteena syntyy maakaasun veroista kaasua, joka voidaan siirtää maakaasuverkkoon. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 303.) Liitteessä 3 on esitelty eri kaasutustekniikoiden tuotantokaavioita. Tuotantokaaviot eroavat suurimmilta osin kaasutusreaktorin toimintaperiaatteen, toimintapaineen, lämpötilojen ja tervan poiston osalta.



Kuva 12: Yksinkertaistettu kaavio Bio-SNG:n tuotannosta (van der Meijden C. M. et al. 2009, 303.)

Biomassan kaasutustekniikasta riippuen biomassa tarvitsee erilaisia esikäsittelymenetelmiä. Puumassa voidaan joutua esimerkiksi hakettamaan kiintopeti- ja leijukerrosreaktorissa, tai jopa torrefioimaan pölykaasutusreaktorissa. Pölykaasutuksessa torrefioitu puumassa

jauhetaan, paineistetaan CO₂ kaasulla ja pneumaattisesti siirretään reaktoriin. Torrefiointi on loogisin esikäsittely pölykaasutukseen. Tällöin jauhamiseen kuluu huomattavasti vähemmän energiaa ja säilytys- sekä kuljetuskustannukset vähenevät. Tosin torrefiointiprosessiin kuluu energiaa. Kiinteä- ja leijukerroskaasutus ei tarvitse vastaavanlaista esikäsittelyä. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 304.)

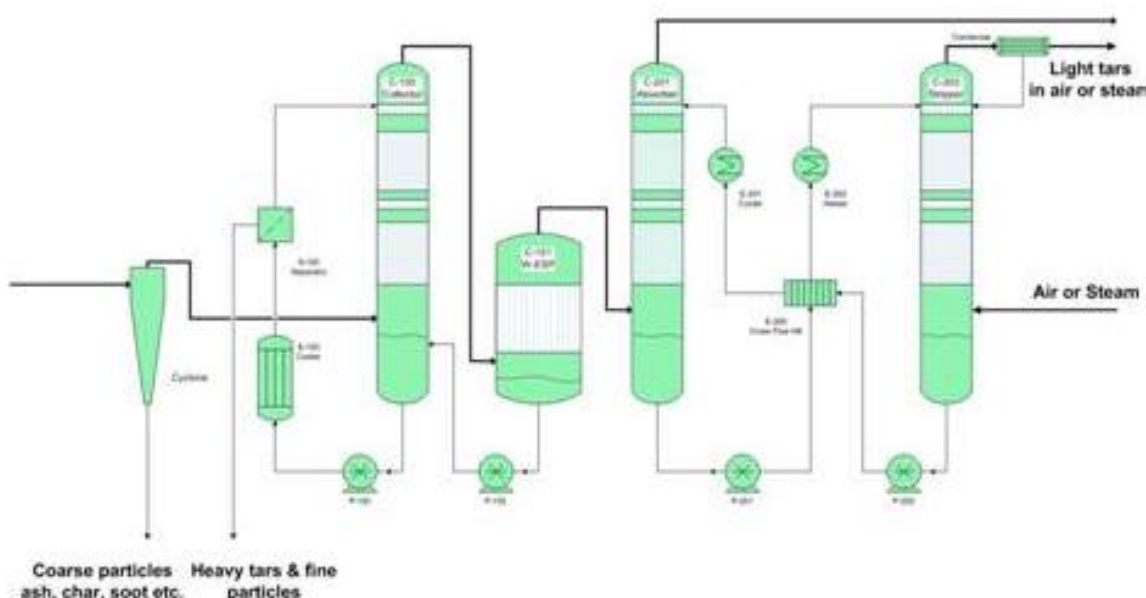
Jotta synteettinen kaasu sisältäisi mahdollisimman paljon metaania, tulisi kaasutusreaktorissa käyttää puhdasta happea (O₂) ilman sijaan. Ilmasta tullut typpi jouduttaisiin muutenkin poistamaan synteettisestä kaasusta, joka on hyvin hankalaa. Tämän takia myös epäsuorassa kaasutuksessa on käytetty inerttiä kaasua (CO₂:ia) pneumaattiseen siirtoon. Ilman vaihtaminen happeen saattaa aiheuttaa ongelmia erityisesti kiertopetireaktorissa, jossa paikallisten kuumien kohtien määrä lisääntyy. Tämä voi aiheuttaa petimateriaalin kasaantumista. Kasaantumisriskiä voidaan kuitenkin vähentää laimentamalla happea vesihöyryllä. Höyryn lisääminen heikentää kuitenkin kaasutuksen tehokkuutta. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 306.)

Pölypoltoreaktorissa noki saattaa aiheuttaa likaantumista. Van der Meijden C. M. et al. (2009, 306.) ovat olettaneet, että biomassan sisältämä vesi estää noen muodostumisen tehokkaasti, jolloin höyryn lisäämistä reaktoriin ei tarvita. Suuren lämpötilan ansiosta reaktorin reunoille muodostunut kuona pysyy nestemäisenä ja valuu reaktorin pohjalle. (van der Drift A. et al. 2004, 15.) Pölypoltoreaktori toimii 1300–1500 °C välillä. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 306.)

Epäsuora kaasutustekniikka on liitteen 3 kuvan 38 mukainen. Tekniikassa biomassa syötetään reaktoriin, jonne lisätään tulistettua höyryä (noin 5 p- % syötetystä biomassasta). Epäsuoran kaasutusreaktorin leijutusmateriaalina toimii yleensä hiekka, jonka lämpötila on noin 850 °C. Kaasutettu biomateriaali johdetaan puhdistukseen reaktorin yläkautta. Ylimääräinen leijutusmateriaali johdetaan hiiltynneen biomateriaalin kanssa reaktorin alakautta kiertopetikattilaan, jossa hiiltynyt biomateriaali poltetaan 925 °C lämpötilassa. Lämmitetty leijutusmateriaali johdetaan polton jälkeen kiertopetikattilasta takaisin kaasutusreaktoriin. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 306.)

Kaasutuksen jälkeen SG jäähdytetään pölypoltossa 600 °C:een sekä kiertopeti- ja epäsuorassa kaasutuksessa 400 °C:een. Pölypoltossa kaasua jäähdytetään kierrättämällä jo 250

°C:een jäähdytettyä synteettistä kaasua, jotta estetään suolan tiivistyminen ja saostuminen myöhempiin lämmönvaihtimiin. SG jäähdytetään lämmönvaihtimilla, jotka tuottavat höyryä. Kiertopeti- ja epäsuorassa kaasutuksessa lämpöä käytetään esilämmittämään syöttöilmaa ja/tai tulistamaan höyryä. Tämän jälkeen tuhka erotetaan syklonissa ja johdetaan polttoon, missä tuhkan hiili poltetaan loppuun. Terva ja jäljelle jääneet hiukkaset poistetaan Olga- savukaasunpuhdistustekniikalla. Olga- tekniikka sisältää kolme vaihetta, jotka esitellään kuvassa 13: ensimmäinen vaihe on keräys, jossa kaasu johdetaan jäähdytetyn öljyn läpi. Tällöin raskaat tervat kondensoituvat kaasusta. Suurin osa hiukkasista, jotka eivät poistu syklonissa poistetaan ensimmäisen vaiheen öljyllä. Hiukkaset ja tervat erotetaan öljystä ja palautetaan kaasutukseen. Toinen vaihe on absorptio, jossa kevyet tervakomponentit liukenevat öljyyn. Absorptio toimii vesikastepisteen yläpuolella, jolloin estetään veden kondensoituminen. Tämän jälkeen kaasusta on poistettu kaikki kondensoituvat tervat. Absorptiossa käytettävä öljy johdetaan Olga- järjestelmän kolmanteen vaiheeseen, jossa erotetaan öljy tervasta ilman tai höyryn avulla riippuen kaasutusjärjestelmästä. Erotettu öljy johdetaan takaisin absorptiojärjestelmään ja tervaa sisältävä höyry tai ilma johdetaan kaasutusreaktoriin. (Dahlman, 2007; van der Meijden C. M. et al. 2009, 307.)



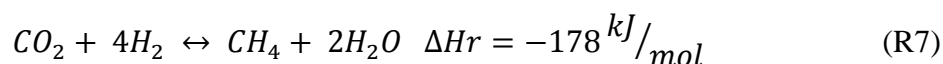
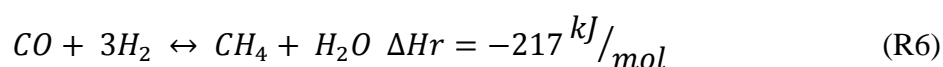
Kuva 13: Olga- prosessi (Dahlman, 2007.)

Biomassa sisältää hyvin vähän klooria. Van der Meijden C. M. et al. (2009, 307.) mittasivat tuotekaasussa alle 5 ppm pitoisuuden HCl:lle. Suurin osa puun sisältämästä kloorista on poistunut tuhkan mukana. Biomassan sisältämä rikki täytyy kuitenkin poistaa. Tyypilli-

sesti kaasutuksessa 90 % rikistä muodostaa H_2S :a ja 10 % COS -molekyylejä. Rikki voidaan poistaa savukaasusta sorbentin avulla. Esimerkiksi ZnO poistaa rikkiä alla olevan tasapainoyhtälön (R5) mukaisesti.



Rikin poiston jälkeen SG metanoidaan. Puhdistetun kaasun CO ja H_2 muutetaan metaaniksi alla olevien vahvasti eksotermisten reaktioiden (R6) ja (R7) mukaan.



Reaktioista syntyneestä lämmöstä tuotetaan höyryä. Kiertopetikattilakaasutuksen suurena ongelmana on noen muodostuminen metanointireaktorissa, jossa noki deaktivoi katalyytin ja tukkii systeemin. Hiilivedyn läsnäolo tuotekaasussa näyttäisi nopeuttavan noen muodostumista metanointikatalyytissä. Noen muodostumisen raja-arvoja metanointikatalyytissä ei tunneta vielä tarpeeksi hyvin, mutta teoriassa sitä voidaan ehkäistä lisäämällä höyryä ennen metanointia. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 308.)

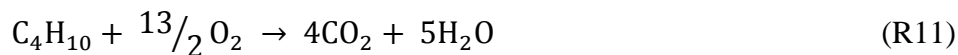
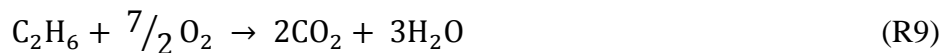
Metanoinnin jälkeen kaasusta poistetaan vesi lauhduttamalla, jolloin vesi kondensoituu ja voidaan poistaa. Tämän jälkeen kaasu paineistetaan 3 MPa paineeseen ja poistetaan CO_2 . (van der Meijden C. M. et al. 2009, 308.) Hiilidioksidipoiston jälkeen tuotekaasu paineistetaan ja johdetaan maakaasuverkkoon.

Bio-SNG:tä tuottavan prosessin hyötysuhde riippuu hyvin paljon käytetystä tekniikasta ja siitä kuinka hyvin prosessissa on saatu hyödynnettyä tuotettua lämpöä. Ilman ja höyryn esilämmitys, noen estoon tarvittava höyry ja eri laitteistojen tarvitsemat energiat vaikuttavat tuotetun bio-SNG:n hyötysuhteeseen. Biomassan energiasta saadaan muutettua bio-SNG:n energiaksi 55–70 %. Prosessissa tuotettu sähkö mukaan lukien voidaan päästä noin 75 % hyötysuhteeseen. (van der Meijden C. M. et al. 2009, 310; Vision Hunters. 2011. 94.)

Bio-SNG on maakaasun veroinen polttoaine ja sitä voidaan siirtää maakaasuverkon kautta, tämän ansiosta logistiikkaongelmat ovat siirretty bio-SNG:n tuotantolaitokselle. Tuotantolaitos voi sijaita kauempana kaupungeista, jolloin logistiikkajärjestelyt ja jalostusmateriaalin säilytys ovat helpompia suuremman tilan johdosta lähiympäristössä. Tällöin myös jalostusmateriaalin kuljetusetäisyydetkin ovat pienempiä. Tuotantolaitos täytyy kuitenkin olla maakaasuverkon lähistöllä, koska maakaasuverkon rakentaminen on hyvin kallista. Bio-SNG:n käyttö vaatii omaa tuotantolaitosta tai tuotantoyhteistyötä Vantaan ulkopuolella. Tällainen tuotantolaitos edellyttää suuria investointeja. (Vision Hunters, 2011, 121.) Helsingin Energialla, Gasumilla ja Metsä-Botnialla on käynnissä esiselvitys bio-SNG:tä tuottavan laitoksen rakentamisesta Joutsenoon. Bio-SNG:n tuotannossa käytettäisiin pääasiassa sellutehtaan puunhankinnan sivuvirroista syntyvää metsähaketta ja kuorta. Suunnitellun tuotantolaitoksen teho olisi jopa 200 MW. (Helsingin Energia, 2011.) Myös Haminan Energia ryhtyy tuottamaan bio-SNG:tä autojen polttoaineeksi mädättämällä nurmirehua, kalanviljelylaitoksen perkuujätettä, karjaeläinten lantaa sekä elintarviketeollisuuden jätettä. Prosessissa käytetään myös tullin takavarikoimaa alkoholia. (Kymen Sanomat, 2012.)

Koska bio-SNG on hyvin pitkälle jalostettu polttoaine, on sen hintakin korkea. Omakustannehinnaksi sille on arvioitu noin 45 €/MWh. (Vision Hunters, 2011, 95.) Bio-SNG:n korkean hinnan vuoksi ei maailmassa ole suuria bio-SNG laitoksia, joten niiden rakentaminen suuressa mittakaavassa on hyvin riskialtis sijoitus.

Alla olevasta taulukosta 7 nähdään bio-SNG:n tuottamat savukaasupäästöt. Taulukossa on laskettu, kuinka paljonko savukaasu sisältää CO₂:a, SO₂:a, N₂:ä, H₂O:ä ja Cl:a tuottaessa 1 MJ lämpöenergiaa. Laskuissa on oletettu, että kaikki polttoaineen tyyppi muodostaa typipikaasua, palaminen on täydellistä, tilanne ennen rikinpoistoa ja ilmankerroin on 1. Laskuissa on käytetty bio-SNG:n tehollisena lämpöarvona 49,9 MJ/kg ja kosteuspitoisuutena 0 %, jolloin bio-SNG:tä tarvitaan 0,02004 kg/MJ. (Alakangas E. 2000, 141.) Bio-SNG:n palaminen tapahtuu alla olevien reaktioiden (R8)–(R11) mukaisesti.



Taulukko 7: Bio-SNG:n poltossa muodostuvan aine- ja savukaasun koostumus yhtä MJ:a kohden

Alkuainekoostumus	Tilavuus %	Moolimassa [g/mol]	Osuus [% g/MJ]	Massa % [g/MJ]	Osuus [g/MJ]	nx [mol/MJ]
CH ₄	98	16,043	1572	0,954	19,11	1,1911
C ₂ H ₆	0,5	30,07	15	0,009	0,18	0,0061
C ₃ H ₈	0,25	44,097	11	0,007	0,13	0,0030
C ₄ H ₁₀	0,25	58,124	15	0,009	0,18	0,0030
CO ₂	0,5	44,01	22	0,013	0,27	0,0061
N ₂	0,5	28,013	14	0,008	0,17	0,0061
Tuhka						
Yhteensä	100		1649	1	20,04	1,2154

		Savukaasut [mol/MJ]				
Alkuainekoostumus	O ₂ tarve [mol/MJ]	CO ₂	SO ₂	N ₂	H ₂ O	Cl
CH ₄	2,3822	1,1911			2,3822	
C ₂ H ₆	0,0213	0,0122			0,0182	
C ₃ H ₈	0,0152	0,0091			0,0122	
C ₄ H ₁₀	0,0198	0,0122			0,0152	
CO ₂		0,0061				
N ₂				0,0061		
Tuhka						
Yhteensä	2,4384					
Ilman tyyppi (O ₂ tarve*3,77)	9,1929			9,1929		
Kuiva ilma (Ilman tyyppi + O ₂ tarve)	11,6314					
Kosteutta ilmassa (0,0049*Kuiva ilma)	0,0570					
Kostea polttoilmaa (Kuiva ilma + Kosteutta ilmassa)	11,6884					
Savukaasun komponentit		1,2306	0,0000	9,1990	2,4278	0,0000
Yhteensä						12,8574

3.2 Tuhkan käyttäytyminen

Tuhkan aiheuttamat ongelmat polton yhteydessä ovat suurin yksittäinen syy kattiloiden ennakoimattomiin alasajoihin. Polttoaineen sisältämä tuhka vähentää polttoaineen lämpöarvoja likaa kattilan lämpöpintoja, kuluttaa polttoaineen käsittelylaitteita sekä saattaa muodostaa lämpöpinnoille syövyttäviä kerrostumia. (Huhtinen M. et al. 2004, 41.) Liitteen 1 taulukoista 60 ja liitteestä 4 taulukosta 62 voidaan tarkastella eri polttoaineiden tuhkan pitoisuuksia ja alkuainekoostumuksia. Taulukoista huomataan, että pii (Si), alumiini (Al) ja rauta (Fe) ovat keskeisimpiä aineita hiilen, turpeen ja nopeakasvuisten biomassojen tuhka- kassa, kun taas puun tuhka sisältää suurimmilta osin alkali- ja maa-alkalimetalleja. Biomassojen sisältämien ravintoaineiden esimerkiksi fosforin (P) ja kaliumin (K) pitoisuuden voivat vaihdella voimakkaasti, riippuen lannoitteista, maaperästä, vuodenajoista ja korjuumenetelmästä. (Raiko R. et al. 2002, 269, 270.)

Polttoaineesta peräisin olevat silikaatit (Si_xO_y) esiintyvät usein 10–100 μm :n hiukkasfraktioissa hiilen ja turpeen pölypoltossa. Nopeakasvuissa biomassoissa suurin osa tuhka- ja täten myös silikaatit esiintyvät alle 1 μm :n fraktioissa. Ongelmaksi silikaatit muodostuvat yleensä korkeissa lämpötiloissa ($> 950\text{ }^\circ\text{C}$). Alle 1 μm :n kokoiset hiukkaset, kuten hiilen pölypoltossa esiintyvät alkali- ja maa-alkalioksidit eivät yleensä aiheuta ongelmia, mikäli ne eivät pääse reagoimaan savukaasun kanssa. Savukaasun mahdollisesti sisältämä rikkidioksidi muuttaa tilannetta, jolloin rikkidioksidi reagoi tuhkan alkali- ja maa-alkalidioksidien kanssa sulfaateiksi (SO_4^{2-}), jotka aiheuttavat kerrostumia esimerkiksi reagoimalla kalsiumin kanssa kalsiumsulfaateiksi (CaSO_4). (Raiko R. et al. 2002, 274, 275.)

3.2.1 Lämpöpintojen likaantumismekanismit

Tuhkakerrostuman muodostumiselle lämpöpinnalle on kaksi tärkeää edellytystä, ensiksi tuhka- hiukkasten on saavutettava lämmönvaihtopinta ja toiseksi hiukkasten on tartuttava pinnalle. Impaktio, eli iskeytyminen, on suurten yli 5 μm olevien hiukkasten tärkein kulkeutumismekanismi savukaasuvirrassa olevalle lämmönvaihtopinnalle. Tällöin hiukkaset kerääntyvät yleensä harjannemaiseksi kerrostumaksi pinnan tulopuolelle. Pienet alle 1 μm olevat hiukkaset eivät iskeydy lämmönvaihtopinnoille, vaan seuraavat savukaasujen virtausta putkien ympäri, jolloin pienet hiukkaset voivat kerääntyä melko tasaisesti koko put-

ken pinnalle savukaasuvirtauksesta huolimatta. Tätä kutsutaan diffuusiomekanismiksi. Nämä kerrostumat löytyvät yleensä paksumman kerrostuman alta tai putken takapuolelta. (Raiko R. et al. 2002, 276.)

Tuhkan eri aineiden sulamispisteet vaihtelevat varsin laajalla lämpötila-alueella (600–2900 °C). Tämän vuoksi polttoaineen tuhka ei sula tietyssä lämpötilassa vaan pehmenee asteittain muuttuen kiinteästä nestemäiseksi lämpötilan noustessa. Pehmenemis- ja sulamislämpötilat vaihtelevat kuitenkin tuhkan koostumuksesta riippuen. (Huhtinen M. et al. 2004, 41; Raiko R. et al. 2002, 292.)

Parhaiten tuhka hiukkanen tarttuu putkipinnoille, kun se on osittain sulanut. Tyypillisesti näin tarttuvat hiukkaset koostuvat alkalisilikaateista, alkali- ja maa-alkalisulfaateista, alkaliklorideista tai näiden seoksista. Eri alkalivanadaatit muodostavat myös sulia jo alhaisissa 700–800 °C:een lämpötiloissa. Vaikka näiden aineiden sulamispisteet puhtaina yhdisteinä ylittävät monissa tapauksissa 1 000 °C, alkavat niiden seokset sulaa joissain tapauksissa jo 500 °C:ssa. Sulan ja kiinteän aineen seoksena esiintyvän tuhkan lämpötila-alueella tuhka hiukkaset ovat n. 15–70 %:sti sulaneet, jolloin tuhka tarttuu ja kerrostuu kaikkein parhaiten. Tällöin puhutaan tuhkan T_{15} - ja T_{70} -lämpötiloista. Hiukkasen ollessa täysin kiinteä, tai ainoastaan pieneltä osalta sulassa ($< T_{15}$ -lämpötilan) tilassa kohdatessaan lämpötilapinnan, ei tuhka hiukkanen tartu lämpöpintaan, vaan kimpoaa takaisin savukaasuvirtaan. Jos savukaasun lämpötila ylittää T_{15} -lämpötilan, liimautuu tuhka hiukkanen lämpötilapintaan. Tällöin kerrostuma voi kasvaa äärettömän paksuksi. Hiukkasen ollessa lähes täysin, tai täysin sula ($> T_{70}$ -lämpötila) iskeytyessään lämpöpinnalle, hiukkanen ei kasvata kerrostumaa, vaan valuu pintaa pitkin pois. Tämän johdosta tiettyjä tuhkan sulamisasteita vastaavat lämpötilat ovat erittäin tärkeitä rajalämpötiloja lämpöpintojen likaantumisalttiutta arvioidessa. (Huhtinen M. et al. 2004, 42; Raiko R. et al. 2002, 277–280.)

Silikaattipohjaiset tuhkapartikkelit voivat aiheuttaa kerrostumia sulana, tai osittain sulana. Silikaattisulan erikoispiirre on lasin muodostumistaipumus. Eli silikaattisula ei kiteydy kiinteäksi faasiksi, vaikka savukaasun lämpötila laskeekin silikaattisulan ensisulamispisteeseen alle, vaan se jähmettyy lämpötilan laskiessa. Nämä lasittuneet silikaattihiukkaset voivat kasvaa yhteen lasifaasin hitaan virtausliikkeen aikaansaaman sintraantumisen kautta, sellaisissa lämpötiloissa, jotka ovat reilusti alle kyseisen silikaattiseoksen ensisulamislämpötilan. Sintraantuminen on riippuvainen hiukkaskoon, lämpötilan, ajan ja pintaenergian

lisäksi lasin viskositeetista. Alemmalla viskositeetilla sintraantumiskauloja syntyy enemmän. Viskositeettia alentavia alkuaineita ovat natrium (Na), kalium ja pelkistetyssä muodossa oleva rautaioni Fe^{2+} . Osittain sulanut silikaattituhka on hiilen ja turpeen pölypoltossa merkittävä kuonaantumisongelmia aiheuttava tekijä tulipesän seinämillä ja tulistimilla. Polttaessa runsaasti natriumia ja kaliumia sisältäviä puupolttoaineita silikaattituhkasta voi tulla vielä enemmän ongelmia. (Raiko R. et al. 2002, 281–283.)

Kerrostumia voi myös aiheuttaa savukaasun reaktiot tuhkahiukkasten kanssa. Esimerkiksi sulfaatin muodostuksen on huomattu edistävän kalsiumpitoisten hiukkasten yhteen kasvamista, eli sintraantumista. Karbonaatinmuodostuksen (CO_3^{2-}) on myös osoitettu edistävän kalsiumoksidia (CaO) sisältävien tuhkahiukkasten sintraantumista. Kasvanut sulfatointiaste sekä karbonatisoituminen lisää sintraantuneiden palojen murskalujuutta. Karbonatisoituminen aiheuttaa kerrostumia tulistimilla muun muassa hiilen pölypolttokattilassa, kun käytetään rikinpoistomenetelmänä kalkin syöttöä tulipesään. (Raiko R. et al. 2002, 283.)

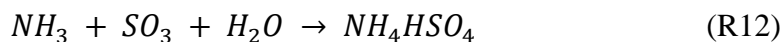
3.2.2 Korroosion muodostuminen ja ongelmat

Korkeissa lämpötiloissa olevien perinteisten metalliseosten korroosiosuoja perustuu yleensä metalliseospinnalle muodostuneen tiiviin metallioksidikerroksen, suojaavaan ominaisuuteen. Tyypillisesti lisäaineilla, kuten kromi (Cr), molybdeeni (Mo), alumiini ja pii, pyritään parantamaan metalliseoksen oksidipinnan korroosiokestävyyttä. Kyseinen oksidikerros ei estä metallia syöpymästä, vaan hidastaa sitä. Oksidikerroksen ominaisuudet ja ympäristö ratkaisevat lopulta sen, kuinka nopeasti metalli lopulta syöpyy. Tuhkakerrostumat johtavat usein tulipesässä ja savukaasukanavissa ilmenevään korroosioon. Kerrostuma voi aiheuttaa metallipinnalle paikallisen, korroosiolle otollisen ympäristön. (Raiko R. et al. 2002, 284.)

Kattilan paikalliset pelkistävät olosuhteet voivat aiheuttaa metallipintaa suojaavan oksidikerroksen vaurioitumisen ja korroosiosuojan heikkenemisen. Tilannetta vakavoittaa, jos pelkistävien olosuhteiden yhteydessä on myös korroosiota edistäviä rikki- tai klooriyhdisteitä, esimerkiksi sulfideja tai klorideja. Heikentyneen korroosiosuojan seurauksena, kloori ja rikki pääsevät reagoimaan kattilan metallin kanssa, muodostaen sulfideja ja klorideja, jotka eivät suojaa metallia korroosiolta. (Raiko R. et al. 2002, 284.)

3.2.3 Lisäaineiden vaikutus tuhkan käyttäytymiseen

Erilaisten uusien savukaasujen puhdistusmenetelmien käyttöönoton myötä kattilan kuonaantumisen-, likaantumisen- ja korroosio-ongelmat muuttuvat. Low-NO_x -polttotekniikoita sovellettaessa muodostuu paikallisesti pelkistävät olosuhteet, lisäksi erilaiset injektiomallit voivat aiheuttaa sekä likaantumista että korroosiota. Injektiokemikaaleista ammoniakki, urea sekä kalsiumpohjaiset kemikaalit (kalkkikivi) ovat kiinnostavimmat korroosion ja likaantumisen kannalta. Injektiokalkki voi reagoidessaan kovettua kerrostumaksi joko hiilidioksidin, tai rikkidioksidin kanssa. Voimakkainta kovettuminen on n. 800 °C:ssa. Ammoniumsuolojen muodostuminen on mahdollista, jos typpioksidien vähentämiseen käytettävää ammoniakkia käytetään liikaa. Tällöin osa ammoniakista ei reagoi typpidioksidien kanssa vaan jää savukaasuun ja muodostaa ammoniumsuoloja. Erityisen hankala yhdiste sekä korroosion että likaantumisen kannalta on ammoniumvetysulfaatti NH₄HSO₄, joka sulaa varsin alhaisissa lämpötiloissa. NH₄HSO₄:n muodostuminen vaatii ammoniakkiylijäämää, sopivan rikkitrioksidin (SO₃) pitoisuuden sekä yli 280 °C:n lämpötilan jolloin seuraava reaktio (R12) tapahtuu:



Sula NH₄HSO₄ toimii erittäin tehokkaasti liimana muille kiinteille savukaasuhiukkasille. Katalyyttisessä typenpoistomenetelmässä (SCR) NH₄HSO₄:n muodostuminen vaikeuttaa katalysaattorin toimintaa aiheuttamalla katalysaattoripintojen likaantumista ja tukkeutumista. Oikealla ammoniakinsyöttömäärällä (NH₃) vältetään tällaisilta ongelmilta. (Raiko R. et al. 2002, 291, 292.)

3.2.4 Tuhkan hyötykäyttö

Uudessa jätelaissa (646/2011) 8 § määritellään että, ”kaikessa toiminnassa on mahdollisuuksien mukaan noudatettava seuraavaa etusijaisjärjestystä: Ensisijaisesti on vähennettävä syntyvän jätteen määrää ja haitallisuutta. Jos jätettä kuitenkin syntyy, jätteen haltijan on ensisijaisesti valmistettava jäte uudelleenkäyttöä varten tai toissijaisesti kierrätettävä se. Jos kierrätys ei ole mahdollista jätteen haltijan on hyödynnettävä jäte muulla tavoin, mukaan lukien hyödyntäminen energiana. Jos hyödyntäminen ei ole mahdollista, jäte on lop-

pukäsiteltävä.” Tämä tarkoittaa, että voimalaitoksesta syntyvä tuhka tulee ensisijaisesti mahdollisuuksien mukaan hyötykäyttää.

Kivihielestä ja biopolttoaineesta tulevan tuhkan hyötykäyttökohteita ovat maarakentaminen (591/2006) ja hyödyntäminen betoniteollisuuden raaka-aineena. Maarakentamisessa käytettävän tuhkan raskasmetallipitoisuuden raja-arvot voivat helposti ylittyä. Tästä syystä tuhkan hyödyntäminen maarakentamisessa edellyttää tuhkan luovuttajalta laadunvarmistamista. Tuhkaa voidaan käyttää maanparannusaineena yleisiin teihin, pysäköintialueisiin, urheilukenttiin, ratapihoihin ja teollisuus-, jätteenkäsittely- sekä lentoliikenteen alueiden varastointikenttiin ja teihin. Poislukien tärkeät tai vedenhankintaan soveltuvat pohjavesialueet.

Betoniteollisuuden käyttämä tuhka saa nykystandardien mukaan sisältää enintään 10 % muun kuin kivihieksen tuhkaa. Yhteispoltossa kuivan kivihieksen osuus on oltava vähintään 80 %, mutta uuden lentotuhkastandardin luonnosesityksen mukaan kivihieksen osuus on laske-massa edelleen 60–50 %:iin, jos kivihieksen kanssa poltetaan vain puuta. Tällöin puun tuhkan osuus saa olla enintään 30 % käytetystä tuhkasta. Tuhka toimii betonissa sideaineena ja se parantaa betonin loppulujuutta. (Flyktman M. et al. 2011, 41, 42; Pesonen J. 2012, 35; van den Berg J. W., 2010.)

Kaasutuksessa syntyvät biopolttoaineen tuhka saadaan erilleen, jolloin sitä voidaan myös käyttää lannoitteena maataloudessa tai metsätaloudessa. Lannoitevalmistuslain (539/2006) nojalla tehty Maa- ja metsätalousministeriön asetus (24/2011) lannoitevalmistuksesta määrittelee tarkemmin tuhkan raja-arvot. Lannoitevalmistusasetus määrittelee myös, että tuhkalannoitteena tai sen raaka-aineena voidaan käyttää turpeen, peltobiomassan tai puun tuhkaa sekä eläinperäistä tuhkaa. Tällöin hieksen tuhkaa ei voida hyödyntää lannoitteena.

Lannoitteena tai maanparannusaineena käytettävän tuhkan hiilipitoisuus olisi suositeltavaa olla alle 10 % jotta sen käyttö olisi järkevää. Biomassan kaasutuksessa syntyvän tuhkan hiilipitoisuus jää tyypillisesti yli 10 %:n. Suuri inertti hiilimäärä vähentää ravinteiden osuutta tuhkassa. Toisaalta tietyissä biokaasutusprosesseissa muodostunut tuhka muistuttaa ominaisuuksiltaan aktiivihieiltä, jota käytetään muun muassa adsorbenttina. Aktiivihieksen adsorptio-ominaisuudet ovat tyypillisesti parempia kuin biotuhkan, mutta tuhkan ominaisuuksia voidaan parantaa erilaisilla menetelmillä. (Kilpimaa S. et al. 2011. 82.)

4 LAINSÄÄDÄNNÖLLISET TUET JA RAJOITTEET

Suomen valtion ja EU:n tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasuja ja lisätä uusiutuvilla energialähteillä tuotettua energiaa. Jotta energiantuotanto olisi kannattavampaa uusiutuvilla energialähteillä, on Suomen valtio ja EU asettanut erilaisia tukitoimia parantamaan uusiutuvien energialähteiden kilpailukykyä fossiilisiin polttoaineisiin nähden. Tässä kappaleessa selvitetään, minkälaisia tukia on mahdollista saada eri polttoaineille tällä hetkellä ja tulevaisuudessa. Kappaleessa käydään läpi myös tämänhetkisiä EU-direktiivejä ja tulevia päästörajoituksia.

4.1 Tämänhetkiset valtion ja EU:n tukemat polttoaineet

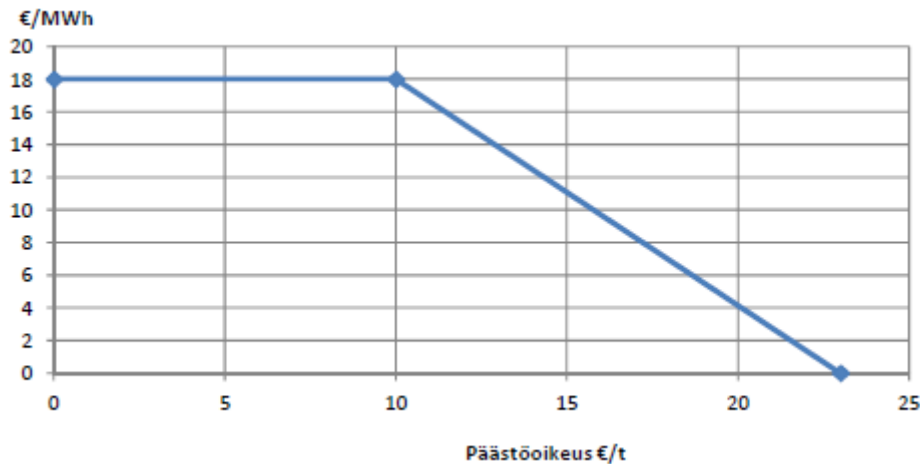
Tässä kappaleessa käydään läpi tämänhetkinen lakitilanne ja erilaiset tukimuodot yrityksille. Osa tukisäädöksistä päättyy lähiaikoina, mutta tämänhetkiset tuet helpottavat arvioimaan tulevia tukipäätöksiä.

4.1.1 Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuki

Vuonna 2011 voimaan astunut laki (1396/2010) takaa uusituvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuen (syöttötariffi). Tämä tuotantotuki annetaan tuulivoimalle, biokaasulle ja puupolttoaineita sekä metsähaketta käyttäville voimalaitoksille. Syöttötariffeja on kahta erityyppiä. Ensimmäinen on tarkoitettu tuulivoimalle, biokaasulle sekä puupolttoainetta käyttäville voimalaitoksille, joissa syöttötariffin tavoitehinta on 83,50 €/MWh. Nopealla aikavälillä tuotantonsa aloittaville tuulivoimaloille voidaan myöntää korotettu syöttötariffi, joka on 105,30 €/MWh kolmeksi vuodeksi. Korotettu tuki lopetetaan kaikilta viimeistään vuonna 2015. Ensimmäisen syöttötariffin maksettava tuki määräytyy tavoitehinnan ja kolmen kuukauden voimalaitoksen sijaintipaikasta riippuvan sähkön markkinahinnan keskiarvon erotuksella. Toinen syöttötariffi koskee metsähakevoimaloita. Toisessa syöttötariffissa maksetaan muuttuvaa tuotantotukea päästöoikeuden hinnan mukaan, mutta enintään 18 €/MWh, kun päästöoikeuden hinta on 10 €/tCO₂ tai alle. Päästöoikeuden hinnan ollessa 23 €/tCO₂ tai yli tuotantotukea ei enää makseta. Tuotantotuki lasketaan alla olevan kaavan (1) mukaan, missä P_e = päästöoikeuden kolmen kuukauden keskiarvohinta [€/tCO₂]. 16 § mu-

kaan syöttötariffin voi saada enintään kahdentoista vuoden ajan siitä, kun oikeus syöttötarffiin alkaa. Kuvasta 14 nähdään metsähakkeella tuotetun sähkön tuotannon muuttuvan tuen määrä päästöoikeuksien hinnan mukaan.

$$18 - \frac{18}{13} \cdot (P_e - 10) \quad (1)$$



Kuva 14: Metsähakkeella tuotetun sähkön tuotannon muuttuvan tuen määrä päästöoikeuksien hinnan mukaan (Flyktman M. et al. 2011, 48.)

6-11 §:n mukaan, ollakseen oikeutettuja syöttötarffiin, tulee metsähake-, puupolttoainekä biokaasulaitosten olla vähintään 100 kW. Tuulivoimaloiden tulee olla vähintään 500 kW laitoksia. Puupolttolaitosten generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho on enintään 8 MVA. Kapasiteettirajoitusten lisäksi laitoksilta vaaditaan sähkön tuotantoa 200 MWh/a. Tariffijärjestelmää rajoitetaan myös kokonaiskapasiteetin mukaan. Järjestelmään ei hyväksytä enää uusia laitoksia silloin, kun laitosten kokonaiskapasiteetti saavuttaa tuulienergialla 2 500 MW, biokaasuvoimaloilla 19 MW ja kun puupolttoainevoimaloita on enemmän kuin 50 ja niiden yhteenlaskettu nimellisteho ylittää 150 MW. Tuuli-, biokaasu- ja puupolttoainevoimalat täytyy myös olla uusia, eivätkä ne saa sisältää käytettyjä osia, jotta ne voidaan hyväksyä syöttötariffin piiriin. 16 §:n mukaan puupolttoainevoimalaitos ei ole oikeutettu tukeen, jos syöttötariffi ylittää 750 000 euroa neljältä perättäiseltä tariffijaksolta (tariffijakso on 3 kk). (1396/2010) Alla olevista taulukosta 8 nähdään tuuli-, biokaasu- ja puupolttoainevoimaloiden ja taulukosta 9 metsähakevoimaloiden maksettu syöttötariffi 1.7.–31.12.2011 väliseltä ajalta.

Taulukko 8: Tuuli-, biokaasu- ja puupolttoainevoimaloille maksettu syöttötariffi 1.7.–31.12.2011 välisenä aikana (Energiamarkkinavirasto)

Tariffijakso	Sähkön markkinahinnan keskiarvo [€/MWh]	Syöttötariffi, kun tavoitehintaa on 83,50 €/MWh [€/MWh]	Syöttötariffi, kun tavoitehintaa on 105,30 €/MWh [€/MWh]	Tuntien osuus, jolloin sähkön markkinahinta on ollut negatiivinen
3/2011 (1.7.–30.9.2011)	43,40	40,10	61,9	0 %
4/2011 (1.10.–31.12.2011)	37,39	46,11	67,91	0 %

Taulukko 9: Metsähakevoimaloille maksettu syöttötariffi 1.7.–31.12.2011 välisenä aikana (Energiamarkkinavirasto)

Tariffijakso	Päästöoikeuden markkinahinnan keskiarvo [€/t _{CO2}]	Syöttötariffin määrä [€/MWh]
3/2011 (1.7.–30.9.2011)	12,10	15,09
4/2011 (1.10.–31.12.2011)	8,88	18,00

Syöttötariffin lisäksi biokaasulla ja puupolttoaineella toimivat yhteistuotantolaitokset ovat oikeutettuja 26 §:n mukaan saamaan lämpöpreemiota. Lämpöpremiokorotus syöttötariffiin on biokaasulaitokselle 50 €/MWh ja puupolttoainevoimalaitoksille 20 €/MWh. (1396/2010)

4.1.2 Energiatuki

Energiatuki on harkinnanvarainen valtionavustus, jolla on tarkoitus edistää uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja uuden tehokkaan energiateknologian käyttöönottoa sekä vähentää energian tuotannon ja käytön ympäristöhaittoja. Valtioneuvoston asetuksen (1313/2007) energiatuen myöntämisen yleisistä ehdoista 1 §:n mukaan työ- ja elinkeinoministeriö voi myöntää tukea investointihankkeeseen ja selvityshankkeeseen jos hyväksyttävät kustannukset ylittävät 3 000 000 euroa investointihankkeessa ja 250 000 euroa selvityshankkeessa. Muussa tapauksessa työvoima- ja elinkeinokeskus myöntää tuen. Työ- ja elinkeinoministeriö voi erityisistä syistä siirtää itselleen päätösvallan työvoima- ja elinkeinokeskuksen toimivaltaan kuuluvassa asiassa.

Asetuksen 2 §:ssä on esitetty, että energiatukea voi myöntää sellaisiin ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointi- ja selvityshankkeisiin, jotka: edistävät uusiutuvaa energian tuotantoa tai käyttöä, edistävät energiansäästöä tai energian tuotannon tai käytön tehostamista, taikka vähentävät energian tuotannon tai käytön ympäristöhaittoja.

Tukea voi saada 4 §:n mukaan enintään;

- ”40 % energiakatselmuksissa, -analyyseissä ja muissa investointeihin liittyvissä selvityshankkeissa
- 40 % tuulivoimatuotantoa tai aurinkoenergian käyttöä edistävissä investointihankkeissa
- 40 % investointihankkeissa, jotka sisältävät energiaa säästävää taikka uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä edistävää uutta tekniikkaa
- 30 % investointihankkeissa, jotka sisältävät energiaa säästävää taikka uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä edistävää tavanomaista tekniikkaa
- 30 % investointihankkeissa, jotka vähentävät energian tuotannon tai käytön ympäristöhaittoja
- 25 % energiahuollon varmuutta ja monipuolisuutta edistävissä investointihankkeissa”

Nykyinen energiatukiohjelma päättyy vuoden 2012 lopulla. Energiatukiohjelma on tarpeen korvata vuoden 2013 alusta uudella energiatukiohjelmalla, jonka arvioitu valmistumisaika on syksyllä 2012. (TEM, 2011.) Uudessa energiatukiohjelmassa on otettava huomioon EU:n valtiontukisääntelyssä tapahtuneet muutokset, jotka eivät kuitenkaan näyttäisi olevan merkityksellisiä kivihiilen korvaamiseen tarkoitetun energiatuen kannalta. Tällöin tältä osin energiatukiohjelman jatkamiseksi nykyisellään ei olisi estettä. (TEM/2932/03.01.01/2011, 4.)

4.1.3 Kaukolämpövero helpotus ja hiilidioksidin päästöoikeus

Fossiilisella polttoaineella tuotetusta kaukolämmöstä joutuu maksamaan veroa. Veron suuruus riippuu fossiilisesta polttoaineesta. Tämä vero pitää sisällään energiasisältöveron, hii-

lidioksidiveron yhteistuotannossa ja huoltovarmuusmaksun. Tällä hetkellä (19.3.2012) kivihiilen kaukolämpövero on 91,905 €/t, eli 13,13 €/MWh. (Lehtinen S. Karjalainen P. 2012) Maakaasulla tuotetun yhteistuotannon kaukolämpövero on vuonna 2011 6,054 €/MWh, vuonna 2013 8,554 €/MWh ja vuonna 2015 10,754 €/MWh. (Rantakokko J-P. 2010, 21.) Biopolttoaineella tehdystä kaukolämmöstä ei tarvitse maksaa veroa.

Euroopan Unionin jäsenmaat ovat sitoutuneet päästökauppaan. EU:n päästökauppajärjestelmään kuuluvat esimerkiksi polttoaineteholtaan yli 20 MW:n energiantuotantolaitokset, öljynjalostamot ja koksamot. Päästökauppa koskee Suomessa noin 550 energiantuotanto- ja teollisuuslaitosta. (Energiateollisuus) Päästökaupassa energiantuotantolaitos joutuu maksamaan päästöoikeudesta. Päästöoikeuden markkinahinta oli 19.3.2012 8,59 €/t_{CO2} (Lehtinen S. Karjalainen P. 2012) ja vuonna 2020 päästöoikeuden hinnaksi on arvioitu 30 €/t_{CO2}. (Flyktman M. et al. 2011, 28.) Koska biopolttoaineet katsotaan olevan hiilidioksidineutraaleja polttoaineita, niiden tuottamasta hiilidioksidista ei tarvitse maksaa päästöoikeuksia.

4.2 Lainsäädännölliset muutokset toimintaympäristössä

Euroopan parlamentti ja neuvosto on säätänyt voimallisia ja uusiutuvaa energiaa koskevia direktiivejä, joiden tavoitteena on edesauttaa uusiutuvan energian käyttöä ja vähentää päästöjä ympäristöön. Näiden direktiivien pohjalta Suomen valtio on jo säätänyt veroja ja tukia, jotka ohjaavat energiantuotantoa kestävämpään uusiutuvaan energiaan. Uudet ja vanhat direktiivit kuitenkin velvoittavat valtiota jatkamaan päästöjen vähentämistä ja uusiutuvan energian tukemista, jonka johdosta Suomen valtio joutuu korvaamaan vanhentuvia tukisäädöksiä uusilla. Tässä kappaleessa tutustutaan EU:n säätämiin direktiiveihin ja mahdollisiin tuleviin lainsäädäntöihin.

4.2.1 RES-direktiivin säädökset

Euroopan parlamentti ja neuvosto on asettanut direktiivillä 2009/28/EY (RES-direktiivi) tavoitteen, että vuonna 2020 uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian tulee kattaa 20 % energian kokonaisloppukulutuksessa Euroopan yhteisössä. Direktiivin liitteessä 1 asetetaan yksilölliset tavoitteet maakohtaisesti. Suomen tavoitteena on tuottaa 38 % energian

kokonaisloppukulutuksesta uusiutuvilla energialähteillä. Vuoteen 2020 mennessä direktiivissä asetetaan myös tavoitteeksi käyttää 10 % liikennepolttoaineista uusiutuvilla energialähteillä kaikissa jäsenmaissa.

Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto katsoo, että uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön lisääminen, energiansäästäminen ja lisätty energiatehokkuus vähentävät kasvihuonekaasupäästöjä. Direktiivi edesauttaa myös energiansaannin varmuutta, teknologian kehitystä ja innovaatiota sekä luo työllistymis- ja aluekehitysmahdollisuuksia etenkin maaseuduilla ja eristäytyneillä alueilla. Komission ja jäsenvaltioiden tulisi tukea kansallisia ja alueellisia kehitystoimia, rohkaistava parhaan mahdollisen teknologian käyttöä uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian tuotannossa paikallisten ja alueellisten kehitysaloitteiden välillä sekä edistettävä rakennerahastojen käyttöä. (2009/28/EY, kohdat 1, 3.) Myös julkista tukea tarvitaan, jotta saavutetaan uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön lisäämiseen liittyvät tavoitteet. Eritoten niin kauan kuin sähkön hinnat eivät sisämarkkinoilla vastaa käytettyjen energialähteiden ympäristöön liittyviä ja sosiaalisia kokonaiskustannuksia ja –hyötyjä. (2009/28/EY, kohta 27.)

RES-direktiivin tavoitteena on luoda ennakoitavuutta investoijien näkökulmasta ja kannustaa sellaisten tekniikoiden jatkuvaa kehittämistä, joiden avulla tuotetaan energiaa kaiken tyyppisistä uusiutuvista lähteistä. (2009/28/EY, kohta 14.) Direktiivillä pyritään helpottamaan rajat ylittävää tukea uusiutuvista lähteistä peräisin olevalle energialle tämän vaikuttamatta kansallisiin tukijärjestelmiin. Tässä toinen jäsenvaltio voi tukea energian tuotantoa toisessa jäsenvaltiossa, tai kolmansissa maissa, jolloin uusiutuvan energian tuotannon tukeminen tulisi huomioida jommankumman jäsenvaltion kokonaistavoitteen täyttymisessä. (2009/28/EY, kohta 25.)

Direktiivi kehottaa lisäämään olemassa olevien puuvarojen käyttöönottoa ja uusien metsänhoitojärjestelmien kehittämistä, jotta biomassan potentiaalia voitaisiin hyödyntää kaikkialta osin. (2009/28/EY, kohta 24.) Puuvarojen käyttöönotto tulee kuitenkin toteuttaa ohjeistetun kestävyyskriteeristön pohjalta.

Välitavoitteiden lähtökohtana pidetään vuoden 2005 päästötasoa, koska se on viimeisin vuosi, jolta on saatavilla luetettavaa tietoa kansallisista uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuuksista. Jotta tavoitteiden laskeminen olisi kaikissa maissa yhtenäistä kai-

kille energialähteille, direktiivi säättää jokaiselle uusiutuvalle energialähteelle omat kasvu-huonekaasupäästöjen laskentakaavat. Myös energian säästöt ovat huomioituna näissä laskentakaavoissa.

Jotta tavoitteisiin päästäisiin, tulee jäsenvaltion raportoida tehdyistä ja suunnitteilla olevista energiamuutoksista Euroopan unionille vähintään kahden vuoden välein. (2009/28/EY, 22 artikla) Tällöin Euroopan komissio voi pitää huolta, että kaikki EU:n jäsenvaltiot pääsevät tavoitteisiinsa. Raportissa jäsenvaltioiden on pystyttävä todistamaan uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön, lämmityksen ja jäähdytyksen alkuperätakuu. Alkuperätakuu takaa että tuotettu energia on peräisin uusiutuvista energialähteistä ja samaa lähdettä ei ole laskettu useampaan kertaan. (2009/28/EY, 15 artikla)

4.2.2 Industrial emission direktiivin säädökset

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU (IE-direktiivi) on teollisuuden päästädirektiivi, jonka tavoitteena on suojella ympäristöä ja terveyttä. IE-direktiivi:n avulla säädellään teollisuuslaitosten ympäristövaikutuksia ympäristölupien avulla. Tämä direktiivi yhdistää useita aiempia teollisuuden päästöjä sääteleviä direktiivejä yhdeksi kokonaisuudeksi. IPPC – direktiivin, suuria polttolaitoksia (LCP) koskevan direktiivin, jätteenpolttodirektiivin (WID), teollisuus- VOC –direktiivin sekä titaanidioksiditeollisuutta koskevia direktiivejä. Direktiivin myötä yleiseurooppalaisten BAT – vertailuasiakirjojen rooli vahvistuu ja päätökset BAT – päätelmistä ovat keskeisessä asemassa päätettäessä ympäristölupien päästöraja-arvoista ja lupaehtojen tarkistamisesta. Komissio pyrkii saattamaan BAT - vertailuasiakirjat ajan tasalle viimeistään kahdeksan vuoden kuluttua edellisen version julkaisemisesta. IE-direktiivi tiukentaa myös mm suurten polttolaitosten SO₂- ja NO_x – päästöjen raja-arvoja. (2010/75/EU, Liite I, V; Teknologia teollisuus 2011.)

Direktiivi astui voimaan 6.1.2011 ja se tulee saattaa osaksi EU-maiden kansallista lainsäädäntöä kahden vuoden kuluessa sen hyväksymisestä, eli viimeistään 6.1.2013. IE-direktiivin 32 artiklan mukaan jäsenvaltiot voivat laatia ja toteuttaa 1.1.2016–30.6.2020 välisenä aikana kansallisen siirtymäsuunnitelman polttolaitoksille, jotka ovat hakeneet tai joille on myönnetty lupa ennen 27.11.2002 ja niiden toiminta on käynnistynyt viimeistään 27.11.2003. Tarkkoja muotoja Suomeen tulevista säädöksistä ja viranomaiskantoja lain

tulkinnasta ei siis vielä ole saatavilla. Tämä direktiivi koskee polttolaitoksia, joiden kokonaislämpöteho on vähintään 50 MW. (2010/75/EU, 28 artikla; Koivunen K, Salamäki J. 2011, 2; Teknologia teollisuus 2011.) Direktiivin uudet päästöraja-arvot tulisivat voimaan vuonna 2016. Tämän jälkeen päästöjen tulisi olla rajojen alapuolella, mikäli laitos ei käytä joustoelementtejä.

IE-direktiivi sisältää joitain joustoelementtejä. Vähän käyville laitoksille, jotka sitoutuvat alle 1 500 h/a käyntiaikaan, on asetettu tiettyjä lievennyksiä SO₂ ja NO_x päästöjen osalta. Toinen joustoelementti koskee laitoksia, jotka sitoutuvat 17 500 käyttötuntiin vuosina 2016–2023. Näiden laitosten on mahdollista jatkaa nykyisillä LCP-rajoilla vuoteen 2023, jonka jälkeen laitosten tulisi poistua käytöstä. Kyseistä joustoelementtiä hyödyntäessä, polttolaitoksen toiminnanharjoittaja tulee ilmoittaa tästä viranomaiselle 1.1.2014 mennessä. Kolmas joustoelementti koskee pieniä ja keskikokoisia kaukolämpölaitoksia (polttoainetehto alle 200 MW), jotka voisivat jatkaa nykyisillä rajoilla vuoden 2023 loppuun. Näitä lievennyksiä voivat hyödyntää laitokset, jotka ovat hakeneet tai joille on myönnetty lupa ennen 27.11.2002 ja niiden toiminta on käynnistynyt viimeistään 27.11.2003. (2010/75/EU, 33 ja 35 artikla; Koivunen K, Salamäki J. 2011, 5; Pöry 2010a, 5.)

2010/75/EU direktiivin 29. artiklassa käsitellään yhdistämissääntöä tai niin sanottua piipputulkintaa. Jos kahden tai useamman erillisen polttolaitoksen savukaasut johdetaan yhteiseen piippuun, tulkitaan tämä yhdeksi polttolaitokseksi ja näiden kapasiteetit lasketaan yhteen määrittäessä yksikön tehoa. Laitoksen summatehoa laskettaessa alle 15 MW:n yksiköitä ei huomioida. Yhteisessä ulkopiipussa olevien sisäpiippujen katsotaan myös olevan samaa piippua. Vaikka laitoksen savukaasuja ei johdettaisikaan samaan piippuun, mutta sille on myönnetty lupa 1.7.1987 tai sen jälkeen ja katsotaan että laitoksen voitaisiin teknis-taloudellisesti johtaa samaan piippuun, katsotaan nämä laitokset yhdeksi polttolaitokseksi ja niiden kapasiteetit lasketaan yhteen. Yhteenlaskettu summateho määrää yksiköiden päästörajakategorian. Piipputulkinta hankaloittaa joustoelementtejä hyödyntävän käyttötuntien laskentaa ja rajoittaa käytettäviä tunteja. Käyntiaikajoustoja hyödyntävien laitosten osalta yhdenkin yksikön tunnin mittainen käyttö kuluttaisi käyttötunnin kaikilta jouston piirissä olevilta yksiköiltä, myös pysähdyksissä olevilta yksiköiltä. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 3; Pöry 2010a, 6.)

IE-direktiivin pääsääntönä savukaasujen puhdistukselle on BAT –päästötasojen käyttäminen sitovina normeina, josta voidaan erityistapauksessa poiketa. Näille poikkeavuuksille on kuitenkin esitetty niin sanotut minimivaatimukset päästörajoille, jota korkeampia lupamääräyksiä viranomaisen ei voi antaa. Nämä minimivaatimuksetkin ovat nykyistä LCP-rajoja tiukemmat. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 3)

Monipolttoainelaitoksilla kahta tai useampaa polttoainetta samanaikaisesti käyttävän laitoksen päästörajat lasketaan painottamalla polttoainekohtaisia päästörajoja kunkin polttoaineen lämpöteholla ja jakamalla summa kaikkien polttoaineiden lämpötehojen summalla. (2010/75/EU, 40 artikla; Koivunen K, Salamäki J. 2011, 5)

Raja-arvoja katsotaan noudatettavan, jos yksikään vahvistettu kuukausittainen keskiarvo ei ylitä raja-arvoa, vahvistettu päiväkohtainen keskiarvo ei ole yli 110 % raja-arvosta ja 95 % kaikista vuoden aikana vahvistetuista tuntikohtaisista keskiarvioista ei ole yli 200 % raja-arvoista. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 5) Savukaasujen raja-arvoja tulee tarkkailla jatkuvasti kaikissa lämpötehoiltaan yli 100 MW:n polttolaitoksilla, sekä CO -pitoisuuksia kaikissa lämpötehoiltaan yli 100 MW:n kaasumaisissa polttoaineita käyttävissä laitoksissa. Viranomaisen voi päättää, ettei jatkuvia mittauksia edellytetä:

- jos polttolaitoksen jäljellä oleva käyttöikä on alle 10 000 tuntia,
- maakaasua käyttävistä laitoksista peräisin oleva SO₂:n ja hiukkasten osalta
- tunnetun rikkipitoisuuden omaavilta öljyä polttavilta laitoksilta peräisin olevan SO₂:n osalta, jos laitoksella ei ole savukaasun rikinpoistolaitteistoa. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 7)

4.2.3 Jätelaki

Euroopan unionin neuvosto on säätänyt direktiivin 1999/31/EY kaatopaikoista. Direktiivin tarkoituksena on ehkäistä tai vähentää kaatopaikalle ohjautuvaa jätettä. Neuvosto katsoo, että saastuttaja maksaa –periaatteen mukaisesti on tarpeen muun muassa ottaa huomioon kaatopaikan mahdollisesti aiheuttamat ympäristövahingot. Näiden mahdollisesti aiheuttavien ympäristövahinkojen ehkäisemisen pohjalta direktiivin 10 §:n mukaan jäsenvaltioiden on varmistuttava että kaatopaikan pitäjiä perimä hinta kaiken tyyppisten jätteiden sijoit-

tamisesta kyseiselle kaatopaikalle kattaa kaatopaikan perustamiseen ja toimintaan liittyvät kustannukset.

Suomen jätelain (646/2011) 20 ja 21 §:n mukaan jätteen alkuperäinen tuottaja taikka nykyinen aiempi jätteen haltija vastaa jätehuollon kustannuksista, joihin kuuluvat muun muassa jätteen loppukäsittelyn kustannukset. Loppukäsittelykustannuksista perittävään maksuun on sisällytettävä loppukäsittelylaitoksen tai –paikan perustamisen, käytön, käytöstä poistamisen, jälkihoidon ja ympäristösuojelulain 43 a §:ssä tarkoitetun vakuuden kustannukset sekä muut niihin rinnastettavat kustannukset. Jätteiden loppukäsittelystä kaatopaikalla perittävään maksuun on sisällytettävä jälkihoidon arvioidut kustannukset vähintään 30 vuoden ajalta.

Suomeen on jätteen ehkäisemiseksi asetettu uusi jäteverolaki (1126/2010), joka astui voimaan 1.1.2011. Uudessa jäteverolaissa veloitetaan maksamaan jäteveroa muun muassa voimalaitoksissa savukaasun rikinpoistossa syntyvistä lietemäisistä kalsiumpohjaisista reaktiojätteistä. Jäteveron 5 §:n mukaan suoritettava 40 euroa tonnilta jätettä, joka toimitetaan kaatopaikalle ennen 1.1.2013 jonka jälkeen jätevero on 50 euroa tonnilta jätettä.

Suomen jätelaki sekä jäteverolaki velvoittavat ja kannustavat jätteen vähentämiseen. Tästä syystä polttoaineen tuhkan kierrätykseen ja hyötykäyttöä tulee panostaa. Tuhkan sekä rikinpoiston lopputuotteiden väheneminen ja hyötykäyttö pienentää vuosikustannuksia.

4.2.4 Oletettavat muutokset uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotukeen

Teknologian tutkimuskeskus VTT:n laatiman selvityksen kivihiilen korvaamisesta biomassilla yhteistuotannon pölypolttolaitoksissa mukaan, kivihiilen korvaamiseen uusiutuvilla energialähteillä tarvitaan lisää tukea. (Flyktman M. et al. 2011) Tämän johdosta Työ- ja elinkeinoministeriö on ryhtynyt valmistelemaan hallituksen esitystä eduskunnalle lain muutosta uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. (TEM/2933/03.01.01/2011, 1, 8.)

Lakiesitystä ei ole vielä esitelty eduskunnalle, vaan kyseessä on työ- ja elinkeinoministeriön laatima luonnos hallituksen esityksestä. Lähde on epävirallinen tiedote Työ- ja elinkeinoministeriön pitämästä tiedotustilaisuudesta yrityksille 22.11.2011.

Valmistelussa olevan lain olisi tarkoitus tulla voimaan 1.1.2013. Uuteen lakiin uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön tuotantotukeen on harkittu muun muassa seuraavia lisäyksiä;

- Metsäjalostevoimala lisättäisiin 5 §:n määritelmiin. Metsäjalostevoimalalla tarkoitettaisiin voimalaitosta, jossa tuotetaan sähköä metsäjalosteilla kivihiilipölypolttokattiloissa.
- Metsäjalostevoimalat lisättäisiin 6 §:n syöttötariffijärjestelmään ja sitä ei rajoitaisi enimmäiskapasiteetti.
- 8 § lisättäisi metsähakevoimalan hyväksymisen erityiset edellytykset, jossa määriteltäisiin että metsähakevoimaloiksi ei hyväksyttäisi voimalaitosta, joka kuuluu tai on kuulunut syöttötariffijärjestelmään. Voimalaitos voisi olla samanaikaisesti syöttötariffijärjestelmässä metsähakevoimalana ja metsäjalostevoimalana. Metsäjalostevoimala voitaisiin hyväksyä syöttötariffijärjestelmään vain, jos sen generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho on vähintään 60 MVA.
- Metsäjalostevoimalalla olisi oikeus syöttötariffiin 16 § mukaan jos metsäjalosteilla tuotettuun tukeen oikeutettua sähköä on tuotettu vähintään 37,5 GWh tariffikaudella. Tämä tarkoittaisi 17,4 MW sähkön tuotantoa. Tariffikausi on yhtä pitkä kuin tämänhetkisessä tuotantotuessa kappaleessa 4.1.1, eli 3 kk.
- Metsähakkeen syöttötariffi voisi laskea 25 § 3 momentin mukaan kaavasta (2), missä tulos saataisiin €/MWh.

$$11,5 - \frac{11,5}{8} \cdot (P_e - 10) \quad (2)$$

missä, P_e on päästöoikeuden kolmen kuukauden keskiarvohinta. Syöttötariffia maksettaisiin enintään 11,5 €/MWh päästöoikeuden hinnoilla 0–10 €/t_{CO2}. ja syöttötariffia ei enää maksettaisi kun päästöoikeuden hinta on noussut 18 €/t_{CO2}. Tätä syöttötariffi kaavaa sovellettaisiin vuodesta 2015 eteenpäin.

- Metsäjalosteelle syöttötariffi laskettaisi 15 §:n 4 momentin mukaan, jonka voidaan nähdä kaavasta (3)

missä P_e on päästöoikeuden kolmen kuukauden keskiarvohinta. Syöttötariffia maksettaisiin enintään 13 €/MWh päästöoikeuden hinnoilla 0–10 €/t_{CO2} ja syöttötariffia ei enää maksettaisi, kun päästöoikeuden hinta on noussut 19,5 €/t_{CO2}.

5 PÖLYPOLTTOKATTILAN TEKNILLISET OMINAISUUDET BIOPOLTTOAINEEN RINNAKKASIPOLTOSSA

RES-direktiivin asettama tavoite uusiutuvan energian osuudesta Suomelle on 38 % energian loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Yksi potentiaalinen vaihtoehto päästä tähän tavoitteeseen on muuntaa hiilipölykattiloita monipolttoainekattiloiksi. Tämä investointi saattaa olla yritystenkin kannalta kannattava, koska biomassalla tuotetusta energiasta ei tarvitse maksaa hiilidioksidipäästömaksuja eikä hiilen kaukolämpövero. Investointiin sitoutumalla yritys voi saada myös valtiolta tukia, jotka parantavat biopolttoaineiden kilpailukykyä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. (Flyktman M. et al. 2011, 5.) Suoran polttotekniikan lisäksi biomassaa on mahdollista polttaa epäsuorasti ja rinnakkaisella polttolaitoksella.

Kivihiihi voidaan korvata lämmön- ja sähkön yhteistuotantolaitosten pölypolttokattiloissa erityyppisillä biomassoilla ja niistä valmistetuilla jalosteilla. Pääkaupunkiseutu on hyvin tiiviisti asutettu, jolloin jalostamattoman biomassan saanti on vaikeaa. Jalostettu biomassa on energiatehokkaampaa polttoainetta, jolloin niiden kuljetuskustannukset ovat alhaisemmat. Tällaisia jalostettuja biopolttoaineita ovat pelletti, bioöljy, biohiili ja bio-SNG. (Flyktman M. et al. 2011, 24) Tässä työssä keskitytään viiteen kappaleessa 3 esiteltyyn biopolttoaineeseen; sahanpuruun, pellettiin, torrefioituun biohiileen, hakkeeseen ja bio-SNG:hen. Bioöljy on jätetty tarkastelusta pois, koska bioöljyn tilanne on hyvin samankaltainen torrefioitun biohiilen kanssa. Bioöljyä on vapailla markkinoilla erittäin vähän, jolloin hankinta tulisi perustua omaan tuotantoon. Bioöljy vaatii myös enemmän laitospotkoksia muutoksia ja sen tuotantokustannukset ovat suuremmat kuin torrefioitulla biohiilellä. (Vision Hunters, 2011, 43, 78, 82.)

Biopolttoaineen käytössä tulee ottaa huomioon mahdolliset muutokset prosessissa. Biohiilen käyttö vaatii vähiten muutoksia kattilaan. Edullisimman (€/MWh) polttoaineen tai polttoainesekoituksen käyttö ei välttämättä takaa taloudellisesti kannattavinta polttoainetta, mikäli sen käytettävyyden ei ole hyvä. Vaikka biopolttoaineen käytettävyyden ei ole yhtä hyvä kuin hiilellä, voi käytettävyyden kulut kompensoitua polttoaineiden ja päästöoikeuksien hinnoilla. Kulujen kompensoituminen on riippuvainen käytettyjen biopolttoaineiden ominaisuuksista, käyttösuuksista sekä käyttökohteesta. Biopolttoaineiden muuttuvien kustan-

nuksien osuus kivihiilikattiloissa laitoksen kokonaiskäyttökustannuksista ovat tyypillisesti 1–5 %. (Flyktman M. et al. 2011, 41)

5.1 Hiilivoimalaitoksen teknilliset rajoitteet biopolttoaineen rinnakkaispoltossa

Kappaleessa 2 on kuvattu Martinlaakso 2:sta, joka on tyypillinen hiilipölypolttovoimalaitos. Tässä kappaleessa käydään läpi hiilivoimalaitoksen rajoittavia tekijöitä biopolttoaineen rinnakkaispoltossa.

5.1.1 Kuljetukseen ja varastointiin liittyvät rajoitteet

Biopolttoaine sisältää yleensä runsaasti kosteutta. Suuren kosteuspitoisuuden johdosta polttoaineen kuljetuskustannukset rajoittavat polttoaineen hankintaa. Kostean biopolttoaineen, kuten sahanpurun ja hakkeen, kustannustehokkaana kuljetusetäisyytenä pidetään 150–200 km. Kuivattua biopolttoainetta kuten pellettiä ja torrefioitua biohiiltä voidaan korkeamman energiatiheyden ansiosta tuoda kauempaakin.

Kuljetusetäisyydet rajoittavat myös saatavuutta. Pääkaupunkiseudun läheisyydestä on hyvin vaikea saada suuria määriä biopolttoainetta. Saatavuutta rajoittaa, myös muiden biopolttoainetta käyttävien teollisuuslaitosten tarpeet ja maksukyky: esimerkiksi sellutehtaiden hakkeenmaksukyky, joka on 23 €/MWh.

Hiiltä varastoidaan yleensä hiilikentällä, josta se lastataan kuljettimia pitkin siloihin. Biopolttoaineen varastointi saattaa aiheuttaa ongelmia, koska voimalaitosalueen tilat ovat yleensä hyvin täynnä. (Flyktman M. et al. 2011, 41, 42) Kaikki biopolttoaineet eivät voi olla ilman suojaa, vaan tarvitsevat katoksen tai siilon. Lisäksi biopolttoaineet vievät huomattavasti enemmän tilaa varastoalueella pienemmän energiasisältönsä vuoksi. Jos voimalaitoksen läheisyydessä ei ole tarpeeksi tilaa, voidaan varastointi järjestää välivarastona. Välivarastosta tuotaisiin polttoainetta pieniä määriä voimalaitosalueella olevaan pieneen puskurivarastoon, joka olisi tarpeeksi iso riittämään suurten juhlapyhien yli jolloin ympäristöluvut eivät salli polttoaineen kuljetusta.

5.1.2 Polttoaineen kuljettimiin liittyvät rajoitteet

Kuljettimien ja siilojen kapasiteetti tulee selvittää sekä varmistaa ettei kevyt ja kokoonpuristuva polttoaine holvaannu kuljettimiin ja siloihin. Myös laitoksen polttoainekentän, murskauksen ja syöttölinjojen kapasiteetti voivat rajoittaa polttoaineensyöttöä. (Flyktman M. et al. 2011, 41)

Polttoainevirta tulee olla mahdollisimman homogeeninen. Tällöin on valittava sekoitetaan-ko biopolttoaine hiilen sekaan jo kuljettimilla, vai rakennetaan-ko biopolttoaineelle oma linjasto, josta voidaan annostella biopolttoainetta tasaisena virtana kattilaan. (Flyktman M. et al. 2011, 41)

5.1.3 Hiilimyllyihin ja syöttöilmapuhaltimiin liittyvät rajoitteet

Hiilimyllyjen kapasiteetti voi aiheuttaa ongelmia. Sitkeät biopolttoaineet jauhautuvat huommin kuin hiili. Tällöin on mahdollista investoida biopolttoaineille paremmin soveltuviin vasaramyllyihin tai mikro-myllyihin. Jos biopolttoainetta jauhetaan tavallisilla hiilimyllyillä, voi partikkelikokokin jäädä normaalia suuremmaksi. Kokoonpuristuva biopolttoaine saattaa holvaantua hiilimyllyjen jauhinrenkaisiin muodostaen liukupinnan. Liukupinta vähentää kitkaa, jolloin hiilimyllyjen kuulat eivät pyöri vaan liukuvat. Tällöin jauhettavuus huononee ja mylly täytyy ajaa alas liukupinnan poiston ajaksi. Pahimmassa tapauksessa koko kattilalaitos täytyy ajaa alas holvaantumisen johdosta. Biopolttoaineen pneumaattinen siirtyminen myllyiltä kattilaan voi myös tuottaa ongelmia. (Flyktman M. et al. 2011, 41, 42) Suuren haihtuvien aineiden määrän ansiosta biomassalla on huomattavasti pienempi syttymispiste. Haihtuvat aineet irtautuvat biomassasta jo 180 °C:ssa, jolloin ne voivat aiheuttaa räjähdysvaaran päästessään kosketuksiin kuumen primääri-ilman kanssa. (Livingston W. R. 2011, 7.) Polttoaineen syöttöilmakapasiteetti voi aiheuttaa myös ongelmia. Koska materiaalivirta lisääntyy biopolttoaineen alemman lämpöarvon johdosta, jolloin syöttöilmapuhaltimien kapasiteetti voi jäädä liian pieneksi. (Vuoro 4. 2012.)

5.1.4 Kattilaan liittyvät rajoitteet

Kattilan toiminnoissa voi tulla erilaisia ongelmia. Biopolttoaineet sisältävät yleensä paljon kosteutta, joka on suoraan verrannollinen kattilantehoon. Osa tehosta siirtyy veden höyrystämiseen polttoaineessa. Kosteuden takia suurentunut savukaasuvirta heikentää myös kattilantehoa. Huonolaatuisen tai epätasalaatuisen polttoaineen käyttöongelmat voivat johtaa kattilan suunnittelemattomaan alasajoon. Likaantuminen tulistimessa ja kattilassa aiheuttaa myös kattilatehohäviöitä ja vuosihuollon työmäärä kasvaa. Likaantuminen myös kasvattaa nuohousta, joka myös lisää veden osuutta savukaasussa ja tätä kautta vähentää kattilatehoa. (Flyktman M. et al. 2011, 41, 42)

Palamisprofiililla on suuri merkitys niin kattilan tehoihin kuin päästöihin. Polttimien tulee olla yhteensopivia käytetyn polttoaineen kanssa, jolloin poltto on tasaista, NO_x päästöt pysyvät kurissa eikä palamattoman hiilen määrä pääse kasvamaan. Palamisprofiililla on myös vaikutusta tuhkan käyttäytymiseen. Jotta tuhka pysyisi suunnitelluilla lämpötila-alueilla, on huolehdittava, että palaminen on tasaista. (Flyktman M. et al. 2011, 41, 42)

Kattilamateriaali tulee huomioida uuden polttoaineen käyttöönotossa. Biopolttoaineseokset voivat lisätä korroosion ja eroosion ongelmia. Uusien polttoaineseosten myötä likakerrostumien aiheuttamat korroosioriskit eliminoidaan ja lisääntyneen nuohoustarpeen mahdolliset eroosiot tulee huomioida.

Biopolttoaineen rinnakkaispoltto ei automaattisesti tarkoita kattilan hyötysuhteen merkittävää pienenemistä. Metso Oyj on suunnitellut kaasutuslaitoksen, joka käyttää 30 % kosteuspiitoisuuden omaavaa haketta, jolloin kattilan kokonaishyötysuhde alenee vain 0,3-0,5 %. (Isaksson J. 2012.)

Polttoaineen lämpösäteilyllä on merkitystä kattilan hyötysuhteeseen. Kiinteiden polttoaineiden poltossa syntyy pieniä nokihiukkasia ja tuhkapartikkeleita, jotka saavat aikaan liekin voimakkaan säteilyn toisin kuin kaasumaisten polttoaineiden poltossa. Kaasumaisissa polttoaineissa merkittävimmät säteilyn tuottajat ovat hiilidioksidi ja vesihöyry, joiden säteilylämmönsiirtokyky on huomattavasti heikompi. Kaasumaisten polttoaineiden merkittävin lämmönsiirtomekanismi on konvektion. Tämän takia suurempia kaasumääriä tulisi polttaa alemmalla poltintasolla kuin kiinteiden partikkeleiden poltto. Tällöin kaasua luovut-

taa konvektion kautta lämpöenergiaa kiinteille partikkeleille, jotka säteilevät sen eteenpäin kattilapinnoille. Käyttökokemus on osoittanut, että tällöin myös kiinteiden polttoaineiden palamattomien hiukkasten määrä on vähentynyt. (Karjalainen P. 2012; Raiko R. et al. 2002, 107–109.)

5.1.5 Rikinpöistölaitokseen liittyvät rajoitteet

Rikinpöistölaitoksen optimipöistölämpötila riippuu polttoaineen rikki- ja klooripitoisuudesta, sumutettavan lietteen kiintoainepitoisuudesta sekä kosteudesta. Kosteus parantaa kalkin reagointia, mutta hidastaa sumutetun lietteen kuivumista. Vähärikkisillä hiililaaduilta ($< 0,8$ % kuiva-aineesta) lämpötilan nouseminen alueella $70\text{--}84$ °C ei vaikuta yhtä voimakkaasti kalkinkäyttösuhteeseen kuin korkearikkisillä hiilillä (> 1 % kuiva-aineesta). Korkearikkisillä hiilillä kalkinkäyttö kasvaa lämpötilan noustessa yli 75 °C. Rikkipitoisuuden kasvaessa myös kalkin kulutus lisääntyy enemmän suhteessa erotettavaan rikin määrään. Tällöin lopputuotteen vapaan kalkin määrä kasvaa ja kalkin käytön hyötysuhde pienenee. Pienillä rikkipitoisuuksilla todellinen kalkin käyttösuhte on hyvä ja vastaa lähes teoreettisia arvoja. (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 54.) Saman voidaan olettaa pätevän biopolttoaineisiin.

Kloorin läsnäolo vaikuttaa myös olennaisesti kalkinkäyttötarpeeseen. Polttoaineesta peräisin oleva kloori esiintyy lopputuotteessa kalsiumkloridina (CaCl_2), joka nostaa pölyn kosteutta ja parantaa prosessin toimintaa alentaen kalkin kulutusta. Tämä johtuu kalsiumkloridin hygroskooppisuudesta, jolloin rikin sidonnan märkäfaasin kesto aika pitenee klooripitoisuuden kasvaessa ja rikin sidontareaktiot ovat tehokkaammat ja nopeammat. Prosessiin lisätyn suolaveden kloori esiintyy lähinnä natriumkloridina (NaCl), joka lisää prosessin klooripitoisuutta, mutta sen vaikutus ei ole yhtä merkittävä. Liian pieni klooripitoisuus lisää kalkinkäyttötarvetta ja liian suuri klooripitoisuus kasvattaa lopputuotteen klooripitoisuutta, jolloin lopputuote muuttuu kosteammaksi ja vaikeammin käsiteltäväksi. Samalla pölyn kerrostumariskit sekä lisäkosteuden ja kloorin aiheuttamat korroosioriskit kasvavat. Tästä johtuen lopputuotteen klooripitoisuuden suositusarvona on pidetty alle 5 %. Sääto tapahtuu nostamalla reaktorin jälkeistä lämpötilaa, jolloin rikin reaktiot huononevat ja kalkin kulutus kasvaa. Samalla lopputuotteen vapaan kalkin määrä lisääntyy. (Mansner T. 2012; Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 7, 54; Vuoro 5, 2012.) Vähäklooripitoisilla poltto-

aineilla klooria voidaan lisätä reaktoriin ruokasuolana tai kalsiumkloridina, jolloin lopputuotteen klooripitoisuus kasvaa. Lopputuotteen optimaalinen klooripitoisuus on 2-3 %. Yleisesti laitosten käyttöohjeissa suositellaan, että mikäli lopputuotteen klooripitoisuus nousee yli 4-5 % tai kosteus nousee yli 3 %, on reaktorin loppulämpötilaa nostettava n. 5 °C. (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 57, 59.)

Kosteuden lisääntyessä täytyy nostaa rikinpoistolaitoksen poistolämpötilaa, jotta välttyttäisiin veden kondensoitumiselta ja korroosiolta rikinpoiston jälkeen. Kosteuden lisääntyessä kasvaa myös riski siitä, että lietepisarat eivät ehdi kuivaa, vaan aiheuttavat pölyn kostumisesta ja tarttumista reaktorin seinille. Reaktoriin tuleva kosteus on peräisin savukaasun vesihöyrystä ja sumutetun lietteen vedestä. Liian suuri kosteus aiheuttaa myös ongelmia pölynkäsittelyssä ja jälkierottimissa, eli letkusuodattimissa. (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 49.) Kosteuden lisäämä merkittävin riski on korroosion lisääntyminen. SO_3 reagoi erittäin nopeasti kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), eli sammutetun kalkin kanssa, joten savukaasuissa ei esiinny happokastepistettä rikinpoiston jälkeen. Kosteus- ja korroosiomielessä puhutaankin savukaasujen vesikastepisteestä ja märkälämpötilasta. Kosteus nostaa lopputuotteen kosteuspitoisuutta ja koska lopputuote sisältää aina klooria pistekorroosion riski lisääntyy. (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 59.)

Riionheimo Y.:n ja Uomala P.:n (1995, 60) mukaan savukaasun suhteellinen kosteus ei missään vaiheessa saisi ylittää 40 %. Liitteessä 5 kuvasta 39 nähdään tuloksia Tanskassa Studstrup:in laitoksessa tehdystä tutkimuksesta, jossa tutkittiin suhteellisen kosteuden vaikutusta lopputuotteen aiheuttamaan korroosioon. Tuloksista nähdään selvästi, että savukaasujen suhteellisen kosteuden noustessa yli 40 %:n lisääntyy materiaalin Fe 37 korroosionopeus erittäin nopeasti. Lisäksi tutkimuksessa on todettu, että korroosioriski on suurempi jälkierottimien jälkeisissä komponenteissa, joissa pölymäärät ovat pieniä, kuten savupii-pussa. Tämä johtuu jälkierottimien jälkeisestä vähäisestä pölymäärästä, joka vähentää pölykerrostumien vaihtuvuutta, jolloin pölyn sisältämällä kloorilla on runsaasti aikaa diffu-soitua pölykerroksen läpi perusmateriaaliin, mikä lisää korroosioriskiä. Ennen jälkierottimia pölyn vaihtuvuus on suurta ja siellä on runsaasti vapaata alkalista kalkkia, jolloin korroosiota ei synny edellyttäen, että muita kosteusongelmia ei esiinny ja pöly on kuivaa.

Kattilan nuohouksen yhteydessä savukaasujen suhteellinen kosteus kasvaa. Tällöin kasvaa myös savukaasun märkälämpötila ja 40 %:n suhteellisen kosteuden lämpötila. Tästä syystä

rikinpoistolaitoksen loppulämpötilaa voidaan joutua nostamaan muutamia asteita nuohouksen ajaksi. Jos rikinpoistolaitoksen loppulämpötila on jo valmiiksi tarpeeksi korkea, ei lämpötilan nostamiseen ole tarvetta. Tavallisessa ajossa kivihiilellä tämä lämpötilaraja on noin 75 °C:ssa. (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 60.)

Reaktoriin syötettävän sumutetun lietteen tilavuusvirta määräytyy sen perusteella, että lietteessä oleva Ca(OH)_2 :n kiintoainemäärä riittää rikin reaktioihin. Kaikki ylimääräinen vesi pienentää reaktoriin sumutettavan lietteen kiintoainepitoisuutta, vaikeuttaa pisaroiden kuivumista ja pienentää kierrätettävän kiintoaineen määrää lisäten kalkin kulutusta. Lietteiden kiintoainepitoisuus tulee optimoida, jotta lietepisara ehtii reagoida rikin kanssa ja kuivua ennen reaktioseinän koskettamista. Tämän johdosta kalkkimaitoon lisätään kiertopölylietettä. Kiertopölyliete lisää kalkkimaidon kiintoainepitoisuutta, jolloin se kuivuu nopeammin. Mitä vähemmän pisarassa on kiintoainetta, sitä kauemmin se kuivuu. Kaikkein vaikeimmin haihdutettavissa on puhdas vesipisara. (Mansner T. 2012; Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 48, 50; Vuoro 5, 2012.) Kosteammalla savukaasulla rikinpoiston reaktiot nopeutuvat ja lietteen kuivuminen hidastuu. Jos reaktorissa on liikaa kosteutta liian alhaisessa lämpötilassa kalsiumsulfidi (CaSO_3) ja CaSO_4 reagoi veden kanssa ja muodostaen kosteaa kipsiä joka kuivuessaan kiinnittyy reaktorin seinämiin. Näitä kerrostumia on hyvin vaikea saada irrotettua myöhemmässä vaiheessa. (Mansner T. 2012; Vuoro 5, 2012.)

Sumutetun lietteen kiintoainepitoisuudella on merkitystä myös savukaasun kosteuteen. Alhainen kiintoainepitoisuus lisää reaktorin kostumisriskiä merkittävästi. Sumutetun lietteen kiintoainepitoisuuden ollessa alle 30 %, ei reaktorilla tulisi ajaa poistolämpötilaa alle 75 °C:een. (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 6.)

5.1.6 Savukaasupuhaltimiin liittyvät rajoitteet

Tarvittavan savukaasupuhaltimen kapasiteetin kasvaminen voi olla myös rajoittava tekijä biopolttoaineen käytössä. Savukaasuntilavuusvirran kasvaessa savukaasupuhaltimen täytyy luoda kovempi alipaine savukaasukanavaan. (Flyktman M. et al. 2011, 41, 42) Savukaasumäärän kasvaessa kasvaa savukaasun virtausnopeus. Virtausnopeuden kasvaessa letkusuodattimien aiheuttama paine-ero kasvaa yhden suhde potenssiin kaksi. Tämä tarkoittaa, että savukaasupuhaltimen tekemä paine-ero letkusuodattimissa kasvaa eksponentiaali-

sesti verrattuna virtausnopeuteen. Tästä syystä on hyvin tärkeää pitää savukaasumäärät mahdollisimman vakiona, esimerkiksi kuivaamalla biopolttoaine ennen kattilaa. (Karjalainen P. 2012; Mansner T. 2012.)

5.2 Tuhkan huomioiminen pölypoltossa

Biopolttoaineen tuhalla on erilainen koostumus kuin kivihiilen tuhalla. Tämä tulee huomioida, jotta välttyttäisiin liialliselta kuonaantumiselta ja korroosiolta. Biopolttoaineen tuhka sisältää huomattavasti enemmän alkali- ja maa-alkalimetalleja. Tosin biopolttoaine sisältää myös huomattavasti vähemmän tuhkaa kuin kivihiili.

5.2.1 Tuhkan käyttäytyminen pölypoltossa

Pölypoltossa on tyypillisesti kaksi tuhkan kokofraktiota. 10–100 µm kokoiset suuremmat hiukkaset ovat peräisin polttoaineesta olevista mineraalisulkeutumista. Kyseiset hiukkaset koostuvat lähinnä erityyppisistä silikaateista, kuten alumiini-, rauta- ja kalsiumsilikaateista ja ne muodostuvat pääasiassa koksen palamisen yhteydessä. Toinen tyypillinen fraktio on alle 1 µm kokoiset hiukkaset, jotka ovat peräisin polttoaineen orgaaniseen rakenteeseen kuuluneesta, tai polttoaineen höyrystyneestä, tuhkaa muodostaneesta ainesosasta. Kyseiset hiukkaset ovat vapautuneet joko pyrolyysin aikana tai höyrystyneen koksen palaessa. Tämän fraktion tyypillisiä alkuaineita ovat natrium, kalium, kalsium, magnesium, rikki ja kloori. Pölypolton ominaispiirre tuhkan muodostumisen kannalta on korkea palamislämpötila, joka edistää sekä mineraalien höyrystymistä että niiden välisiä reaktioita. Korkea palamislämpötila mahdollistaa myös muodostuneiden tuhka-hiukkasten sulamisen. Toinen ominaispiirre pölypoltolle on tuhkan lähes täydellinen siirtyminen savukaasujen mukana savukaasukanavaan (lentotuhka). Tulipesän pohjalle kerääntyy yleensä vain 10 % tuhkasta. (Raiko R. et al. 2002, 285.)

Yleisin kuonaantumisen syy on tuhkan osittainen sulaminen. Kattilan säteilyosassa vaikeita kerrostumia aiheuttavat erityisesti silikaattisulat: pii, alumiini ja kalium, jotka esiintyvät hiilessä tai turpeessa erillisinä savimineraaleina. Näillä silikaattihiukkasilla on korkea sulamislämpötila. Hiukkaset ovat yleensä 10–100 µm luokkaa ja ne kulkeutuvat pinnoille

iskeytymällä ja muodostavat savukaasuvirtausta kohti oleville pinnoille harjannemaisia kerrostumia. Alkalimetallit, natrium ja kalium vaikuttavat silikaattisulaan kahdella tavalla. Ne alentavat sulan muodostumislämpötilaa ja muodostuneen sulan viskositeettia. Natriumin ja kaliumin aiheuttaa yhdessä piin kanssa vakavia kerrostumaongelmia hiilikattilassa. (Raiko R. et al. 2002, 285, 286.)

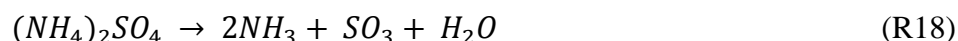
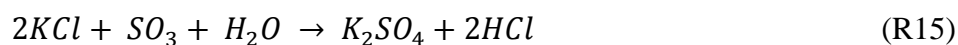
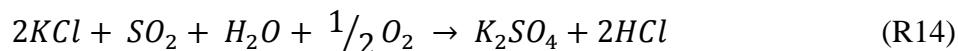
Polttoaineen rikki voi reagoida myös alkali- ja maa-alkalimetallien (Na, K, Ca, Mg) kanssa, joiden ensisulamispiste on noin 650 °C. Jos tuhka sisältää suuria määriä näitä sulfaatteja, kattilassa esiintyy kuonaantumista. Jos polttoaine sisältää myös klooria, tilanne paheenee. Natriumin ja kalsiumin sulfaatti- ja kloridiseoksien alin ensisulamispiste on 515 °C. Tulistimien pintalämpötila ylittää kyseisen lämpötilan useissa kattiloissa. Osittain sulanut alkalisulfaattien ja kloridien seos on erittäin syövyttävää, joka johtaa vakaviin korroosiovaurioihin. Hiilessä esiintyvä rauta (karbonaatti, pyriitti (FeS_2), savimineraalit) voi myös yhdistyä silikaattihiukkasiin ja pahentaa kuonaantumista, varsinkin pelkistävässä olosuhteissa. Tuhkan pyriitillä on myös kuonaantumista lisäävä vaikutus. Tämä on merkki myös keskeneräiseksi jääneestä hiilihiukkasen palamisprosessista. Tällöin osa polttoaineessa esiintyvistä raudasta hapettuu raudan oksideiksi ja osa jää pyriitiksi. Pyriitti-rautaoksidiseoksen ensisulamispiste on 680 °C. Seos lisää kuonaantumista kattilan tulipesässä. (Raiko R. et al. 2002, 286.)

Konvektiopinnoille muodostuvat pääosin ei-sulat kerrostumat kasvavat yleensä hitaammin kuin osittain sulassa tilassa olevat kuonakerrostumat. Näiden muodostuminen alkaa yleensä ohuella alkukerrostumalla. Kerääntyneet hiukkaset saavuttavat pinnan erityyppisillä diffuusiomekanismeilla tai muodostamalla kaasumaisia yhdisteitä kondensoitumalla pinnalle. Alkukerrostuman päälle takertuu muita hiukkasia, jotka ajan mittaan kasvavat voimakkaammin kiinni pintaan. Hidas kovettuminen on ominaista tämäntyyppisille kerrostumille. Kalsiumia ja rikkiä sisältävien polttoaineiden (ruskahiili) savukaasun rikkidioksidi sekä tuhkan kalsium reagoivat pinnoilla ja muodostavat kalsiumsulfaattia sisältäviä kerrostumia. (Raiko R. et al. 2002, 286, 287.)

5.2.2 Tuhkan korroosion ja kerrostumisen ehkäiseminen rinnakkaispoltossa

Kuten kappaleessa 3.2 todettiin, biopolttoaineet sisältävät paljon alkali- (Na ja K) ja maa-alkalimetalleja (Mg ja Ca). Biomassan poltossa suurin ongelma on korroosiota aiheuttavan kaliumkloridin (KCl) muodostuminen lämpöpinnoille. Kaliumia esiintyy pääasiassa kaliumkloridina ja kaliumhydroksidina (KOH). Alkalikloridin suuri pitoisuus savukaasuissa voi nopeuttaa tulistimien kuonaantumista ja suuri pitoisuus KCl:a ja NaCl:a kerrostumassa kiihdyttää tulistimen korroosiota. Kerrostumien muodostumista ja tulistimen korroosiota voi vähentää, joko rinnakkaispoltolla, tai käyttämällä lisäaineita poltettaessa paljon alkaleja ja klorideja sisältävää biomassaa. Tällöin alkaleille tapahtuu joko fyysinen kaappaus, jossa korroosiota aiheuttavat aineet fyysisesti kiinnittyvät sorbenttiin, tai kemiallinen kaappaus, missä korroosiota aiheuttavat aineet reagoivat lisäaineen kanssa ja muodostavat vähemmän korrodoivan komponentin. Hiili ja turve ovat hyviä rinnakkaispolttoaineita biomassan kanssa. Lisäaineet voivat kaapata alkalien (K) poltossa, kuten kaliumalumiinisilikaatti, jolloin estetään KCl:n muodostuminen. Luonnollista rikkiä tai muita rikki/sulfaatti yhdisteitä voidaan käyttää myös lisäaineina kuten ammoniumsulfaattia ((NH₄)₂SO₄). (Becidan M. et al. 2008, 595; Kassman H. et al. 2010, 1649.) Na:lla on olennainen vaikutus korroosioon vain suurilla Cl pitoisuuksilla. (Becidan M. et al. 2008, 599.)

Savukaasussa K esiintyy pääosin KCl:na ja KOH:na. Reaktiossa (R13) on esitetty KOH:n ja KCl:n tasapainoyhtälö. KOH:n osuus kaasuosuhteissa kasvaa kun lämpötila nousee, vesihöyryn (H₂O) osuus on suuri ja hydrokloridin (HCl) osuus on pieni. Kaasumaisten alkalien sulfaatioreaktiot tapahtuvat reaktioiden (R13)–(R18) mukaan. (Kassman H. et al. 2010, 1650.) Reaktioista nähdään kuinka sulfaatti sitoo kaliumin muodostaen kaliumsulfaattia (K₂SO₄) ja HCl. Tällöin kloori pääsee kaasumaisessa muodossa kulkemaan tulistimien läpi suodattimille muodostamatta ongelmia. K₂SO₄:lla on huomattavasti korkeampi sulamislämpötila kuin KCl:lla, eikä se ole läheskään yhtä syövyttävä aine, jolloin se pääsee helpommin matkaamaan kiinteänä aineena lentotuhkan mukana suodattimille tai poistumaan pohjatuhkan mukana. Tämä menetelmä ei kuitenkaan poista tulistimien likaantumista ja korroosiota, vaan vähentää sitä huomattavasti.

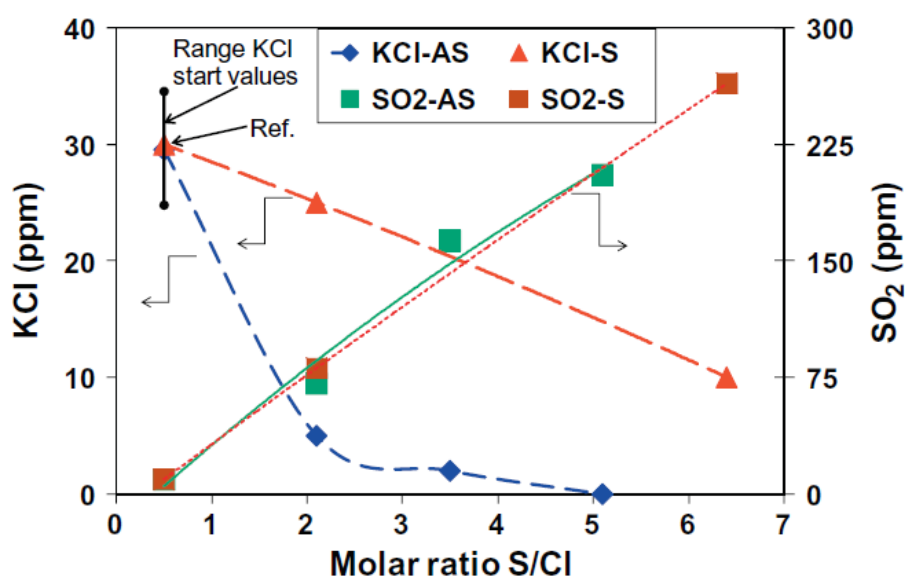


Luonnollisen rikin muodostuminen SO_3 :ksi tapahtuu reaktioiden (R16) ja (R17) kautta. Alle 900 °C:een lämpötiloissa SO_3 :n muodostuminen reaktion (R17) mukaan on hidasta. Reaktioiden (R14) ja (R15) mukaan kaliumsulfaatin muodostuminen on huomattavasti nopeampaa, kun SO_3 on läsnä SO_2 :n sijaan. Tämän takia ammoniakin lisäys savukaasuihin on otettu käyttöön korroosion vähentämiseksi. Vattenfall on kehittänyt niin kutsuttu ChlorOut tekniikan, jossa ammoniakkia ruiskutetaan savukaasuihin juuri ennen tulistimia. Tässä tekniikassa mitataan savukaasun alkalikloridipitoisuuden niin kutsuttu IACM:lla (In situ Alkali Chloride Monitor, eli paikanpäällä mittaavalla alkali kloridi monitorilla), joka mittaa KCl ja NaCl pitoisuuden kaasusta. Monitori ei mittaa muita alkali pitoisuuksia, kuten KOH:a kaasusta. Tulos annetaan KCl pitoisuutena, joka on dominoiva yhdiste polttokattilan lämpötiloissa. IACM mittaa myös SO_2 pitoisuuden. (Kassman H. et al. 2010, 1650, 1651.) Ammoniumsulfaatti hajoo reaktion (R18) mukaisesti, muodostaen sulfaattia ja ammoniakkia. Ammoniakkia käytetään ei-katalyyttisessä typenpoistossa (SNCR), johon tutustutaan tarkemmin kappaleessa 5.3.2.

Jotta kalium saataisiin kaapattua K_2SO_4 :ksi, täytyy varmistaa, että rikin määrä savukaasuissa on riittävä. Teoriassa K_2SO_4 muodostumiseksi S/Cl:n molaarissuhde ei missään vaiheessa saisi olla alle 0,5. Joten käytännössä, koska S vähenee K_2SO_4 muodostumisen myötä, niin rikkiä täytyy olla huomattavasti enemmän, jotta S/Cl:n molaarissuhde ei olisi missään vaiheessa alle 0,5. Kalsium ja natrium kilpailevat kaliumin kanssa rikistä ja kloorista. Klooripitoisuus kerrostumissa kasvaa huomattavasti, kun S/(Ca + 2K + 2Na) molaripitoisuus laskee alle 0,2 polttoaineessa. (Kassman H. et al. 2010, 1651.)

Kassman H. et al.:n (2010, 1653.) tekemässä koepolttokokeessa lisättiin ammoniumsulfaattia sekä vaihtoehtoisia sulfaatteja, puupellettejä ja olkea polttavaan kiertopetikattilaan Chlor-Out tekniikan mukaisesti. Vaikka kyseessä oli kiertopetikattila, voidaan tuloksia

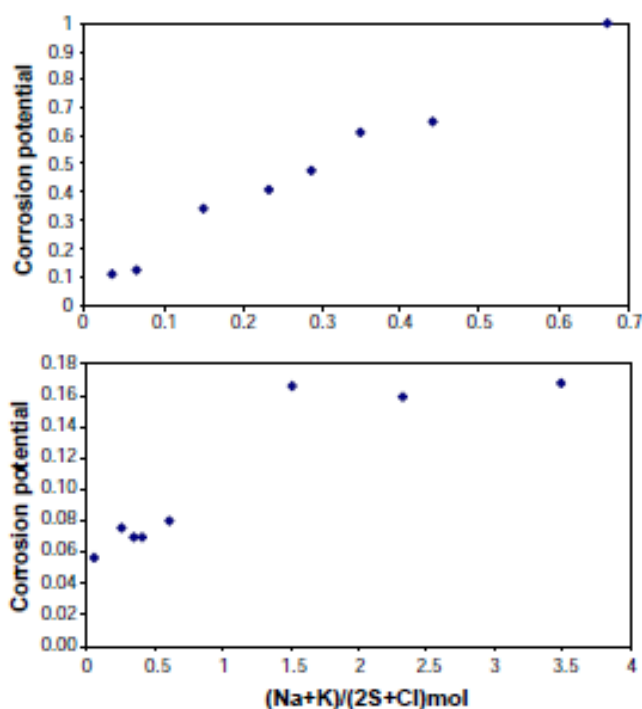
verrata pölypolttokattilaan, koska tulistimille menevän savukaasun lämpötila on yli 800 °C:ta. Oljessa on huomattava määrä klooria, jolloin korroosion vähentäminen korostuu. Tutkimuksessa huomattiin että ammoniumsulfaattia lisäämällä voidaan KCl pitoisuutta vähentää 30 ppm:stä 5 ppm:ään, jolloin samalla NO arvot puolittuivat 60:stä 30 ppm:ään. Pölypolttokattilassa näin suurta vähennystä NO pitoisuudelle ei voida olettaa tapahtuvan, koska NO_4 :n vaikuttava reaktioaika on huomattavasti pienempi. Myös vaihtoehtoisen sulfaatin lisääminen alensi KCl pitoisuutta, mutta ei vaikuttanut NO pitoisuuteen. Tutkimuksessa huomattiin HCl pitoisuuksien kasvua sulfaattien lisäämisen vaikutuksesta, joka on yhdenmukainen ilmiö reaktion (R15) kanssa. Suurilla NH_4 pitoisuuksilla HCl pitoisuus laski, joka voi johtua ammoniumkloridin (NH_4Cl) muodostumisesta. Kuvassa 16 on esitelty Kassaman H. et al.:n tulokset, jossa on mitattu KCl ja SO_2 pitoisuus, kun savukaasuun on lisätty ammoniumsulfaattia (AS) ja rikkiä (S). Kuvasta nähdään kuinka paljon tehokkaammin KCl:n muodostuminen estetään ammoniumsulfaatin kuin rikin avulla. KCl:n lähtöarvo vaihteli 26 ja 36 ppm:n välillä, joka on huomioitu kuvassa 16.



Kuva 16: S/Cl molaarinen suhde verrattuna KCl ja SO_2 pitoisuuteen, kun savukaasuun on lisätty ammoniumsulfaattia (AS) ja rikkiä (S) (Kassman H. et al. 2010, 1653.)

Kassman H. et al.:n tuloksia tukee, myös Becidan M. et al.:n (2008, 596.) tekemä teoreettinen tietokonemallinnus, jossa tutkittiin yhteiskuntajätteenpolton aiheuttamaa korroosiota FactStage 5.5 ohjelmalla. Teoreettinen tutkimus antaa hyvän pohjan käytännön kokeille huomattavasti halvemmalla hinnalla ja pienemmällä riskillä. Vaikka tutkimuksessa käytet-

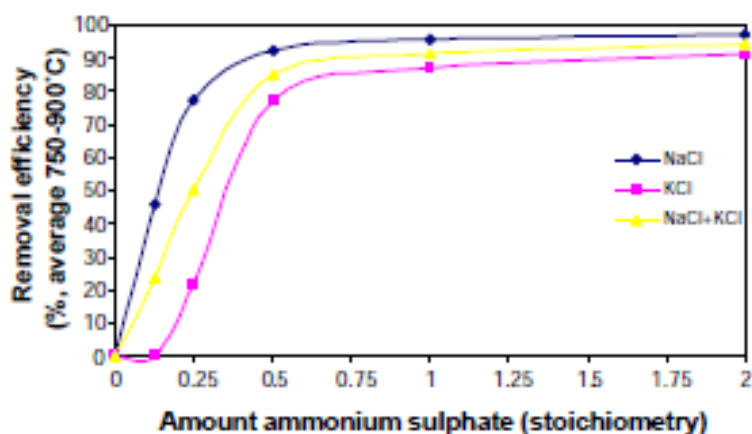
tiin jätteenpoltossa syntyviä alkalimääriä, ovat ne verrattavissa biopolttoon. Tutkimuksessa tutkittiin eri alkalien ja lämpötilojen vaikutuksia korroosioon sekä lämpötiloja ja pitoisuuksia, joissa ammoniumsulfaatti kaappaa alkalit parhaiten. Alla olevasta kuvasta 17 nähdään korroosiopotentiaalit: ylemmässä kuvassa on suuri Cl pitoisuus ja alemmassa pieni Cl pitoisuus. Kuvasta 17 huomataan, että kun Cl pitoisuus vähenee 1 %:sta 0,1 %:iin polttoaineessa, korroosio potentiaali vähenee huomattavasti, vaikka pienemmällä Cl pitoisuudella alkalien määrä kasvaa moninkertaiseksi. Liitteessä 6 on taulukko 63, jossa on kerrottu tarkemmin kokeessa käytettyjen parametrien arvot. S:n, Cl:n, Na:n ja K:n arvoja vaihdeltiin ja tutkittiin niiden vaikutusta korroosioon.



Kuva 17: Korroosiopotentiaali $(Na + K)/(2S + Cl)$ funktiona mooliosuutena. Ylemmässä kuvassa suuri Cl (1 % polttoaineesta) taso ja alemmassa pieni Cl taso (0,1 % polttoaineesta) (Becidan M. et al. 2008, 599.)

Becidan M. et al.:n (2008, 601, 602.) tutkimuksessa tutkittiin lämpötilan vaikutusta alkalien kaappaukseen eri ammoniakkipitoisuuksilla. Tutkimuksessa huomattiin, että ammoniumsulfaatin optimaalinen kaappauslämpötila NaCl:n kanssa on 800–900 °C ja KCl:n kanssa 750–850 °C. Kuvasta 18 nähdään NaCl:n, KCl:n ja niiden yhteinen poistotehokkuus ammoniumsulfaattia lisättäessä. Ammoniumsulfaattipitoisuus ilmoitetaan stökiometrisenä verrattuna kaapattavaan alkalin pitoisuuteen. Kuvasta huomataan, että ammoniumsulfaatin molaarisuhteen (stökiometrisen pitoisuuden) kasvaessa yli 0,5, tasoittuu kaapattavien alka-

lien tehokkuus. Tämä tarkoittaa, että enemmän ammoniumsulfaattia jää reagoimatta kaliumin kanssa, jolloin NH_3 ja SO_2 pitoisuudet kasvavat. Ylimääräiset NH_3 ja SO_2 pitoisuudet voidaan joutua poistamaan savukaasuista, joka aiheuttaa ongelmia savukaasun puhdistuksen ja päästöjen nousun kannalta. Liitteestä 6 kuvasta 40 ja 41 voidaan tutkia tarkemmin ammoniumsulfaatin eri molaarisuhteiden alkalikloridien kaappauksia lämpötilan funktiona. Kuvassa 40 kaappaukset on esitetty prosentteina ja kuvassa 41 mooleina.



Kuva 18: NaCl:n ja KCl:n keskimääräinen poistotehokkuus (750–900 °C) ammoniumsulfaatin määrän funktiona (Becidan M. et al. 2008, 602.)

Verrattaessa Kassman H. et al.:n tuloksia (kuva 16) Becidan M. et al.:n tuloksiin (kuva 18) huomataan, että alkalien kaappaukset tasoittuvat hieman eri pitoisuuksilla. Kassmanin H. et al.:n tuloksissa rikkipitoisuuden molaarinen suhde tasoittui 2, kun taas Becidan M. et al.:n teoreettisessa pitoisuus tasoittui jo 0,5 molaarisessa suhteessa. Tässä huomataan teoreettisen ja käytännönkokeen ero. Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että korroosiota pystytään ehkäisemään huomattavasti lisäämällä rikkiä tai sulfaattia polttoaineeseen tai savukaasuun. Molaariset määrät ovat laitos- ja polttoainekohtaisia.

Broström M. et al. (2007, 1171.) tutki biomassan poltosta aiheutuvaa korroosiota ja ammoniumsulfaatin vaikutusta siihen kiertoileijupeti kattilassa. Laitos tuotti 96 MW lämpöä ja polttoaineena oli kaarna (> 80 %), jäte (suurimmilta osin muovia < 6 %) ja puuhake. Savukaasun lämpötila oli noin 800 °C ja tuotetun höyryn lämpötila 420 °C. Mitatut savukaasun pitoisuudet ovat kirjattuna taulukkoon 10.

Taulukko 10: Operointitila ja savukaasupäästöt (Broström M. et al. 2007. 1173.)

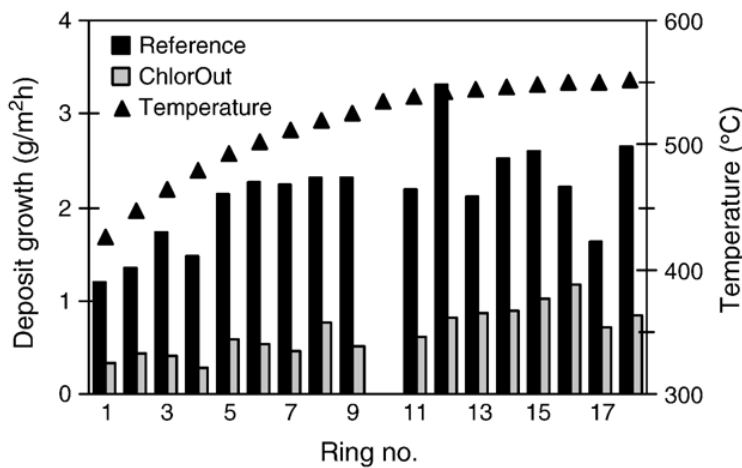
	Normaalitilassa	ClorOut tekniikalla
Kuorma (ton höyryä/h)	88	87
Jätteen osuus (%)	0,4	1,2
ClorOut (l/h)	0	62 ^a
NO (mg/MJ)	78	44
SO ₂ , savupiipussa (mg/m ³ _n)	0	0
IACAM		
KCl (ppm kostea)	10	2
SO ₂ (ppm kostea)	9	24

^a 62 l/h vastaa noin 100 g S/MWh

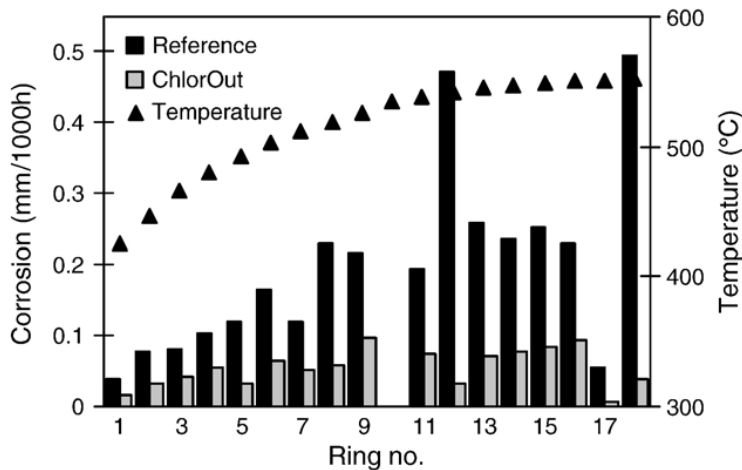
Broström M. et al.:n (2007, 1173, 1175.) tutkimuksessa tulistimiin kiinnitettiin eri tulistin-materiaaleista tehtyjä renkaita ja mitattiin niiden korroosiokestävyyttä. Taulukosta 11 nähdään eri renkaiden materiaalit ja numerot. Kuvasta 19 nähdään renkaiden pinnalle muodostunut kerrostuma (g/m²h) ja kuvasta 20 korroosio (mm/1000h) eri lämpötiloissa oleville tulistinrenkaille normaaleissa olosuhteissa ja käytettäessä ClorOut tekniikkaa.

Taulukko 11: Korroosiotutkimusrenkaiden paikat ja ainesisällöt (Broström M. et al. 2007, 1173.)

Teräs	Rengas	Cr	Ni	Mo	Mn	Muut
15Mo3	1, 4, 7, 10	-	-	0,3	0,6	C:0,2, Si:0,2
13CrMo44	3, 6, 9, 11, 14, 16	0,9	-	0,5	0,7	C:0,1, Si:0,3
10CrMo910	2, 5, 8, 13, 15	2,2	-	1,0	0,6	C:0,1, Si:0,3
X20CrMoV121	12, 18	11,2	0,5	1,0	0,5	C:0,2, Si:0,3, V:0,3
Esshete 1250	17	15,0	9,5	1,0	6,3	C:0,1, V, Nb, B



Kuva 19: Korroosiotutkimusrenkaiden painon muutos (Broström M. et al. 2007, 1175.)



Kuva 20: Keskiarvo korroosion osuudesta 18 koerenkaalla lisäämällä ammoniumsulfaattia ja ilman lisäystä (Broström M. et al. 2007, 1176.)

Kuvasta 19 havaitaan, että ClorOut tekniikka vähentää huomattavasti kerrostumista ja kuvasta 20 nähdään, kuinka korroosion osuus vähenee tulistimilla. Kuvasta 20 huomataan myös, että runsasseosteinen teräs (no. 17, E1250) vastusti korroosiota huomattavasti enemmän, kun lisättiin ammoniumsulfaattia. Korkeakrominen materiaali X20 (renkaat 12 ja 18) kärsi ankarasti korroosiosta normaalissa tilanteessa. Muilla teräksillä ei ollut suurta eroa toisistaan normaalissa ajossa ja lisättäessä ammoniumsulfaattia. Pienemmillä lämpötiloilla (alle 500 °C) millään materiaalilla ei ollut suurta eroa. (Broström M. et al. 2007, 1176.) Liitteestä 7 kuvista 42, 43 ja 44 voidaan nähdä lisää Broströmin M. et al.:n kokeista saatuja tuloksia. Kuvassa 42 nähdään KCl pitoisuuden väheneminen, kuvasta 43 tulistinrenkaiden 1-3 korroosiovaikutus ja kuvasta 44 renkaan no 4 SEM (Scanning electron mic-

roscope) mikrograafin, normaalissa käytössä ja ClorOut tekniikalla 4 viikon käytön jälkeen.

5.3 Typpipäästöjen vähentäminen

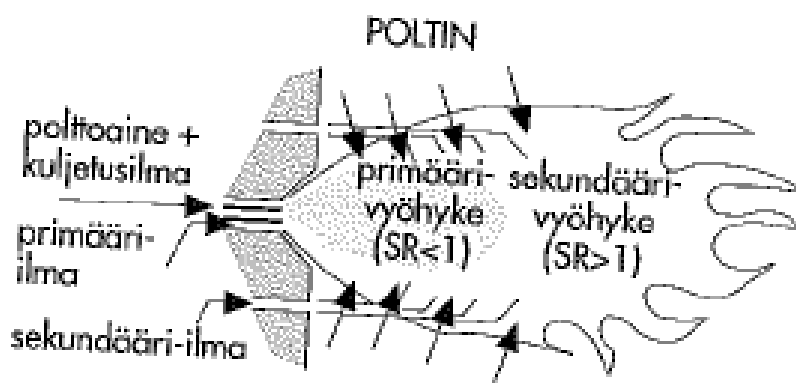
Polton yhteydessä muodostuvista haitallisista typpiyhdisteistä tärkeimmät ovat typpi-monoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO₂). Näiden yleisnimi on NO_x. Tavallisesti NO_x –päästöistä noin 95 % koostuu NO:sta ja vain alle 5 % NO₂:sta. Myöhemmin suurin osa NO:sta hapettuu NO₂:ksi, minkä vuoksi niiden päästöt ovat ympäristövaikutuksiltaan hyvin pitkälti samat. NO_x –päästöt aiheuttavat muun muassa happamia laskeumia sekä osallistuminen fotokemialliseen saastesumuun ja otsonin muodostukseen tiheästi liikennöidyssä suurkaupungeissa. (Raiko R. et al. 2002, 300.)

Typpioksidit muodostuvat poltossa kahdesta lähteestä: polttoilman molekyylylitypestä ja polttoaineen orgaanisesta tyypestä. NO:n muodostuminen molekyylylitypestä edellyttää typpi-atomien välisen voimakkaan sidosenergian rikkoutumista. Polttoilman sisältämän molekyylytyypin muodostuminen NO:ksi voi tapahtua kolmella eri tavalla, termisellä, nopealla tai ilokaasun (N₂O) -välituotteen kautta. Termisessä typpioksidin muodostumisessa, molekyylytppi reagoi palamisilman hapen kanssa korkeassa lämpötilassa. Nopeassa NO:n muodostumisessa molekyylytppi reagoi palamisilman hapen kanssa hiilivetyradikaaleja runsaasti sisältävässä liekinosassa ja NO:n muodostuminen N₂O:n välituotteen kautta edellyttää, että molekyylytppi reagoi ensin N₂O:ksi, jonka jälkeen ilokaasun on edelleen reagoitava hapen kanssa muodostaen typpimonoksidia. Hiilipölypoltossa polttoaineen sisältämä tyyppi muodostaa 80 % typpimonoksidista. Loput 20 % tulevat pääosin polttoilman tyyppin termisestä hapettumisesta. Nopean ja N₂O-välituotteen kautta muodostuvat NO:n osuus on hyvin pieni. (Huhtinen M. et al. 2004, 41, 42; Raiko R. et al. 2002, 304–308.)

5.3.1 Low-NO_x polttimet

Low-NO_x –polttimien toimintaperiaate perustuu kuvan 21 mukaiseen polttoaineen vaiheittaiseen palamiseen. Ensimmäisessä vaiheessa (primäärivyöhyke) polttoaineen pyrolysoituessa osa sen tyypestä vapautuu ja muodostaa pienmolekyyllisiä, kaasumaisia syano- ja sy-

anidiyhdisteitä, kuten syaanivetyä HCN, ja ammoniumyhdisteitä, kuten ammoniakkia NH_3 . Tavallisessa poltossa nämä yhdisteet hapettuisivat edelleen typpimonoksideiksi, mutta Low- NO_x –polttimissa palaminen tapahtuu ali-ilmalla, (pelkistävä ympäristö) jolloin HCN- ja NH_3 –yhdisteet reagoivat pääasiassa molekyyllitypeksi. Kun toisessa vaiheessa (sekundäärivyöhyke) syötetään loppu palamisilma liekin reunoilta, syaanivetyä ja ammoniakkia on vain vähän jäljellä typpimonoksidin muodostamiseksi. (Raiko R. et al. 2002, 308, 309.)

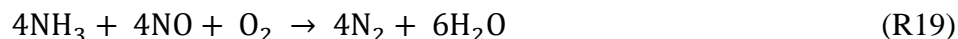


Kuva 21: Low- NO_x –polttimen toimintaperiaate. (Raiko R. et al. 2002, 310.)

Edistyneillä Low- NO_x –polttimilla voidaan päästä 200 mg/nm^3 NO_x -pitoisuuteen, mutta tyypillinen taso olemassa olevilla laitoksilla on $300 - 400 \text{ mg/nm}^3$. (Pöyry, 2010b, 25)

5.3.2 SNCR, ei-katalyyttinen typenpoisto

SNCR:ssä, eli ei-katalyyttisessä typenpoistomenetelmässä syötetään ammoniakkia, ammoniakin ja veden liuosta tai ureaa savukaasuun noin $800 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Menetelmällä voidaan päästä noin 40–60 % typenoksidipäästö vähennyksiin, mutta se vaatii riittävän viipymäajan sekä sopivan lämpötilan ammoniakkiveden syötölle kattilassa. Uusi testausvaiheessa oleva SNCR –menetelmä, jossa ammoniakki tai urea syötetään alihappiselle alueelle polttimien ja yläilmasuuttimien väliin. Tällöin ammoniakki ei pala hapen puutteen vuoksi, vaan se reagoi NO_x :en kanssa hajottaen ne typeksi ja vedeksi reaktion (R19) mukaan. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 23)



SNCR –järjestelmän rinnalla on mahdollista soveltaa niin sanotussa slippi-katalyyttiä täydentämään menetelmän erotuskykyä. Katalyytin perimmäinen tarkoitus on vähentää ammoniakkipäästöjä ilmaan, mutta sillä on myös NO_x päästöjä vähentävä vaikutus. Slippi-katalyytti koostuu tyypillisesti katalyyttikerroksesta sijoitettuna savukaasukanavaan. Katalyytti sijoitetaan tavallisesti ekonomaiserin ja palamisilman esilämmittimen väliin, jossa savukaasujen lämpötilat ovat optimisella alueella. Lämpötilan ylläpitämiseksi katalyytissä on mahdollista asentaa ekonomaiserin ohituskanava, jonka kautta voidaan johtaa kuumia savukaasuja suoraan katalyytille. Biomassaa sisältävät alkalit ovat erityisen haitallisia katalyyteille. Suuria biomassamääriä käyttävien laitosten käyttö- ja kunnossapitokustannukset voivat lisääntyä katalyytin puhdistus- ja aktivointi/korvaus tarpeen takia. Slippi-katalyytin ja SNCR –menetelmän avulla voidaan päästä kohteesta riippuen noin 30–60 % typpioksidien kokonaisvähennykseen. (Pöyry, 2010b, 28)

5.3.3 SCR, katalyyttinen typenpoisto

SCR:ssä, eli katalyyttisessä typenpoistomenetelmässä typentoisto tapahtuu erillisessä reaktorissa katalyytin ja ammoniakin syötön avulla. SCR -menetelmällä voidaan saavuttaa jopa 80–90 %:n typenoksidien erotusaste. Menetelmä voidaan sijoittaa prosessiin joko ekonomaiserin ja ilmanesilämmittimen väliin (high dust ja low dust) tai hiukkasten- ja rikinpoistojärjestelmän jälkeen (tail-end) ennen piippua. Menetelmän korkealla hyötysteella on hintansa. Suurten investointi- ja käyttökustannuksen lisäksi järjestelmä vaatii runsaasti tilaa, jota laiteksilla ei yleensä ole. High dust -järjestelmän soveltuvuus vanhempaan polttolaitokseen riippuu ekonomaiserin ja ilmanesilämmittimen välisestä tilasta. Järjestelmä tilantarve on noin 10 x 10 x 25 m. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 23) Koska high dust –katalyyttiin tulevaa savukaasua ei puhdisteta, se on alttiina kaikille savukaasun epäpuhtauksille. Järjestelmään tulevia savukaasuja ei tarvitse lämmittää reaktiolle sopivaan lämpötilaan. (Pöyry, 2010b, 25)

Low dust järjestelmän katalyytti sijaitsee myös ennen ilmanesilämmitintä, mutta tässä menetelmässä savukaasu puhdistetaan hiukkasista ennen ammoniakin syöttöä ja katalyyttiä, jolloin katalyytin kestävyys paranee. Tässäkin menetelmässä on heikkoutena suuri tilantar-

ve hiukkaspuhdistimelle ja katalyytille. Hiukkaspuhdistimen täytyy kestää suurempia savukaasun lämpötiloja kuin normaalisti, joka myös nostaa investointikustannuksia. (Pöry, 2010b, 25)

Tail-end järjestelmän asennetaan rikinpoistojärjestelmän ja piipun väliin. Rikinpoistojärjestelmän jälkeisen alhaisen savukaasunlämpötila johdosta, tail-end järjestelmä vaatii savukaasun uudelleenlämmityksen, joka lisää käyttökustannuksia merkittävästi. Järjestelmän etuna on pidempi kestävyys puhtaamman savukaasun ansiosta sekä helpompi jälkiasennus vanhaan voimalaitokseen. Menetelmän toimilämpötila on riippuvainen savukaasujen rikkipitoisuudesta. Toimilämpötila on korkeampi suurempia rikkidioksidimääriä omaaville savukaasuille. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 23; Pöry, 2010b, 25)

5.3.4 NO_x:n pelkistys maakaasulla

Eräs yksinkertaisista pääpolttimessa syntyneistä NO_x:n vähentämismenetelmistä on pelkistää savukaasujen NO_x –kaasut vaarattomaksi typpimolekyyleiksi syöttämällä maakaasua pääpolttoaineen syöttökohdan yläpuolelle tulipesään. Tällöin maakaasu sekoittuu pääpolttimessa muodostuneisiin savukaasuihin ja reagoi typen kanssa muodostaen niistä N₂ typpimolekyylejä. Lisätty maakaasu poltetaan syöttämällä tarvittava palamisilma tulipesän yläosaan. Menetelmässä tarvitaan maakaasua 10–20 % koko polttoainemäärästä, jolloin NO_x –päästöjä on mahdollista vähentää jopa 60 %. (Huhtinen M. et al. 2004, 94)

5.4 Rikkipäästöjen vähentäminen

Rikin oksidit ovat haitallisia sekä ihmisten terveydelle että ympäristölle. Suuret rikkidioksidipitoisuudet aiheuttavat muun muassa hengityselinsairauksia. Yhdessä typenoksidien kanssa rikkioksidit aiheuttavat niin kutsuttuja happosateita, jotka vahingoittavat elollista luontoa. Rikkioksidit vaurioittavat myös materiaaleja muun muassa lisäämällä metallien korroosiota ja kipsimateriaalien rapautumista. Ihmisten aiheuttamista rikkipäästöistä suurin osa on peräisin fossiilisten polttoaineiden poltosta. Suurin osa poltossa vapautuvaista rikinoksideista on rikkidioksidia, josta pieni osa (1/40–1/80) hapettuu edelleen rikkitrioksidiksi. SO₃ muodostaa veden kanssa rikkihappoa, joka aiheuttaa voimakasta syöpymistä

kattilan lämpöpinnoissa. Tämän takia on tärkeää pitää rikkiä sisältävien savukaasujen lämpötila kattilan peräpäässä kastepistettä korkeampana. SO_2 hapettuu ilmakehässä SO_3 :ksi, joten ympäristövaikutusten kannalta ne ovat samanarvoisia. (Huhtinen M. et al. 2004, 92; Raiko R. et al. 2002, 343.)

Polttoprosessissa vapautuvat rikin oksidit ovat peräisin polttoaineen rikistä. Alla olevasta taulukosta 12 voidaan nähdä tyypillisiä rikkipitoisuuksia sekä rikkidioksidin ominaispäästöjä. (Raiko R. et al. 2002, 344.)

Taulukko 12: Polttoaineiden tyypillisiä rikkipitoisuuksia sekä rikkidioksidin ominaispäästöjä. (Raiko R. et al. 2002, 344.)

Polttoaine	Rikkipitoisuus paino -%	Rikkipäästöt mg SO_2 /MJ
Kivihiili	0,2 – 5	150 – 4000
Puu	< 0,05	< 130
Turve	0,05 – 0,5	50 – 500
Maakaasu	0	0
Kevyt polttoöljy	0,05 – 0,5	25 – 250
Raskas polttoöljy	1 – 4	500 – 2000

5.4.1 Kuiva rikinpoistomenetelmä

Kuivat rikinpoistomenetelmät (kalkki-injektio) perustuvat kalsiumyhdisteiden kykyyn sitoa rikkiä. Näissä menetelmissä rikkidioksidit poistetaan jo tulipesässä. Poltettaessa kiinteitä polttoaineita pölypoltossa, kalkkikiveä tai muuta kalsiumyhdistettä voidaan syöttää tulipesään hienojakoisina hiukkasina, jolloin ne reagoivat rikkioksidien kanssa. Kuivan rikinpoistomenetelmän etuna on sen edullisuus verrattuna muihin rikinpoistojärjestelmiin. Erilistä reaktoria ei tarvita, jolloin investointikustannukset pysyvät alhaisina. Varjopuolena kuivassa rikinpoistomenetelmässä on sen huono erotuskyky. Pölypoltossa kuivamenetelmän rikinpoistoaste on noin 50 %. (Raiko R. et al. 2002, 352.)

Kuivaa rikinpoistomenetelmää käytetään yleensä pienissä voimalaitoksissa, jotka käyttävät vähärikkistä hiiltä. Kalkki-injektio menetelmä käsittää kuivan sorbentin suoran ruiskutuksen tulipesän kaasuvirtaan. Tavallisimpia sorbentteja ovat pulveroitu kalkkikivi (CaCO_3), sammutettu kalkki ja dolomiitti ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). Sorbentin hiukkaset ovat yleensä 2–10

um kokoluokkaa. Korkean lämpötilan ansiosta sorbentti kalsinoituu tulipesässä, jolloin reaktiivista kalsiumoksidia (CaO) muodostuu. CaO hiukkasten pinta reagoi SO_2 :n kanssa muodostaen kalsiumsulfaattia (CaSO_4). Hiukkaset kulkeutuvat savukaasun mukana ja erotuvat myöhemmin hiukkassuodattimilla. Kaikki kalkkikivi ei reagoi rikkidioksidien kanssa vaan jäljelle jää reagoimatonta kalsiumoksidia. (Raiko R. et al. 2002, 353.)

5.4.2 Puolikuivamenetelmä

Martinlaaksossa on käytössä tyypillinen puolikuivamenetelmällä toimiva rikinpoistolaitos. Laitoksen periaatekuva ja rakenne on esitelty kappaleessa 2.7.

Puolikuivassa menetelmässä syötetään kalkkilietettä, joka on tavallisimmin kalsiumkarbonaatti tai kalsiumhydroksidi, rikinpoistokammioon pieninä pisaroina. Pisarat reagoivat ja kuivuvat kammiossa, jolloin rikinpoistotuotteena saadaan kuivaa kalsiumsulfiittia. Puolikuivamenetelmä ei ole yhtä tehokas kuin märkämenetelmä (95–99 %), mutta sen etuna on laitteiston yksinkertaisuus ja kuiva lopputuote. (Raiko R. et al. 2002, 350, 351.)

5.4.3 Märkäpesurimenetelmä

Märkäpesuria käytettäessä savukaasuista poistetaan ensin hiukkaset ensimerkiksi sähkösuodattimella. Jäähtyneet savukaasut johdetaan reaktoriin, jossa ne pestään runsaasti vettä sisältävällä kalkkilietteellä. Märkäpesuripuhdistusmenetelmällä voidaan tyypillisesti saavuttaa jopa 90–95 %: rikinpoistoaste. Lopputuotteena syntyy kipsiä, jolla on hyvät hyötykäyttömahdollisuudet verrattuna puolikuivamenetelmän lopputuotteisiin. Haittapuolena ovat järjestelmän vaatima suuri tila, huoltokustannukset ja prosessissa syntyvät jätevedet, jotka tulee käsitellä ennen kun ne johdetaan pois laitokselta. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 20, 21; Raiko R. et al. 2002, 350.) Jätevedestä poistetaan niin kutsuttu suodatinsakka, joka sisältää kiintoainetta, raskasmetalleja ja muita haitallisia yhdisteitä. Suodatinsakan raskasmetallipitoisuus on selvästi pienempi kuin lentotuhkan metallipitoisuus. (Paavo Ristola Oy, 1997, 102.) Uusissa laitoksissa jätevesien käsittely on toteutettu prosessin sisällä ja jätevedet haihdutetaan, jolloin niihin sitoutuneet epäpuhtaudet voidaan siirtää loppusijoitukseen tai jatkokäsittelyyn. (Vesanto P. 2006, 38.) Puhdistettu vesi voidaan neutralisoin-

nin jälkeen johtaa turvallisesti vesistöön tai viemäriverkostoon. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 20, 21; Raiko R. et al. 2002, 350.)

5.4.4 Vähärikkinen polttoaine

Käyttämällä vähärikkistä polttoainetta voidaan vähentää rikkipäästöjä merkittävästi. Puu- ja turvepolttoaineet ovat kivihiiltä vähemmän rikkiä sisältäviä polttoaineita. Vähemmän rikkiä sisältävän kivihiililaadun valitseminen vähentää myös rikkipäästöjä. Näillä toimilla pelkästään ei voida saavuttaa IE-direktiivin asettamia päästörajoja, mutta voidaan parantaa mahdollisuuksia päästä päästörajojen alapuolelle nykyisen rikinpoistojärjestelmän avulla. Puuperäinen polttoaine on vähärikkistä ja sen ominaisuuksia käsiteltiin kappaleessa 3. (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 21)

5.5 Rinnakkaispolttoon muutettavan kattilan huomioitavat kustannukset

Siirryttäessä polttamaan biopolttoainetta rinnakkaispolttona on yhtenä tärkeimpänä rajoitteena rinnakkaispoltoista tulevat kustannukset. Jos kustannukset kohoavat liian suuriksi muuttuu tuotanto tappiolliseksi, jolloin toimintaa ei kannata jatkaa. Kustannuslaskelman tekemiseen on useita eri menetelmiä. Tässä työssä on käytetty lisäyslaskenta menetelmää, jossa lasketaan yhteen kokonaiskustannukset erilaisista yksikkökustannuksista. Helpottaakseen yksikkökustannuksien määrittelemistä on jokainen yksikkökustannus muutettu muotoon €/a.

Kokonaiskustannukset koostuvat kiinteistä ja muuttuvista kustannuksista. Jotta laskenta olisi mahdollisimman yksinkertaista, muutetaan muuttuvat kustannukset kiinteiksi vuosikustannuksiksi ja oletetaan, että joka vuonna tulee yhtä isoja huolto- ja korjauskustannuksia. Polttoaineiden hinnat, hiilidioksidin päästömaksut ja tuotantotuet vaihtelevat myös, mutta koska tulevaisuuden ennustaminen on hyvin vaikeaa, keskitytään tässä työssä tämänhetkisiin hintaluokkiin. Tulevaisuuden ennakoimiseksi edes pienissä määrissä, tässä työssä lasketaan muutama skenaario eri hintaluokilla.

Rinnakkaispolttolaitoksen investointikustannukset ovat yksi osa kustannuslaskelmista. Investointikustannukset ovat pitkäaikaisia kustannuksia, joiden suuruus on riippuvainen investoinnin määrästä, pääoman lainantarpeesta, maksuajasta ja laskentakorosta. Tässä työssä on käytetty annuiteettimenetelmää investointilaskelmissa. Investointien jälleenyntiärvoksi on oletettu nolla euroa, jolloin annuiteetilaskentakaava yksinkertaistuu kaavan 5 mukaiseksi.

$$A = c_{ni} \cdot I \quad (5)$$

missä,

A = Investoinnin vuotuinen annuiteetti [€/a]

c_{ni} = Annuiteettitekijä

I = Investointi [€]

Investoinnin suuruus riippuu saatavasta energiatuesta. Kuten kappaleessa 4.1.2 todettiin työ- ja elinkeinoministeriö tai työvoima- ja elinkeinokeskus voi myöntää tukea investointihankkeeseen, eli tuki on harkinnanvarainen. Tuen suuruus riippuu investointikohteesta ja käytetystä tekniikasta. Investointituen suuruus vaihtelee 25–40 % välillä.

Annuiteettitekijä voidaan laskea kaavasta 6, jossa oletetaan investoinnin laskentakoron (i) olevan 7 % ja pitoajan (n) 12 vuotta. Pitoaika on valittu 12 vuodeksi, koska biopolttoaineiden tuottamasta sähköstä voi saada syöttötariffitukea enintään 12 vuodeksi. Annuiteettitekijä on laskettu yllä olevilla arvoilla.

$$c_{ni} = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

$$0,1259 = \frac{0,07 \cdot (1+0,07)^{12}}{(1+0,07)^{12} - 1}$$

Rinnakkaispolttolaitoksen investointikustannukset kuvaavat rakennettavan laitoksen suuruutta ja liikkuvien osien määrää. On yleisesti tiedossa, että mitä enemmän liikkuvia osia, niin sitä enemmän huollettavaa. Tämän takia voidaan olettaa, että rinnakkaispolton aiheuttavan lisää huolto- ja korjauskustannuksia. Nämä kustannukset voidaan olettaa olevan 1,2

% investointikustannuksista ennen energiatukea (I_0). Vuotuiset huolto- ja korjauskustannukset [€/a] (HK) voidaan laskea kaavalla 7. Investoinnin vakuutuskustannukset eivät muutu, sillä ne koskevat voimalaitosyksikköä kokonaisuudessaan. (Karjalainen P. 2012.)

$$HK = I_0 \cdot 0,012 \quad (7)$$

Kappaleessa 3 on arvioitu biopolttoaineiden hinta portilla [€/MWh]. Hiilen porttihinta on 12,32 €/MWh. Taulukoon 13 on kerätty polttoaineiden porttihinnot ja hiilen hiilidioksidimaksu [€/MWh], kun hiilidioksidipäästöoikeuden hinta on 8,59 €/t_{CO2}. Hiilidioksidin päästömaksu voidaan Martinlaakso 2 tapauksessa muuttaa muotoon [€/MWh] kaavalla 8. Kaavassa on käytetty hiilen CO₂ oletuspäästökertoimenä 94,6 t_{CO2}/TJ ja hapettumiskertoimenä 99 %. (Lehtinen S. Karjalainen P. 2012.)

$$\frac{94,6 \text{ t}_{CO_2}/TJ \cdot 0,99 \cdot 3,6 \text{ TJ}/GWh}{1000 \text{ MWh}/GWh} \cdot (P_e + 0,03) = P_{ee} \quad (8)$$

missä,

P_e = Hiilidioksidipäästöoikeuden hinta [€/t_{CO2}]

P_{ee} = Hiilidioksidipäästömaksu [€/MWh]

Taulukko 13: Polttoaineiden porttihinnot ja hiilidioksidipäästömaksut [€/MWh]

Polttoaine	Polttoaineen porttihinta [€/MWh]	Hiilidioksidipäästömaksu [€/MWh]
Sahanpuru	18	
Pelletti	30	
Torrefioitu biohiili	35	
Hake (kaasutus)	20	
Bio-SNG	45	
Hiili	12,32	2,91

Rinnakkaispolttolaitoksen polttoaineet ovat erihintaisia. Mitä pitemmälle jalostettu polttoaine on, sitä suurempi on polttoaineen porttihinta. Tässä työssä on oletettu, että voimalaitos käy täydellä teholla 5500 h/a ja tuottaa 1/3 tuotetusta energiasta sähköä ja 2/3 lämpöä. Koska myydyin sähkön ja lämmön hinta on sama polttoaineesta riippumatta, ei niistä saatua tuottoa ole otettu tässä tarkastelussa huomioon. Sen sijaan tässä työssä on laskettu, kuinka paljon sähkön ja lämmön tuottaminen maksaa yritykselle. Sähkön ja lämmön tuottaminen

voidaan laskea kaavasta 9, jossa on mukana hiilidioksidivero ja kaukolämpövero. Biopolttoaineita poltettaessa ei näitä veroja tarvitse ottaa huomioon.

$$(H + P_{ee} + MK_S) \cdot K_S \cdot T_S / \eta_{bio} + (H + P_{ee} + KV + MK_L) \cdot K_L \cdot T_L / \eta_{bio} \quad (9)$$

missä,

H = Polttoaineen hinta portilla [€/MWh]

MK = Muuttuvat käyttökustannukset [€/MWh]

K = Kulutussuhde

T = Tuotettu energia [MWh/a]

η_{bio} = biopolttoaineen aiheuttama hyötysuhteen väheneminen

KV = Kaukolämpövero [€/MWh]

alaindeksit

L = Lämpö

S = Sähkö

Biopolttoaineen käyttö kuuluu uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotukeen, jolloin biopolttoaineella tuotetusta sähköstä saadaan tuotantotukea (ST). Tämän tuotantotuen määrät on esitelty kappaleessa 4.1.1 kaavassa 1 ja oletetut muutokset tuotantotukeen on esitelty kappaleessa 4.2.4 kaavassa 2 ja 3.

Tämän lisäksi biopolttoaineiden poltto vähentää rikinpoistossa käytettävien kemikaalien määrää ja lopputuotteen määrää (RPL). Nämä tullaan esittämään tarkemmin kappaleessa 7.2.

Kustannuslaskelmiin kuuluvat vielä polttoainekohtaiset kustannukset, kuten hakkeen kuivaukseen kulutetun lämmön kustannukset (HKKL), joka voidaan laskea kaavalla 10.

$$HKKL = \left((H_{kh} + P_{ee} + MK_L) \cdot K_L \cdot HKL \cdot (1 - X) + (H_{hake} + MK_L) \cdot K_L \cdot \frac{HKL}{\eta_{bio}} \cdot X \right) \cdot (1 - \eta_{kuivain} \cdot \eta_{kattila}) \quad (10)$$

missä,

HKKL = Hakkeen kuivaamiseen tarvittava kaukolämpö [€/a]

H = Polttoaineen hinta portilla [€/MWh]

HKL = Hakkeen kuivaamiseen tarvittava kaukolämpö [MWh/a]

X = Biopolttoaineen osuus tuotannosta [%]

η = Hyötysuhde [%]

alaindeksit

hake = Hake

kattila = Kattila

kh = Kivihiili

kuivain = Hakekuivain

Kun nämä kaikki lasketaan yhteen saadaan alla oleva kaava 11, josta voidaan laskea vuotuiset kustannukset tuotetulle energiamäärälle.

$$(H + P_{ee} + MK_S) \cdot K_S \cdot \frac{T_S}{\eta_{bio}} + (H + P_{ee} + KV + MK_L) \cdot K_L \cdot \frac{T_L}{\eta_{bio}} + HKKL - T_S \cdot ST + A + HK - RVS \quad (11)$$

missä,

RVS = Rikin vähenemisen tuomat säästöt [€/a]

Vaikka vuotuiset kustannukset ovat alhaisemmat kuin hiilellä, ei tämä välttämättä tarkoita, että investointi on kannattava. Yritykset laskevat yleensä investoinnin sisäisen korkokannan (i_{sis}), jotta voidaan arvioida investoinnin kannattavuus. Investointi on tuottava, jos sen sisäinen korkokanta on suuri. Yritykset asettavat tyypillisesti itselleen kriteerin, jonka mukaan investointiprojekteilta vaaditaan tietyn arvon ylittävän sisäinen korkokanta. (Vaasan Yliopisto) Yleisesti on arvioitu, että jos investointi on kannattava, tulisi sisäisen korkokan-

nan olla yli 9 %. Koska jälleenmyyntiarvoksi on oletettu jo aikaisemmin 0 €, sisäisen korkokannan kaava 12 yksinkertaistuu muotoon.

$$-I + \sum_{t=1}^n \frac{k_t}{(1+i_{\text{sis}})^t} = 0 \quad (12)$$

missä,

k_t = Vuotuinen erotuskassavirta biopolttoaineen ja hiilen välillä [€/a]

i_{sis} = Sisäinen korkokanta [%]

5.6 Biopolttoaineiden polttokokeilut

Eri biopolttoaineista on kokeiltu polttaa rinnakkaispolttona hiilipölypolttokattiloissa. Tässä osiossa käymme läpi erilaisia polttokokeita ja minkälaisia käyttökokemuksia niistä on saatu.

5.6.1 Sahanpurun poltto

Sahanpurun sopii erinomaisesti polttoaineeksi pölypolttoon kivihiilen rinnalla. Fortum teki kaksi 3 kk kestävää koepolttoa Naantalın 315 MW kivihiilipölykattilassa vuosina 1999 ja 2000. Tässä koepoltossa he testasivat, kuinka sahanpuru käyttäytyy kivihiilen kanssa, jos voimalaitokselle ei tehdä minkäänlaisia muutoksia. Sahanpurun ja kivihiilten aineominaisuudet näkyvät liitteen 1 taulukossa 59 ja tuhkan aineosuudet taulukosta 60. Sahanpurua poltettiin kolmena eri seoksena. Taulukossa 14 on kuvattu eri seoksien osuudet. (Savolainen K. 2003, 369.)

Taulukko 14: Sahanpurun osuus hiili-sahanpuru seoksesta (Savolainen K. 2003, 375)

Osuus sahanpurua	Seos 1	Seos 2	Seos 3
Polttoaineen teho (MW _{pa} %)	2,5	4,0	8
Massaosuus (massa %)	9	14	25
Tilavuus osuus (tilavuus %)	25	33	50

Sahanpuruaine oli mäntyä, joka sekoitettiin hiilen sekaan hiilikentällä. Koska sekoitus oli silmämääräistä, eikä polttoaine ollut täysin homogeenista, sahanpurupitoisuuden vaihtelu oli oletettavissa. Hiili-sahanpurun kuljetuksessa ei havaittu minkäänlaisia ongelmia. Naantalin voimalaitoksella on kolme hiilimyllyä joiden kapasiteetissa havaittiin ongelmia poltettaessa yli 4,0 MW_{pa} % teholla sahanpurua. Hiilimyllyjen kapasiteetti ei riittänyt jauhaamaan sahanpurua, kun sahanpurua oli polttoaineesta 8 MW_{pa} %. Tällöin kattilan tehoa rajoitettiin 75 %:n. Hiilimyllyjen jälkeen otetuista näytteistä huomattiin, että hiili-sahanpurun partikkelikoko on kasvanut taulukon 15 mukaisesti. Partikkelien koon kasvun lisääntyminen ja pienempien partikkelien vähentyminen kasvatti palamattoman hiilen osuutta tuhkassa. (Savolainen K. 2003, 374, 376)

Taulukko 15: Yhteispolton vaikutukset hiilimyllyihin (Savolainen K. 2003, 376)

Partikkeli koko	Puolalainen hiili			Puolalainen hiili + seos 2		
	Mylly 7	Mylly 8	Mylly 9	Mylly 7	Mylly 8	Mylly 9
> 2mm	0	0	0	0,2	0,2	0,7
> 0,6 mm	0,3	0,3	0,2	3,1	3,1	6,0
< 150 µm	94	93	89	89	89	81
< 75 µm	78	74	73	73	73	63

Polttoaineen syttyvyys ja liekin stabiilisuus oli normaalia kaikilla sahanpuru-hiiliseoksilla, joka oli stabiilisti polttavien low-NO_x –polttimien ansiota. Sahanpurun vähäisen typpipitoisuuden ansiosta NO_x päästöjen pitäisi olla pienemmät kuin hiilellä, mutta suuren kosteus- ja palamattomuuden takia polttoaineen syttyminen saattaa viivästyä jolloin NO_x päästöt kasvavat. Palamattoman polttoaineen osuudella on vaikutusta myös NO_x päästöihin. Mitä suurempi palamattomien osuus polttoaineessa on, sitä pienemmät ovat NO_x päästöt. Koepoltossa sahanpuru-hiili seoksen partikkelikoko oli isompi ja palamattomien osuus kasvoi, jonka seurauksena NO_x päästöt saattoivat olla normaalia pienemmät. Testin aikana likaantuminen ja kuonaantuminen olivat normaalilla tasolla. Testin aikana ei huomattu myöskään eroa lämmönsiirrossa verrattuna normaalikäyttöön. (Savolainen K. 2003, 377, 378)

Vähärikkisen sahanpurun ansiosta rikkipäästöt vähenivät hiukan yhteispoltoissa. Rikin poistotase oli myös alhaisempi, kuin pelkän hiilen poltoissa. Hiukkaspäästöt eivät muuttu-

neet yhteispolton seurauksena. Sähkösuodattimen jännite oli alussa hiukan korkeampi sahanpuru-hiili seoksella mutta tasaantui ajan myötä. (Savolainen K. 2003, 378, 379)

Kokeen myötä kävi ilmi, että sahanpurun polttamisella voidaan vähentää CO₂, SO₂ ja NO_x päästöjä. Ainoaksi ongelmaksi muodostuu polttoaineen partikkelikoko. Tavalliset hiilimyllyt eivät pysty jauhamaan polttoainetta tarpeeksi pieneksi. Kokeesta havaittiin, että kriittinen partikkelikoko on noin 1 mm. Jotta näin pieneen partikkelikokoon päästäisiin tarvittaisiin mikro-mylly järjestelmä, joka on huomattavasti kalliimpi kuin tavallinen mylly. Mikro-mylly järjestelmän käytössä täytyy ottaa huomioon kasvava pölyräjähdysvaaraa. Toinen vaihtoehto olisi rakentaa oma linjasto sahanpurulle tai muulle biomassalle. Biomassa ohjataan omaan normaaliin myllyyn, jonka jälkeen se siirtyy polttimolle. Poltin sekoittaa polttoaineet juuri ennen polttoa, tai biomassaa syötetään polttimosta omasta putkesta suoraan liekkiin. Nämä tekniikat mahdollistavat erityiset bio-hiilipolttimet, jolloin bioaineen partikkelikoko voi olla 100 % < 8 mm ja 30–40 % < 1 mm. Tällöin biopolttoaineella voidaan korvata 5–30 % hiilestä. (Savolainen K. 2003, 379, 380)

5.6.2 Pellettin poltto

Ranskassa tehdyssä kokeellisessa pelletin ja hiilen pölypolttokokeessa poltettiin Eteläafrikkalaista kivihiiltä ja pelletöityä sahanpurua. Kokeessa käytetyn pelletin osuus oli 0 %, 5 %, 10 %, 15 % ja 20 % polttoaineen painosta (tuotetusta lämmöstä osuudet olivat 0 %, 3,6 %, 7,6 %, 12 % ja 17 %). Polttolaitos oli 3 MW_{th}:n horisontaalinen sylinteri, jossa käytettiin Low-NO_x -poltinta ja jota jäähdytettiin vedellä. Low-NO_x -polttimessa käytettävät sekundaari- ja tertiääri-ilma esilämmitetään 368–408 °C:een, jolla varmistetaan tasainen palaminen. Kokeessa tutkittiin liekin värähtelyn taajuutta, kiinteiden aineiden lämpötila-faaseja, kaasufaasien lämpötiloja, savukaasupäästöjä, lentotuhkaa ja sen palamattomia hiilipartikkeleita. Kokeessa käytetyn pelletöidyn sahanpurun sekoitus oli 80 % tammea ja 20 % mäntyä, jonka ainekoostumus on esiteltynä liitteessä 1 taulukossa 61 eteläafrikkalaisen hiilen kanssa. (Molcan P. 2009, 2328 – 2330)

Kuten sahanpuruakin poltettaessa, pellettien jauhannassa esiintyi ongelmia partikkelin koon kanssa. Partikkelit olivat huomattavasti isompia kuin pelkkää hiiltä poltettaessa. Tämä johtuu biomassan suuresta kuitupitoisuudesta, joka vaikeuttaa jauhantaa. Tutkimukses-

sa havaittujen tietojen mukaan tulen stabiiliudella on merkittävä vaikutus päästöihin. 5 % ja 15 %:n polttosuhteella oli suurin epästabiilisuus liekissä, jolloin NO päästöt olivat korkeimmillaan. Taulukosta 16 nähdään päästöjen ja taulukosta 17 lentotuhkan osuudet eri polttosuhteilla. (Molcan P. 2009, 2333)

Taulukko 16: Savukaasupäästöjen osuus eri biomassaosuuksilla (Molcan P. et al. 2009, 2333)

Biomassan osuus (p-%)	O ₂ (%)	CO ₂ * (%)	CO* (mg/Nm ³)	NO* (mg/Nm ³)	SO ₂ * (mg/Nm ³)
0	6,33	12,97	292	615	896
5	4,47	14,68	170	945	622
10	3,35	15,93	136	672	852
15	4,00	15,98	82	989	447
20	5,98	13,26	79	783	693

* 6 % O₂

Taulukko 17: Lentotuhkan analyysi (p-%) (Molcan P. et al. 2009, 2333)

Biomassan osuus (p-%)	Palamaton hiili	Haihtuvat aineet	Reagoimattomat aineet
0	29,23	5,07	65,70
5	25,63	3,57	70,80
10	24,54	3,86	71,60
15	12,95	3,85	83,20
20	8,84	3,96	87,20

Taulukosta 16 huomataan että NO_x päästöt ovat hyvin riippuvaisia liekin stabiiliudesta. Biomassa sisältää vähemmän rikkiä kuin hiili, joten voisi olettaa, että rikkidioksidipäästöt myös vähenisivät. Kuitenkin poltettaessa 10 % biomassaa rikkipäästöt olivat 852 mg/Nm³ jotka ovat kohtuuttoman korkeat. Tämän voi johtua SO₃:n pitoisuuksien vähenemisestä lentotuhkassa. Kokeessa huomattiin samanlaisia yhtäläisyyksiä SO₂ ja SO₃ pitoisuuksien välillä. Kyseisestä ilmiöstä tulisi tehdä lisäselvityksiä. Taulukosta 17 käy ilmi, että palamattoman hiilen osuus lentotuhkassa on huomattavan suuri. Tämä voi johtua kahdesta syystä. Yksi osasyys voi olla polttokammio, joka oli vesijäähdytteinen horisontaalinen sylinteri. Vesi jäähdyttää sylinteriä, jolloin palaminen sylinterin seinän lähellä heikkenee ja hiilipitoisuus kasvaa. Toinen osasyys voi olla hiilen huono laatu. Tästä huolimatta, lisäämällä biomassaa hiilen sekaan palamattomien määrä vähenee. Tämä johtuu biomassan haihtu-

vista aineista, jotka aikaistavat polttoaineen syttymistä ja vähentävät hiilen osuutta lentotuhkassa. (Molcan P. 2009, 2333)

Taulukosta 18 nähdään, että lentotuhkan alkalimetallien, kuten Na, K ja P_2O_5 , osuudet kasvavat rinnakkaispoltossa erityisesti, kun biomassan osuus on yli 15 %. Alkalimetallien suuri pitoisuus alentaa tuhkan sulamispistettä, joka johtaa likaantumiseen, kuonaantumiseen ja korroosio-ongelmiin. (Molcan P. 2009, 2333, 2334)

Taulukko 18: Reagoimattoman materiaalin mineraali analyysi (p-%) (Molcan P. et al. 2009, 2333)

	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
SiO_2	42,5	44,9	41,9	44,9	42,6
Al_2O_3	29,4	31,5	30,9	31,1	31,4
CaO	8,09	7,51	8,76	6,6	9,23
Fe_2O_3	5,72	4,76	4,95	4,74	4,07
SO_3	2,54	1,47	1,66	1,16	1,6
MgO	1,64	1,39	1,64	1,11	1,85
TiO_2	1,4	1,68	1,57	1,58	1,67
P_2O_5	1,35	1,59	1,68	1,49	1,53
K_2O	0,643	0,661	0,781	0,865	0,852
Na_2O	0,101	0,097	0,127	0,073	0,128
Muut Oksidit	6,616	4,442	6,032	6,382	5,07

Kokeen tuloksista voidaan päätellä, että pellettien poltto hiilipölykattilassa parantaa poltt ominaisuuksia vähentämällä jäännöshiilen osuutta sekä CO_2 -, SO_2 - ja NO_x -päästöjä. Päästöjen vähennys ei ole itsestäänselvyys, vaan liekin stabiilius tulee huomioida, jotta palaminen olisi mahdollisimman tasaista. Suurten määrien polttaminen saattaa aiheuttaa likaantumista ja kuonaantumista biomassan suuren alkalipitoisuuden osalta. (Molcan P. 2009, 2334)

Ranskassa tehdyn tutkimuksen tuloksia tukee myös Helsingin Energian (Lampio R. 2002, 70, 87, 88.) syksyllä 2001 tekemä tutkimus, jossa kokeiltiin pelletin polttoa Salmisaaren kivihiililaitoksessa. Kokeessa poltettiin pellettiä noin 4 p-% kattilaan syötetystä polttoaineesta. Kokeessa huomattiin, että seospoltossa typpioksidipäästöt ja palamattoman hiilen osuus tuhkassa hieman kasvavat. Pelletti on sitkeämpää polttoainetta kuin kivihiili, jonka vuoksi jauhanta heikkeni ja partikkelikoko kasvoi. Tämä voi selittää typenoksidien ja pa-

lamattoman hiilen osuuden kasvun. Pellettien haihtuvien aineiden aiheuttama korkeampi paikoittainen lämpötila ja suurempi partikkelikoko voi nostaa typpioksidien ja palamattomien hiilipartikkelien osuutta. Kokeessa käytettiin kuularengasmyllyä, jonka vuoksi partikkelikoko jäi suureksi. Parempi jauhatus johtaisi pienempiin puupartikkeleihin ja täydellisempään palamiseen.

Savukaasussa hiilimonoksidin osuus pieneni ja hapen osuus kasvoi. Tämä voi johtua pelletin sisältämän hiilen vähyydestä verrattuna kivihiileen. Kokeessa havaittiin myös hiilimyllyn pienentynyt tehontarve seospoltossa (noin 7 % pienempi). Tästä on etua seospolton kannalta, koska tällöin myllyn läpi on mahdollista ajaa normaalia suurempi polttoainevirta. Tosin suurempi virtaus heikentää kattilan hyötysuhdetta. Kokeessa ei saatu luotettavaa tietoa rikkipäästöistä, koska rikkidioksidin mittauslaite sammui kokeen alussa. (Lampio R. 2002, 84, 87, 88.)

Lampio R.:n (2002, 49, 50.) mukaan Turun Linnankadun 100 MW:n kivihiilikattilassa käytetään 10–15 % puupellettejä. Puupellettien poltosta on saatu paljon hyvää palautetta, mutta joitain ongelmiakin on ollut. Hienojakoinen puupöly sotkee paikkoja ja holvaa erittäin helposti. Pelletit kuljetetaan Turun voimalaitokselle pneumaattisilla säiliöautoilla, jolloin autojen lastausmenetelmät ja puhallus rikkovat pellettejä. Ongelmia on myös kuljetushihnoilla, jossa pelletit pomppivat ja varisevat pois. Linnankadulla käytettävät viljansiirto-ruuvit ovat liian kevyitä ja ne jumiutuvat helposti. Näiden lisäksi pellettien laskutorvena käytettyihin muoviputkiin syntyi runsaasti staattista sähköä ja ne jouduttiin maadoittamaan.

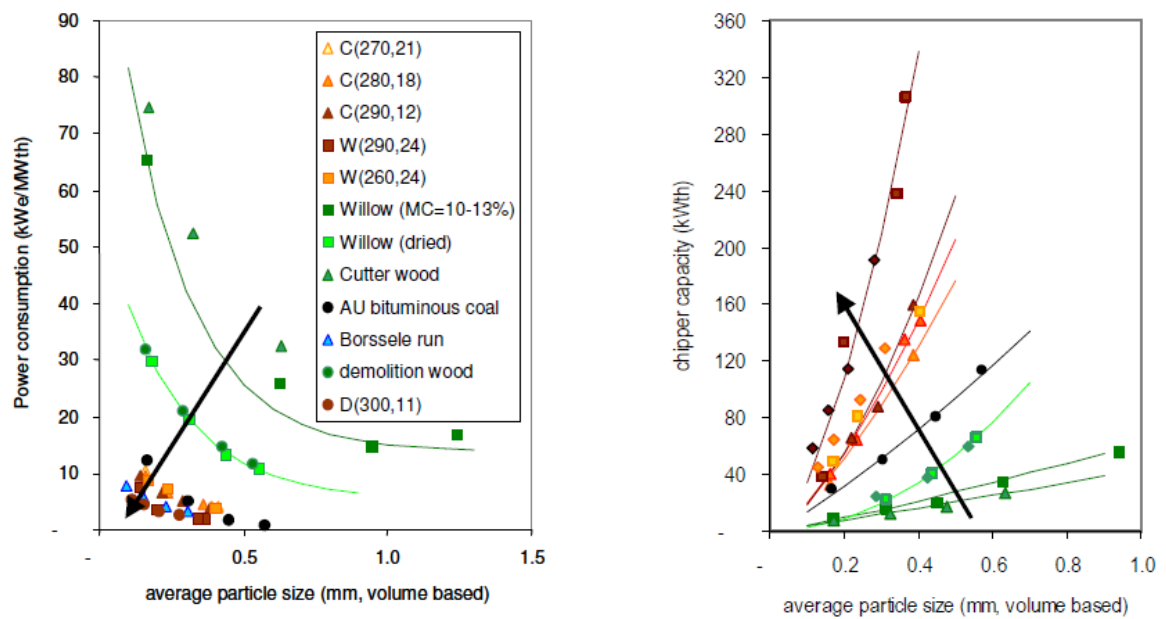
5.6.3 Torrefioidun biohiilen poltto

Hämäläinen E.:n ja Heinimö J.:n (2006, 17.) mukaan torrefioitua puupolttoainetta on kehitetty voimalaitoskäytössä Alankomaissa Essent Energie B.V.:n Borssele voimalaitoksessa vuonna 2003. Torrefioitua puuta sekoitettiin polttoaineeseen noin 9 %:n pitoisuus ja palamista tutkittiin. Pitoisuutta nostettiin asteittain ja vertailtiin polton käyttäytymistä. Voimalaitoksen suuren koon vuoksi testaukseen varattu 20 tonnia torrefioitua puuta kului hyvin nopeasti ja seoskattoa ei saavutettu, jossa torrefioidun hakkeen polttaminen olisi ollut prosessin kannalta haitallista. Vaikka testituloksia saatiin vähän, merkittävää oli todeta, että torrefioitua puuta voidaan polttaa kivihiilen seassa.

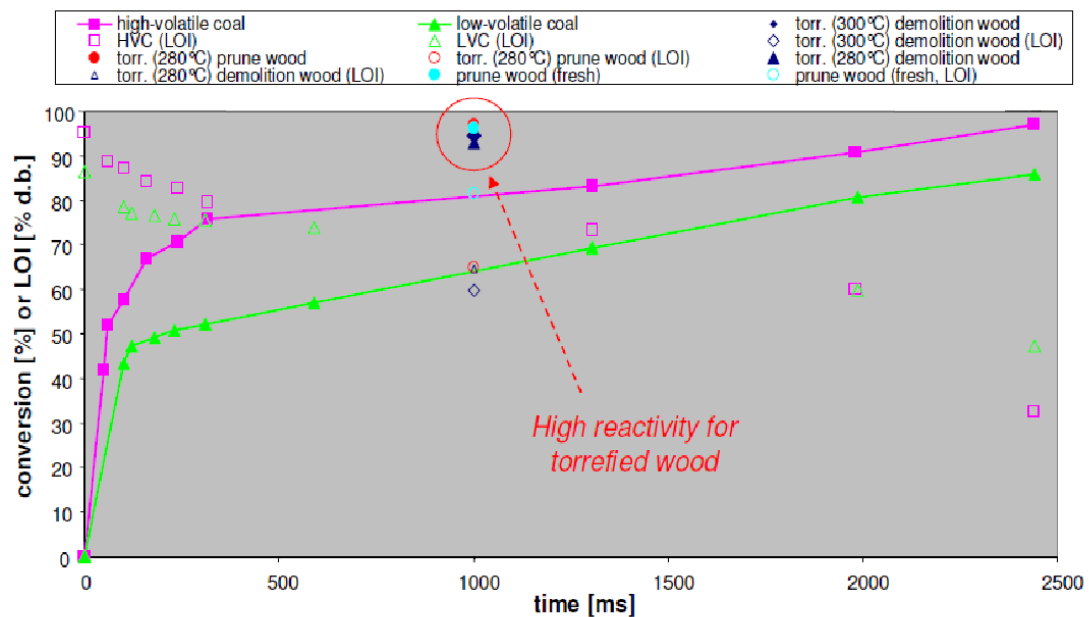
Vattenfall teki maailman ensimmäisen suuren kokoluokan polttokokeen Reuter Westin 600 MW:n CHP laitoksessa Berliinissä kesällä 2011, jossa poltettiin 4 300 tonnia torrefioitua pellettiä kivihiilen rinnakkaispolttona. Testissä poltettiin viisi päivää 20 %:n polttoainesekoituksella, kaksi päivää 35 %:n polttoainesekoituksella ja kaksi päivää 50 %:n polttoainesekoituksella. Testillä todistettiin, että torrefioidun pelletin poltto kivihiilen rinnakkaispolttona on mahdollista. Hiilimyllyt osoittautuivat suurimmiksi rajoittaviksi tekijöiksi. Torrefioidun pelletin jauhaminen kulutti hieman enemmän energiaa kuin kivihiilen yli 20 %:n polttoainesekoituksilla. Testissä huomattiin myös, että polttoaineen syötössä syntyi enemmän pölyä torrefioitujen pellettien johdosta, joka voi johtaa pölyräjähdykseen. Tämä ongelma ratkaistiin lisäämällä myllyyn vesisumute, joka suihkuttaa vettä vain litran tonnia torrefioitua pellettiä kohden. Tällöin pelletti ei kastu, mutta pölyä syntyy vähemmän. Vesisumute oli hyvin pieni investointi. (Argus, 2011; Vattenfall, 2011.)

Amerikassa ollaan myös kiinnostuneita torrefioidusta pelletistä. The Tennessee Valley Authority (TVA), joka on valtion omistama energialaitos, on tehnyt useita laboratoriokokeita torrefioidusta biomassasta. TVA:n laboratoriokokeiden mukaan torrefioitua biomassaa voidaan hyvin polttaa pölypolttokattilassa ilman suuria laitosinvestointeja. Torrefioitu biomassa on hydrofobista, jolloin se ei kerää hyönteisiä tai mätäne, kun sitä varastoidaan. TVA:lla on tavoitteena tehdä isompia laitoksia, mutta torrefioidun biomassan saatavuus suurille määrittelyille on hyvin vaikeaa. (Austin A. 2011.)

Energy research Centre of the Netherlands (ECN) on yksi johtavimmista torrefioitua biomassaa tutkivista laitoksista. Heidän tekemissään laboratoriokokeissa on osoitettu, että torrefioitu biomassa on hyvä polttoaine rinnakkaispolttoon hiilen kanssa. Alla olevasta kuvasta 22 nähdään, että torrefioitu biomassa jauhautuu huonolaatuista bitumihiiltä helpommin, jolloin myllyn tarvitsema teho vähenee ja kapasiteetti kasvaa. Kuvaan on merkitty torrefioidun biomassan lyhenteet jyrsinpuulle (C, eli Cutter wood) ja pajulle (W, eli willow), jonka jälkeen sulkujen sisällä on kerrottu torrefiointi lämpötila (°C) ja aika (min). Kuvassa 23 on esitelty torrefioidun biomassan palaminen laboratorio-olosuhteissa, josta nähdään että torrefioitu biomassa palaa hyvälaatuista hiiltä nopeammin. (Kiel J. 2007.)



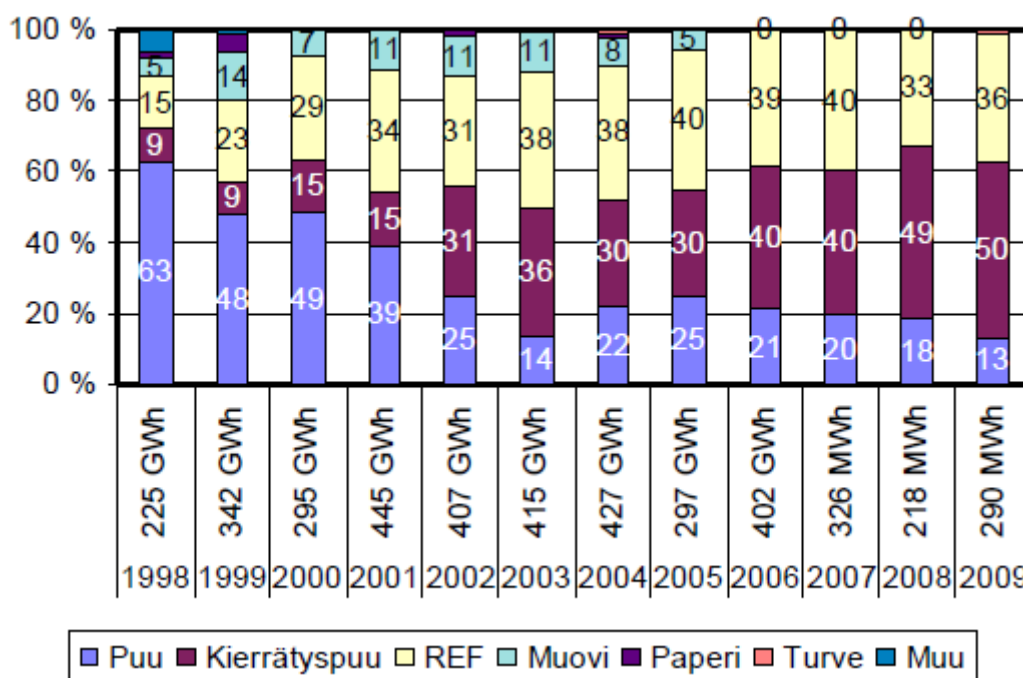
Kuva 22: Torrefioidun biomassan jauhattavuus (Kiel J. 2007.)



Kuva 23: Torrefioidun puun palamisreaktiivisuus laboratorioasteisella palamis-simulaattorilla testattuna (Kiel J. 2007.)

Torrefioidun biohiilen poltossa on arvioitu olevan samoja ongelmia likaantumisessa, kuonaantumisessa, eroosiossa ja korroosiossa, aivan kuten poltettaessa muitakin puuperäisiä biomassoja. Tämä johtuu lähes samasta tuhkapitoisuudesta ja tuhkan ainekoostumuksesta kuiva-aineessa. (Livingston W. R. 2011, 11, 12.) Fysikaalisten- ja kemiallisten ominaisuuks-

Lahden kymijärven voimalaitoksella polttoaineena kaasuttimessa voidaan käyttää puujätettä, haketta, turvetta, rengasmursketta, muovia ja lajiteltua yhdyskuntajätettä (REF). Kuvas-
ta 25 nähdään kaasuttimen eri polttoaineiden vuotuinen energijakauma. Tuotekaasu sisältää 30–58 % vettä, 78–39 % palavia aineita ja 1–2 % tuhkaa. Kaasutin syöttää tuotekaasua voimalaitoksen 350 MW:n lämpötehoiseen kivihiili/maakaasukattilaan. Kaasuttimella voidaan korvata 15 % muutoin tarvittavasta kivihiilen määrästä. Kaasuttimella tuotettu polttoaine vähentää yli 10 % hiilidioksidipäästöjä, 5 % typenoksidipäästöjä, 10 % rikkidioksidipäästöjä ja yli 40 % hiukkaspäästöjä. Myös raskasmetallipitoisuudet vähenevät. (Huhtinen M. et al. 2004, 182; Lahden Energia, a; Nieminen J. Kivelä M. 1998, 252, 253.)

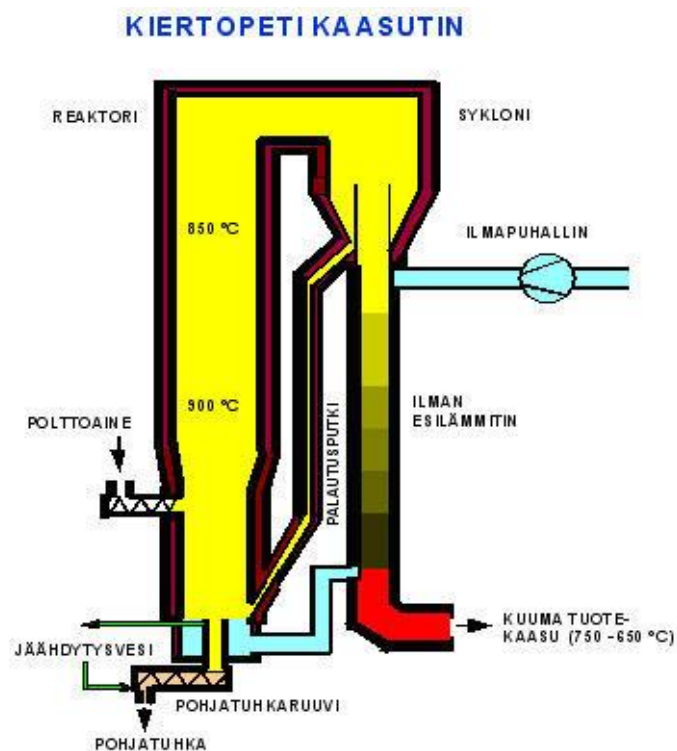


Kuva 25: Lahden kaasutuslaitoksen polttoaineen vuotuinen energijakauma (Kivelä M, 2010)

Kymijärven polttolaitos on alun perin vuodelta 1976 rakennettu raskaanöljynpolttolaitos. Vuonna 1982 laitos muutettiin polttamaan hiiltä ja vuonna 1986 laitokselle lisättiin kaasuturbiini, jossa tuotetaan sähköä ja ylimääräinen lämpö siirretään kattilan ekonomaiseriin. Polttolaitos on sähköteholtaan 167 MW_e, kaukolämpöteholtaan 240 MW sekä kaasuturbii-
nin sähköntuotto on 49 MW_e, kun ulkona on -25 °C. Kattilaa käytetään keskimäärin 7 000 h/a. Kesällä kattila ei ole toiminnassa ollenkaan ja keväällä sekä syksyllä siinä poltetaan ainoastaan maakaasua. Polttolaitos tuottaa noin 1 200 GWh/a (180 000 ton/a) hiilellä ja noin 800 GWh maakaasulla. Kattilalaitos ei ole varustettu rikinpoistojärjestelmällä, mutta

se hyödyntää vähärikkistä hiiltä, jossa rikkiä on vain 0,3–0,5 %. Polttimot on varustettu savukaasun kierrätyksellä ja asteittaisella poltolla, jotta NO_x päästöt pysyisivät alhaisina. (Nieminen J. Kivelä M. 1998, 252, 253.)

Kymijärvellä käytetty kiertoleijupeti (CFB) kaasutuslaitos on kuvan 26 mukainen ilmanpaineessa toimiva laitos. Kaasutuslaitoksen polttoaineet otetaan vastaan kahdessa eri vastaanottohallissa. Polttoaineet seulotaan ja murskataan, jonka jälkeen ne kuljetetaan polttoainesiiloon. Siilon tarkoituksena on säilöä ja homogenisoida murskattua polttoainetta ennen kaasutusta. Laitoksen sisäpuolelta muurattu terässylinteri muodostaa kaasutinreaktorin. Prosessissa polttoaine syötetään reaktorin alaosaan leijutuskaasuna käytetyn esilämmitetyn ilman joukkoon. Kun käytetään ilmakerrointa 0,5 reagoi polttoaine osittain ilman hapen kanssa ja reaktorin lämpötila nousee noin 850–900 °C:een, jolloin loppu polttoaine kaasuuntuu. Syklonissa erottuvat kiertävä petimateriaali ja mahdolliset kaasuuntumattomat hiilipartikkelit tuotekaasusta ja palautuvat takaisin reaktoriosaan. Tuotekaasu, jonka tyypillinen kosteuspitoisuus on noin 50 % ja lämpöarvo noin 2,2 MJ/kg, johdetaan polttoon ilman esilämmittimien kautta. Tuotekaasu sisältää haihtuvien aineiden lisäksi myös pieniä määriä tuhkaa. Karkea kaasuuntumaton tuhka poistetaan kaasulaitoksen pohjalta vesijäähdytteisellä ruuvikuljettimella. Koska polttoaine saattaa sisältää erilaisia kiinteitä epäpuhtauksia REF:stä ja purkupuujätteestä (nauloja, ruuveja, metallijousia), kaasutuslaitoksen ruuvituhkakuljettimet ja leijutusilmapuhaltimet ovat erikoissuunniteltuja kierrätyspolttoaineille. (Huhtinen M. et al. 2004, 182; Lahden Energia, a; Nieminen J. Kivelä M. 1998, 252 – 257.)



Kuva 26: Kiertopetikaasutin (Lahden Energia, a.)

Kymijärven kiertopetikaasutuslaitoksen arvioitiin maksavan 11 milj ECU eli 11 milj euroa, josta tukia saatiin 3 miljoonaa euroa. (Nieminen J. Kivelä M. 1998, 257.)

Poltettavan kaasun heikon lämmönsäteilyn johdosta tulee biokaasupolttimoiden sijaita hiilipolttimoiden alapuolella. Kuten kappaleessa 5.1.4 todettiin, tällöin kaasu luovuttaa lämpöä konvektion kautta kiinteille partikkeleille, jotka säteilevät lämpöä kattilan keittopinnoille. Tällöin myös palamattomien partikkeleiden määrä vähenee. (Karjalainen P. 2012; Raiko R. et al. 2002, 107–109.)

Kymijärven tapainen kiertopetikaasutuslaitos, joka käyttää biopolttoainetta, tuottaa energiaa noin 85–90 %:n hyötysuhteella. Tällöin kaasutuksessa tuotettu lämpö otetaan talteen ja syötetään kivihiilikattilan lieriöön. (Karjalainen P. 2012; Lillman E. 2011.)

Uusien tiukempien päästölainsäädäntöjen myötä osittain REF -polttoainetta käyttävien kaasutuslaitosten täytyy puhdistaa tuotekaasu ennen sen polttamista kattilassa. Kaasun puhdistukseen on olemassa kylmä- ja kuumamenetelmä. Kylmämenetelmä, eli märkäpuhdistus toimii yleensä alle 150 °C:n lämpötilassa. Kaasuttimen ja syklonin jälkeen tuotekaasu jäähdytetään ja pestään vedellä, jolloin loput hiukkaset, alkali- ja raskasmetallit, valta-

osa typpiyhdisteistä ja kaasussa olevat orgaaniset yhdisteet (tervat) poistuvat. Ongelmaksi muodostuvat puhdistusvedet, jotka sisältävät kaikki kaasusta erotetut epäpuhtaudet, jolloin voimalaitos on varustettava tehokkaalla jätevedenpuhdistuksella. Kylmäpuhdistusmenetelmällä voidaan saavuttaa kaasuturbiinien vaatima puhdistustaso. (Raiko R. et al. 2002, 574, 575.)

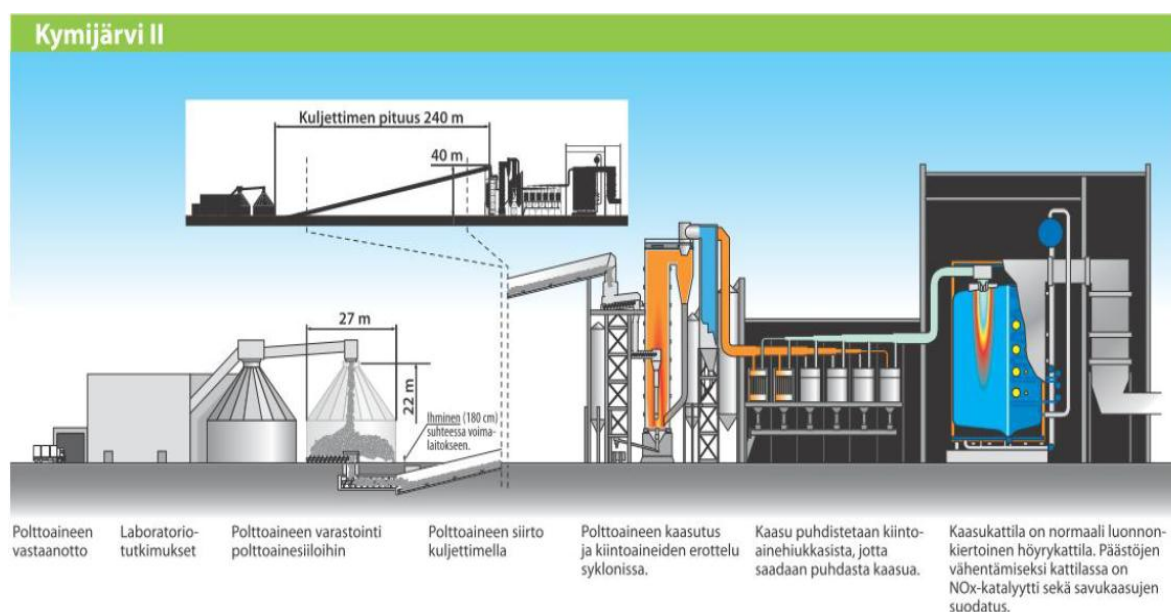
Kuumamenetelmiä on yksinkertaisempi prosessi, joka korottaa kokonaishyötysuhdetta ja välttää jäteveden puhdistuksen. Tuhka saadaan prosessista ulos kuivana. Kuumamenetelmässä tuotekaasu jäähdytetään 300–600 °C:een, jonka jälkeen se johdetaan suodattimien läpi. Suodattimilla saadaan erotettua suurin osa kaasun hiukkasista ja alkaleista. Yli 600 °C kuumamenetelmiä on kehitetty, mutta suodatustehokkuus ei ole riittävä ja yleisimmät suodatinmateriaalit eivät kestä näin kuumia olosuhteita. (Raiko R. et al. 2002, 575.)

Pelkkää biopolttoainetta kaasutettaessa ei välttämättä tarvitse asentaa kallista tuotekaasun puhdistuslaitteistoa. Biopolttoaineen tuotekaasu on tarpeeksi puhdasta, jotta sitä voidaan polttaa sellaisenaan kattilassa. Biopolttoaineen tuotekaasun puhdistusta tarvittaisiin, jos kaasu poltettaisiin kaasuturbiinissa.

Koska Kymijärven kaasutuslaitos on toiminut erinomaisesti, on Lahden Energia rakentanut toisen kaasutuslaitoksen Kymijärvi 2:n, jonka yhteenlaskettu polttoaineteho on 160 MW. Laitos tuottaa sähköä 50 MW ja lämpöä 90 MW, jolloin laitoksen hyötysuhde on noin 87–88 %. Tämä uusi kaasutuslaitos on täysin erillään oleva vastapainevoimalaitos, joka käyttää polttoaineenaan RDF:a (Refuse Derived Fuel) ja REF:a (Recycled Fuel). RDF on valmistettu sekalaisesta yhdyskuntajätteestä (sekajäte, kuivajäte, kaatopaikkajäte) ja se on heikkolaatuisempaa kierrätyspolttoainetta kuin REF. (Lahden Energia, b.)

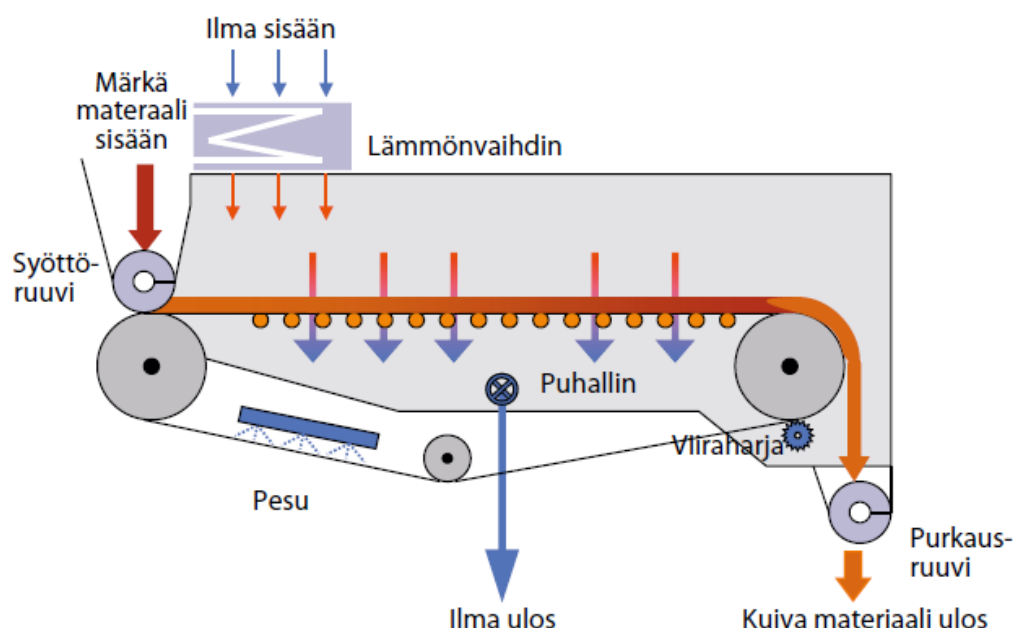
Kymijärvi 2 toimii kuvan 27 mukaisesti. Jätteen vastaanoton jälkeen jokainen jätekuorma tutkitaan laboratoriossa, jotta saadaan tarkka kuvaus jätteen laadusta. (Lillman E. 2011) Polttoaine varastoidaan ja kuljetetaan kuljettimilla kaasutuslaitokseen. Kaasutuslaitos on kiertoleijukaasutin, josta tuotekaasu jäähdytetään 400–450 °C:n lämpötilaan ennen puhdistusta. Tuotekaasu puhdistetaan ennen polttoa korroosiota aiheuttavista komponenteista, kuten HCl, pöly ja alkali. Puhdistuksen jälkeen tuotekaasu poltetaan kuvan 27 mukaisessa tornimaisessa kaasukattilassa. Hyvin puhdistetun tuotekaasun ansiosta kattilan höyryarvot ovat poikkeuksellisen korkeat: 120 bar, 540 °C. Polton jälkeen savukaasu puhdistetaan,

jotta voidaan varmistetaan, että laitoksen savukaasut saavuttavat jätteenpolttodirektiivin mukaiset päästörajat. Loppupuhdistus suoritetaan tavallisilla letkusuodattimilla, joiden etupuolelle voidaan syöttää haitta-aineiden sidontaa tehostavia lisäaineita, kuten aktiivihiiltä ja kalsiumhydroksidia. (Lahden Energia, b.) Kymijärvi 2 laitos maksaa noin 160 milj. €. (Lillman E. 2011)



Kuva 27: Kymijärvi 2 kaasutuslaitos (Lillman E. 2011.)

Toinen esimerkki kaasutusmenetelmän luotettavuudesta on Vaskiluodon Voiman Metsolta tilaama kaasutuslaitos. Tämä kaasutuslaitos on 140 MW biokaasutuslaitos, joka tuottaa kaasua puusta. Laitoksessa voidaan käyttää pieniä määriä peltobiomassaa ja sen varapolttoaineena toimii energiaturve. Tuotekaasu poltetaan Kymijärven kaasutuslaitoksen mukaisesti hiilipölypolttokattilassa. Kaasutuslaitos vähentää kivihiilen käyttöä 25–40 %. Vaskiluodon Voima on budjetoinut kaasutuslaitokseen 36 milj. €, joka sisältää TEM:n myöntämän 10,8 milj. € investointituen. Voimalaitoshankkeeseen kuuluu muun muassa biomassan vastaanotto, esikäsittely, kuvan 28 mukainen suuren kokoluokan KUVO-viirakuivauslaitos, kiertopetikaasutin ja nykyisen hiilikattilalaitoksen muutostyöt sekä koko toimituksen sähköistys ja automaatio. (Koskiniemi E. 2012; Ollila J. 2011.)



Kuva 28: KUVO-viirakuivain (Fiber&Paper&Power express, 2/2008, 6.)

KUVO-viirakuivain on Metson biomassakuivain kaasutukseen, pelletöinti prosesseihin ja polttolaitoksien energialähteisiin. Kuivaimen toiminta perustuu veden haihduttamiseen lämpimän ilmavirran avulla. Kuivaus sopii biomassoille, kuten kuorelle, hakkeelle tai sahanpurulle. Viirakuivaimen haihdutusteho on 2-20 tonnia vettä tunnissa ja sillä päästään alimmillaan 8 %:n jäännöskosteuteen. Kuivain pystyy hyödyntämään voimalaitoksen jäännöslämpöä tai kaukolämpöä. (Fiber&Paper&Power express, 2/2008, 6.) KUVO-viirakuivaimen on arvioitu käyttävän lämpöenergiaa noin 1,1 kWh per kg haihdutettua vettä. (Isaksson J. 2012.) KUVO-viirakuivaimen hyötysuhde saadaan laskettua kaavan 13 mukaisesti.

$$\frac{(c_{\text{vesi}} \cdot dT + c_{\text{höyry}}) \cdot \frac{0,277778 \text{ kWh/kJ}}{1000}}{Q_{\text{kuivain}}} = \eta_{\text{kuivain}} \quad (13)$$

missä,

c_{vesi} = Veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

dT = Veden lämpötilan nousu [K]

$c_{\text{höyry}}$ = Veden höyrystymislämpö [kJ/kg]

Q_{kuivain} = Kuivaamiseen tarvittava lämpöenergia [kWh/kg]

η_{kuivain} = Hakekuivaimen hyötysuhde [%]

Tällöin KUVO-viirakuivaimen hyötysuhteeksi saadaan noin:

$$\eta_{kuivain} = \frac{\left(4,186 \text{ kJ/kg} \cdot K \cdot 100 \text{ K} + 2260 \text{ kJ/kg} \right) \cdot \frac{0,277778 \text{ kWh/kg}}{1000}}{1,1 \text{ kWh/kg}} = 67,6 \%$$

5.6.5 Bio-SNG:n poltto

Bio-SNG on maakaasun veroista kaasua. Kaasu johdetaan maakaasuverkkoon, jolloin hiilipölykattilassa sitä pystytään polttamaan saman tavalla kuin maakaasua. Nykyään on useita hiilipölypolttokattiloita, jotka käyttävät maakaasua varapolttoaineena. Martinlaakso 2 on myös tällainen. Poltettaessa bio-SNG:tä rikki- ja hiukkaspäästöt vähenevät huomattavasti, koska kaasu ei sisällä lähes ollenkaan rikkiä eikä hiukkasia. Typpipäästöjen väheneminen riippuu kattilan polttoteknisistä ominaisuuksista.

Jotta bio-SNG:tä voidaan polttaa voimalaitoksella, täytyy kattilaan johtaa maakaasuputkisto. Kattilaan täytyy myös asentaa omat kaasupolttimet. Maakaasuputken vieminen voimalaitokselle saattaa maksaa huomattavia summia jos verkkoa ei ole lähistöllä.

5.6.6 Yhteenveto biopolttoaineiden polttokokeiluista

Biopolttoaineita käytetään jo nyt runsaasti hiilipölykattilassa rinnakkaispolttoaineina. Sahanpurua, pellettiä ja biokaasutusta on tutkittu paljon ja ne on todettu toimiviksi konseptiksi, jos kattilalaitokselle ollaan valmiita tekemään tarvittavia investointeja. Vaikka polttokokeissa on käytetty pieniä määriä biopolttoainetta polttoaineen tehoon nähden, suuremmilla investoinneilla esimerkiksi mikromyllyihin ja polttimiin voidaan päästä suurempiin biopolttoaineen polttoteho osuuksiin.

Torrefioidun biohiilen käyttö rinnakkaispolttoaineena on uutta tekniikkaa. Tätä on tutkittu voimalaitostasolla hyvin vähän, mutta tulokset ovat lupaavia. Laboratoriotasolla torrefioidun biohiilen käyttäminen hiilipölypolttokattilassa ei näyttäisi tuottavan ongelmia. Suu-

rimpana ongelmana on torrefioidun biohiilen saatavuus. Torrefioidun biohiilen voimalaitoskokeilut on tehty vasta lähivuosina, jonka johdosta teknisiä artikkeleita käyttökokemuksista on hyvin vaikea löytää. Tästä syystä tässä työssä on käytetty lähteenä tavallisia lehdistötiedotteita ja laboratoriokokeita.

Bio-SNG toimii hiilipölypolttokattilassa, koska se on täysin verrattavissa maakaasuun, jota on käytetty jo pitkään hiilen rinnakkaispolttoaineena. Suurien bio-SNG:n tuotantolaitosten toimintavarmuus on kuitenkin epävarma, sillä niitä ei ole ennen rakennettu. Euroopassa toimivat bio-SNG -laitokset ovat hyvin pieniä verrattuna esimerkiksi Joutsenoon suunniteltuun kaasutuslaitokseen. Kaasutuslaitoksen rakentaminen on suuri investointi ja laitoksen tulee olla maakaasuputkiston välittömässä läheisyydessä.

6 RINNAKKAISPOLTTOSENKENAARIODEN LUOMINEN

Tässä kappaleessa laaditaan skenaariot eri biopolttoainevaihtoehtojen ja käydään läpi voimalaitokselle tarvittavat muutokset ja investoinnit. Skenaarioissa pohditaan polttoaineen logistiikkaa, saatavuutta, varastointia ja voimalaitokselle vaadittavia muutoksia, kun biopolttoainetta poltettaisiin 10–50 % tuotetusta energiamäärästä. Skenaarioissa käytetyt luvut voimalaitokselle tehtävistä investoinneista kustannuksista on kerätty eri laitostoimittajilta, asiantuntija arvioista sekä arvioitu jo tehtyjen laitosten hinnoista.

Martinlaakso 2:sen polttoaineteho on 230 MW, jolloin se kuuluu IE-direktiivissä teholuokkaan 100–300 MW. (2010/75/EU, Liite V) Alla olevaan taulukkoon 19 on listattu Martinlaakso 2:sen nykyiset päästöt, IE-direktiivin liitteen V päästörajat kivihiilelle ja biomassalle sekä BAT alarajat.

Taulukko 19: Martinlaakso 2:sen päästöt ja päästörajat [mg/Nm³] (2010/75/EU, Liite V; Pöyry, 2010a, 11.)

	Martinlaakso 2 nykyiset päästöt	Liite V päästörajat kivihiilelle	Biomassan päästö- rajat liitteen V mu- kaan	BAT alaraja	Vähän käyvän laitok- sen jouston lievempi päästöraja (1500 h/a)
NO _x	450 – 500	200	250	90	450
SO ₂	400 – 550	250	200	100	800
Hiukkaset	1 – 8	25	20	5	

Taulukkoon 20 on laskettu IE-direktiivin mukaiset päästöraja-arvot ja vähennystarve nykyisellä polttoainesuhteella (90 % kivihiiltä, 10 % maakaasua).

Taulukko 20: Martinlaakson kivihiililaitoksen Mar. 2 IE-direktiivin mukaiset päästöraja-arvot ja nykyiset päästötasot (90 % kivihiili, 10 % maakaasu) [mg/Nm³] (Koivunen K, Salamäki J. 2011, 20)

	päästöraja-arvo	nykyinen päästötaso	päästövähennystarve
SO ₂	228	534	-57 %
NO _x	188	457	-59 %
Hiukkaset	9	4	-

Taulukosta 20 nähdään, että päästöraja-arvot ylittyvät niin NO_x kuin SO₂ päästöjenkin osalta. Jotta näihin päästörajoihin päästäisiin, tulisi Mar. 2:sen hiilikattilaan asentaa uuden-

laisia päästövähennystekniikoita. Näitä tekniikoita ovat muun muassa Low-NO_x polttimet, SNCR- ja SCR- typenpoistomenetelmät sekä SO₂ märkä- ja puolikuivapesurit. Hiukkaspäästöihin ei tarvitse puuttua, koska ne alittuvat niin liitteen V päästörajasta, kuin BAT alarajastakin. Mikäli biopolttoaineita päätetään käyttää, Mar. 2:ssa tulisi hiukkaspäästö-
joja tarkastella uudestaan. Taulukosta 19 nähdään, että biomassaa poltettaessa hiilen kanssa NO_x raja-arvot kasvavat ja SO₂ raja-arvot pienenevät.

Mar. 2:sen typpipäästöt ylittyvät taulukon 20 mukaan 59 %:lla. Typenoksidipäästöjä voidaan vähentää polttoteknisin keinoin, kuten palamisilman säädöillä ja Low-NO_x-polttimilla, mutta pelkillä polttoteknisillä menetelmillä ei välttämättä päästä IE-direktiivin asettamiin raja-arvoihin. Mar. 2:ssa on käytössä yläläimänsyöttö, joka vähentää typenoksidien muodostumista. Kattilan polttimet ovat alkuperäiset, joihin on myöhemmin asennettu venturikuristimet. Asentamalla uudet Low-NO_x-polttimet voidaan päästä asetetun päästö-
rajan alapuolelle. Voimalaitoksella on myös harkittu pienimuotoisen SNCR -menetelmän käyttöä, jos palamisilmasäädöillä ja polttimilla ei päästä tarvittavaan päästömäärään. Jos BAT -alaraja (90 mg/nm³) tulee saavuttaa, SCR on ainut mahdollinen keino päästä näin alhaiseen typpioksidien päästötasoon ja tällöinkin Mar. 2 saattaa tarvita Low-NO_x -
polttimia. (Pöyry, 2010b, 25) Koska typenoksidipäästöt riippuvat pääosin polttoteknisistä menetelmistä, ei niitä oteta skenaariotarkasteluissa huomioon. NO_x päästöjen pienentä-
miseksi joudutaan investoimaan joka tapauksessa polttoainevalinnasta riippumatta. Tarkkaan typenoksidipäästöjen tarkasteluun tarvitaan tietokonemallintamisohjelma, jonka vuoksi se on rajattu työn ulkopuolelle.

Martinlaakso 2:ssa on liian isot rikkipäästöt uudelle direktiiville. Taulukon 20 mukaan rik-
kidioksidipäästöjä tulisi vähentää 57 % nykyisestä. Mar. 2:ssa on tällä hetkellä käytössä puolikuivamenetelmä, joka pääsisi suunnitteluarvoillaan IE-direktiivin asettamiin päästö-
joihin. Jotta rikinpoistolaitoksen toimivuus varmistetaan, tulee letkusuodattimien pinta-
aloja suurentaa, jolloin savukaasupuhaltimien aiheuttama paine-ero ei kasvaisi liian suu-
reksi. Koska letkusuodattimien pidennys ei ole polttoaineesta riippuvainen, ei tätäkään
investointia oteta tässä tarkastelussa huomioon.

Alla olevasta taulukosta 21 nähdään kivihiilen tuottamat savukaasupäästöt tyypillisellä
Suomessa käytetyllä kivihiehellä. Taulukossa on laskettu, kuinka paljonko savukaasu sisäl-
tää CO₂:a, SO₂:a, N₂:ä, H₂O:ä ja Cl:a tuotettaessa 1 MJ lämpöenergiaa. Laskuissa on ole-

tettu, että kaikki polttoaineen tyyppi muodostaa typpikaasua, palaminen on täydellistä, tilanne ennen rikinpoistoa ja ilmankerroin on 1. Laskuissa on käytetty kivihiilen tehollisena lämpöarvona saapumistilassa 24,8 MJ/kg ja kosteuspitoisuutena 10 %, jolloin kosteaa hiiltä tarvitaan 0,0403 kg/MJ. (Alakangas E. 2000. 130, 154.)

Taulukko 21: Kivihiilen savukaasukoostumus yhtä MJ:a kohden. (Alakangas E. 2000. 130, 154.)

Alkuainekoostumus	p-% kuiva-aine	Osuus [g/MJ]	Moolimassa [g/mol]	nx [mol/MJ]
C	77	27,94	12,011	2,3265
H ₂	3,6	1,31	2,016	0,6480
N ₂	0,9	0,33	28,013	0,0117
O ₂	3,8	1,38	31,999	0,0431
S	0,5	0,18	32,066	0,0057
Cl	0,2	0,07	35,450	0,0020
H ₂ O		4,03	18,016	0,2238
Tuhka	14	5,08		
Yhteensä	100	40,32		3,2608

		Savukaasut [mol/MJ]				
Alkuainekoostumus	O ₂ tarve [mol/MJ]	CO ₂	SO ₂	N ₂	H ₂ O	Cl
C	2,3265	2,3265				
H ₂	0,3240				0,6480	
N ₂				0,0117		
O ₂	-0,0431					
S	0,0057		0,0057			
Cl						0,0020
H ₂ O					0,2238	
Tuhka						
Yhteensä	2,6131					
Ilman tyyppi (O ₂ tarve*3,77)	9,8513			9,8513		
Kuiva ilma (Ilman tyyppi + O ₂ tarve)	12,4644					
Kosteutta ilmassa (0,0049*Kuiva ilma)	0,0611					
Kosteaa polttoilmaa (Kuiva ilma + Kosteutta ilmassa)	12,5255					
Savukaasun komponentit		2,3265	0,0057	9,8630	0,8719	0,0020
Yhteensä						13,0690

6.1 Ensimmäinen skenaario: Sahanpurun polttaminen

Sahanpuru on yksi potentiaalinen polttoaine hiilen rinnakkaispoltolle. Puru on sahateollisuuden sivutuote, jonka ansiosta sen porttihinta on muita biopolttoaineita halvempi (18 €/MWh). Tämän takia sahanpurua kannattaisi hyödyntää, mikäli se on mahdollista. Tässä kappaleessa esitellään sahanpurun polttamiseen vaadittavat menetelmät ja sen asettamat rajoitteet.

6.1.1 Sahanpurun polttamiseen vaadittava logistiikka, varastointi ja saatavuus

Sahanpuru on hyvin kosteaa polttoainetta, noin 50–55 % kosteuspitoisuudellaan. Tämä rajoittaa sahanpurun hankinta-alueen 200 km:n säteelle voimalaitoksesta. Tätä suuremmalla alueella kuljetuskustannukset kasvavat liian suuriksi, jotta sahanpurun poltto olisi järkevää. Koska sahanpurua tuotetaan hajautetusti, todennäköisesti kannattavin logistinen ratkaisu polttoaineen kuljetukseen olisi kuorma-autoliikenne sahojen ja voimalaitoksen välillä. Tämä vaatisi oman logistiikan.

Sahanpuru on kosteaa biopohjaista polttoainetta, jota ei voida varastoida ilman suojaa. Sahanpurun varastointi vaatii myös runsaasti tilaa. Purua olisi järkevintä tuoda suoraan sahoilta voimalaitoksen puskurivarastoon. Puskurivarasto on pakollinen, jotta polttoainetta riittäisi pitkien pyhien yli, jolloin polttoainetta ei lain nojalla voida tuoda voimalaitokselle. Tällainen puskurivarasto voisi olla esimerkiksi varastosiilo. Varastosiilosta voisi olla suora yhteys hiilikuljettimille tai omalle polttoaineenkuljetuslinjastolle.

Sahoille päätyvästä raaka-aineesta 15 % päätyy sahanpuruksi. Sahateollisuus käyttää osan sahanpurusta itse, jonka johdosta purua ei ole pääkaupunkiseudulla kovinkaan paljon tarjolla. Vision Huntersin (2011, 25.) tekemän selvityksen mukaan 200 km säteellä Vantaan Energiasta on 15 itsenäistä sahaa, joiden sivutuotanto on keskimäärin 1,5 milj.m³. Tämä tarkoittaisi, että sahanpurun osuus olisi tästä 0,41 milj.m³. Puun lämpöarvo 55 %:n kosteudessa on noin 1,25 MWh/k-m³, (Alakangas E. 2000, 53.) jolloin sahanpurua olisi tarjolla noin 0,5 TWh/a. Tämä vastaa noin 50 % Martinlaakso 2 energiantuotannosta. On epärealistista olettaa, että Vantaan Energia saisi kaiken sahanpurun yksittäisiltä sahoilta omaan käyttöönsä 200 km säteeltä. Etenkin kun sahat käyttävät osan sahanpurusta itse. Tästä joh-

tuen oletetaan, että Vantaan Energialla olisi mahdollista saada enintään 40 % tuotetusta sahanpurusta polttoaineeksi Martinlaakson voimalaitokselle. Tämä vastaa noin 20 % Martinlaakso 2:n polttoainetarpeesta.

6.1.2 Sahanpurun polttamiseen vaadittava laitosmuutokset

Kuten kappaleessa 5.6.1 todettiin, voidaan pieniä eriä (< 10 % polttoaineen tehosta) sahanpurua polttaa normaalin hiililinjaston mukana, mutta ongelmaksi muodostuu partikkeliko. Hiilimyllyt eivät pysty jauhamaan sahanpurua tarpeeksi pieneksi. Tämän johdosta sahanpuru tarvitsisi oman linjaston omaan myllyyn, jossa se jauhettaisiin ja syötettäisiin hiilen sekaan juuri ennen polttimia tai polttimosta omaa putkea pitkin. Tällöin voidaan korvata jopa 30 % hiilestä sahanpurulla. Suurempien määrien polttaminen vaatisi kalliimpia mikro-myllyjä, joiden ansiosta voitaisiin päästä 50 %:n osuuteen.

Poltettaessa suuria määriä sahanpurua ongelmaksi muodostuu syöttöilmapuhaltimen kapasiteetti. Kuten Naantalin kokeessa todettiin, jo 8 % polttoaineentehosta vie 50 % tilavuudesta, ja 25 % massasta. Suuria määriä poltettaessa syöttöilmapuhaltimen teho ja savukaasupuhaltimen aiheuttama paine-ero jäävät luultavasti liian pieniksi, jolloin voimalaitoksen tulisi investoida uusiin suurempiin puhaltimiin.

Suuria määriä poltettaessa, kasvaa myös savukaasumäärä. Tällöin letkusuodattimien läpäisy pintaa jouduttaisiin luultavasti kasvattamaan enemmän kuin mitä on suunniteltu.

Sahanpurun saatavuuden asettamien rajoitteiden johdosta sahanpuruskenaario rajoitetaan 20 %:iin polttoainetehosta. Tällöin laitokselle tehtävät investoinnit rajoittuvat sahanpurun varastointisiiloon, syöttölinjastoon, myllyyn ja syöttöilmapuhaltimeen. Investointikustannukset ovat esiteltyinä taulukossa 22.

Taulukko 22: Sahanpurun investointikustannukset

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Sahanpuru	2	3			

6.2 Toinen skenaario: Puupellettien polttaminen

Pelletin käyttö voimalaitospolttoaineena on yleisempää kuin pelkän sahanpurun käyttö. Tämä johtuu pelletin paremmasta energiatiheystä ja saatavuudesta. Pelletti on pidemmälle jalostettu biopolttoaine kuin sahanpuru ja sen on porttihinnaltaan noin 30 €/MWh. Tässä kappaleessa esitellään pelletin polttamiseen vaadittavat menetelmät ja sen asettamat rajoitteet.

6.2.1 Puupelletin polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus

Pelletti on kuiva polttoaine, jonka kosteuspitoisuus on noin 9 %. Hyvän energiatihetyensä ansiosta pellettiä voidaan tuoda voimalaitoksille mistä päin maailmaa tahansa. Pelletin tuotannolla on tällä hetkellä maailmanmarkkinoilla ylikapasiteettia, jonka vuoksi Suomesakin on jouduttu sulkemaan useita laitoksia vuoden 2011 aikana. Pelletin voimalaitoskäytön oletetaan lisääntyvän merkittävästi tulevaisuudessa. Hyvän saatavuutensa ansiosta pelletin vaatima logistiikka riippuu varastoinnista.

Koska pelletti on kuiva puuperäinen polttoaine, sitä ei voida varastoida ilman varastorakennusta. Pelletti imee kosteutta helposti, jonka jälkeen se murenee ja käsittely hankaloituu. Pelleteille täytyy rakentaa pieni puskurivarasto voimalaitosalueelle, jotta polttoainetta riittäisi suurten juhlapyhien yli. Voimalaitosalue on rajallinen, jonka vuoksi ulkomailta tuleville suurille pellettitalauksille täytyisi rakentaa välivarasto. Tällaiset varastot voisivat olla satamien yhteydessä olevat varastorakennukset. Satamiin johtaa yleensä raideliikennettä, jonka avulla pellettejä voidaan tuoda junalla myös Venäjältä sekä Itä- ja Pohjois-Suomesta. Välivarastosta polttoaine tuotaisiin kuorma-autoilla voimalaitoksen puskurivarastoon.

Toinen varastointi mahdollisuus olisi niin kutsuttu konttivarastointi, jossa polttoainetta tuotaisiin ja säilytettäisiin merikonteissa. Polttoainetta sisältävät merikontit tuotaisiin laivoilla tai junilla välivarastoon. Välivarastosta merikontit kuljetettaisiin voimalaitosalueelle kuorma-autoilla, jossa polttoaine lastattaisiin puskurivarastoon ja tyhjät merikontit palautettaisiin tehtaalte.

Kolmas vaihtoehto olisi, että pellettejä kuljetettaisiin kuorma-autoilla suoraan tehtailta voimalaitoksen välivarastoon. Tämä vaihtoehto poissulkisi mahdollisuuden tuoda suuria määriä pellettejä ulkomailta.

6.2.2 Puupelletin polttamiseen vaadittava laitosmuutokset

Pellettejä poltettaessa voimalaitosalueelle joudutaan rakentamaan puskurivarasto. Tällainen puskurivarasto voisi olla esimerkiksi siilo. Kuten sahanpurussakin pellettiä voidaan polttaa pieniä määriä hiilen seassa suoraan hiililinjastossa. Mutta suurempien määrien (yli 20 % tuotetusta energiasta) käyttö vaatii oman linjaston ja myllyn. Kuten sahanpurussa, yli 30 %:n osuus pelleteillä tuotetusta energiasta saattaa vaatia investointia mikro-myllyyn, jotta partikkelikoko saadaan tarpeeksi pieneksi.

Investointikustannuksia laskettaessa voidaan arvioida, että pellettien polttaminen 10 %:n ja 20 %:n osuuksilla energiatuotannosta onnistuu rakentamalla oma siilo ja lastaamalla pelletit hiililinjastoon hiilen sekaan. Tätä suurempien määrien polttaminen vaatii oman linjaston ja yli 30 %:n energiahyötykäyttö tarvitsee oman mikro-myllyn ja polttimet. Tällöin voidaan arvioida, että pelletin investointikustannukset ovat taulukon 23 mukaiset.

Taulukko 23: Pelletin investointikustannukset [milj. €]

	Biopolttoaineisuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Pelletti	2	3	10	12	14

6.3 Kolmas skenaario: Torrefioidun biohiilen polttaminen

Torrefioitu biohiili on hyvin kivihiilen tapainen pitkälle jalostettu biopolttoaine. Uutuutensa johdosta, tutkijat eivät ole vielä varmoja kaikista ongelmista, joita polttoaine saattaa aiheuttaa voimalaitoksille, mutta tähän asti tehdyt voimalaitos- ja laboratoriopolttokokeet näyttävät lupaavalta. Torrefioidun biohiilen tuotantolaitoksia on suunnitteilla esimerkiksi Ristiinaan, mutta tästä huolimatta saatavuus on epävarmaa. Tässä skenaariossa oletetaan,

että torrefioitua biohiiltä on saatavilla ja sen porttihinta on 35 €/MWh. Kappaleessa esitellään torrefioidun biohiilen polttamiseen vaadittavat menetelmät ja sen asettamat rajoitteet.

6.3.1 Torrefioidun biohiilen polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus

Torrefioitu biohiili on erittäin kuiva polttoaine, jonka kosteuspitoisuus on noin 1 %. Tämän ansiosta torrefioitua biohiiltä voidaan tuoda laivoilla ympäri maailmaa tai junalla Pohjois- ja Itä-Suomesta tai Venäjältä. Satamista torrefioitu biohiili voidaan tuoda voimalaitosalueelle kuorma-autoilla hiilen tapaan.

Torrefioitu biohiili on vettä hylkivää, jonka ansiosta sitä voidaan varastoida hiilikentällä ilman katosta hiilen tapaan. Tällöin ei tarvitsisi investoida polttoainesiiioihin. TOP-pellettejä käytettäessä hiilen käyttö vähenee, jolloin hiilikentältä vapautuu tilaa biopolttokäyttöä varten.

Biohiilen saatavuus on erittäin huono. Tämän johdosta Vanaan Energia voi joutua investoimaan omaan tuotantolaitokseen. Tällaisen tuotantolaitoksen rakentaminen voi maksaa lähemmäksi sata miljoonaa euroa. (Vision Hunters, 2011, 43.) Tämän vuoksi yhteinen tuotantolaitos toisen kivihiieltä käyttävän yrityksen kanssa voisi olla järkevää. Tuotantolaitoksen olisi sijaittava kaupungin tai lämpöä tarvitsevan tehtaan lähistöllä, jonka lähialueelta on saatavissa runsaasti metsäenergiaa, sillä torrefioidun biohiilen tuotanto on lämpöä tuottava prosessi. Tällöin tuotettu lämpö saataisiin hyötykäytettyä ja tuotantokustannukset laskisivat. Torrefioidun biohiilen hyvän energiatheyden ansiosta oma tuotantolaitos voisi myös sijaita ulkomailla.

Toinen vaihtoehto on tehdä sopimus TOP-pellettejä tuottavien yritysten kanssa, jotka takaisivat polttoaineen saatavuuden. Vapailta markkinoilta ostettaessa on kuitenkin omat riskinsä, koska torrefioitu biohiili on hyvin suosittua. Jos torrefioidun biohiilen voimalaitospoltto yleistyy, eikä suuria muutoksia tarvitse tehdä hiilipölypolttokattilaan, torrefioidun biopolttokäyttö hinta saattaa nousta hyvinkin äkillisesti.

6.3.2 Torrefioidun biohiilen polttamiseen vaadittava laitosmuutokset

Kuljetus, säilöntä ja murskaus luultavasti pysyvät lähes samoina, kuin tämänhetkisessä prosessissa. Vaikka torrefioitu biohiili on hyvin hiilen kaltainen polttoaine, se on kuitenkin hieman huonolaatuisempi. Tämän takia on varauduttava pieniin laitteistomuutoksiin ja tehonkorotuksiin. Myllyihin täytyy asentaa vettä sumuttava järjestelmä, jotta pölyräjähdysriskiä välttyttäisiin. Poltettaessa runsaasti torrefioitua biohiiltä, sumutusjärjestelmä kannattaa asentaa jokaiseen myllyyn, jotta polttoprosessi ei olisi riippuvainen vain yhdestä myllystä. Suuria määriä poltettaessa yhden polttoainesiilon voisi varata pelkälle torrefioidulle biohiilille. Taulukkoon 24 on arvioitu torrefioidun biohiilen investointikustannukset eri prosentiosuuksilla energiatuotannosta.

Taulukko 24: Torrefioidun biohiilen investointikustannukset [milj. €]

	Biopolttoaineisuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Torrefioitu biohiili	2	3	4	5	7

6.4 Neljäs skenaario: Paikallisella kaasutuslaitoksella tuotetun biokaasun polttaminen

Vantaan Energia on 2000-luvun alussa suunnitellut rakentavansa kaasutuslaitoksen Martinlaakson voimalaitosalueelle. Tämän kaasutuslaitoksen oli tarkoitus kaasuttaa REF polttoainetta ja polttaa tuotekaasua Martinlaakso 2 kattilassa. Hanke kuitenkin kaatui ympäristölupahakuprosessiin. Biomassan kaasutuslaitoksen ympäristöluvut on helpompi saada, koska tuotekaasua ei tarvitse puhdistaa ennen polttoa. Tämän johdosta on syytä tarkastella kaasutuslaitoksen rakentamista uudestaan. Biomassan kaasutusta on tehty jo useamman ajan vuoden ja kaasutuslaitoksen toimittajia on Suomessakin useampia. Tässä työssä tarkastellaan hakkeen kaasutusta. Hakkeen porttihinnaksi on oletettu 20 €/MWh. Tässä kappaleessa esitellään hakkeen kaasuttamiseen ja polttamiseen vaadittavat menetelmät sekä sen asettamat rajoitteet.

Uusien tiukempien päästödirektiivien johdosta Kymijärvi 1 kaltainen edes osittainen REF:in kaasutus ja poltto ei olisi kannattavaa Martinlaakso 2:ssa. Jos jätettä käytetään polttoaineena edes vähän, muuttuu voimalaitos jätteenpolttolaitokseksi. Tällöin uudet IE-direktiivin päästöraajat tiukentuvat huomattavasti ja savukaasun puhdistukseen jouduttaisiin investoimaan huomattavia määriä. Lisäksi voimalaitokselle jouduttaisiin hankkimaan jatkuva mittausjärjestelmä orgaanisen hiilen kokonaismäärälle, suolahapolle ja fluorivedylle tämänhetkisten NO_x-, SO₂-, CO-, hiukkas-, happi-, kosteus- ja painemittausten lisäksi. Jatkuvien mittausten lisäksi raskasmetallit, dioksiinit ja furaanit tulee myös mitata puolen vuoden välein. Dioksiini- ja furaanipäästöjen määrää on hyvin vaikea arvioida etukäteen. Jos nämä päästöt ovat liian suuret, joutuu voimalaitos asentamaan aktiivihiilisuodattimen ennen tuotekaasun polttoa. Savukaasumittausten lisäksi voimalaitos joutuisi tarkkailemaan jätevesipäästöjä. Tämän lisäksi kattilaan joudutaan asentamaan ylimääräinen poltin. Poltin huolehtisi, että kattilan lämpötila ei laske alle 850 °C. Varapolttimeen ei saisi syöttää polttoainetta, joka voisi aiheuttaa suurempia päästöjä kuin neste- tai maakaasun poltto. Päästöjen suuruuden arviointi on kuitenkin hyvin vaikeaa. Kaiken tämän lisäksi, luvan hakeminen jätteenpolttolaitokselle on hyvin työläs prosessi. (Karjalainen P. 2012; Puheloinen E. et al. 2011, 192, 194, 196.)

6.4.1 Biokaasun polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus

Hake on sahanpurun tapaan kostea polttoaine. Tämän rajoittaa hakkeen saatavuuden 150–200 km:n etäisyydelle voimalaitosalueelta. Eri selvityksen mukaan metsähaketta on mahdollista hankkia noin 0,5-2,4 TWh 200 km:n säteeltä Martinlaakson voimalaitoksesta. (Vision Hunters, 2011, 15.) Koska hakkuualueet on hajautettu, kuorma-autokuljetus on ainoa vaihtoehto. Logistiikalla on kuitenkin muutama vaihtoehto: tienvarsihaketus tai haketus käyttöpaikalla ja mahdollinen välivarastointi. Välivarastointi aiheuttaa lisäkuluja, jonka takia sitä käytetään harvemmin. Yleisimmin hakkuutähteet ja pienpuut haketetaan tienvarressa ja kuljetetaan hakkeena suoraan voimalaitosalueelle. Kannot ja järeät puunrungot kuljetetaan yleensä suoraan käyttöpaikalle ja haketetaan siellä.

Metsähake on kosteaa orgaanista polttoainetta, jonka vuoksi sitä ei yleensä varastoida ilman katosta tai varastorakennusta. Auma varastointi on mahdollista, mutta tällöin polttoaine saattaa alkaa käydä ja syttyä palamaan. Lisäksi auma vaatii runsaasti tilaa. Turvallisin

vaihtoehto on hakettaa metsähake ja tuoda se suoraan voimalaitosalueen puskurivarastoon, josta se käytetään polttoaineena ennen kuin käymisprosessi alkaa. Puskurivarastona voisi toimia esimerkiksi polttoainesilo.

Metsähakkeen saatavuus on rajoitettua pääkaupunkiseudun lähistöllä. Suuren kosteuspitoisuutensa ja heikon energiatiheytensä ansiosta metsähaketta ei voida tuoda ulkomailta tai yli 200 km:n etäisyydeltä voimalaitoksesta. Tämän vuoksi Vantaan Energian tulisi tehdä sopimuksia metsän omistajien ja metsäyhtiöiden kanssa polttoaineen saamisen turvaamiseksi. Etelä-Suomen muut energiayhtiöt ja biojalostamot ovat myös suunnittelemassa biopolttoaineen käyttöönottoa, jonka vuoksi suurten voimalaitosyhtiöiden tulevat strategiset päätökset ovat merkittävä uhka kaasutuslaitoksen kannattavuudelle.

6.4.2 Biokaasun polttamiseen vaadittava laitosmuutokset

Tässä työssä käsiteltävistä skenaarioista paikallisen kaasutuslaitoksen rakentaminen vaatii suurimmat investoinnit voimalaitosalueella. Ensimmäiseksi kaasutuslaitos tarvitsisi polttoaineelle puskurivaraston, eli polttoainesilon. Siilon tulisi olla tarpeeksi iso, jotta polttoainearat riittäisivät pitkienkin juhlapyhien yli, jolloin ympäristöluvut eivät salli polttoaineen kuljetusta. Varastosilon tai -siilojen yhteistilavuus riippuu rakennettavan kaasutuslaitoksen koosta sekä voimalaitosyhtiön polttoainestrategiasta. Siilojen koot voivat vaihdella noin 3 000-15 000 m³. Voimalaitosalueelle täytyy myös rakentaa hakkeelle oma polttoaineen kuljetuslinjasto ja itse kaasutuslaitos. Kaasutuslaitoksen lisäksi hiilipölypolttokattilaan joudutaan tekemään muutoksia, jotta tuotekaasupolttimet saadaan hiilipolttimien alapuolelle. Lisäksi kaasutuslaitokselta tuleva lämpöenergia täytyy saada talteen, jotta hyötysuhde olisi mahdollisimman hyvä; kaasutuslaitosta jäähdyttävä vesikierto tulisi liittää kattilalaitoksen lieriöön.

Hakkeen kosteus aiheuttaa ongelmia poltettaessa suuria määriä tuotekaasua. Suuri kosteuspitoisuus kasvattaa savukaasun tilavuusvirtaa ja siten heikentää kattilalaitoksen hyötysuhdetta ja kuormittaa rikinpoistolaitosta, letkusuodattimia sekä savukaasupuhallinta. Tämän vuoksi hake pitää kuivata noin 30 % kosteuspitoisuuteen ennen kaasutusta. Kuivaus voidaan tehdä ennen kuin hake menee kaasutettavaksi esimerkiksi kappaleessa 5.6.4 esitetyllä Metson KUVU-viirakuivaimella. Kuivaus nostaa hakkeen tehollista lämpöarvoa ja pienen-

tää kosteutta. Kuivaus tapahtuu voimalaitoksen hukkalämmöllä lämpiminä aikoina ja kylmempinä aikoina hakkeen kuivaamiseen joudutaan käyttämään kaukolämpöä. Hakkeen kuivaamiseen kuluu noin 1,1 kWh/kg_{höyrystynytvesi}. (Isaksson J. 2012.) Kuivaukseen käytetty kaukolämpö voidaan sisällyttää omakäyttölämpöihin. (Karjalainen P. 2012)

Kappaleessa 3.1.4 laskettiin, että kaasutettu hake sisältää 80 g vettä/MJ 30 % kosteuspitoisuudessa. Tällöin hake sisältää 124,4 g vettä/MJ saapumistilassa 55 % kosteuspitoisuudessa. Tästä saadaan laskettua, että hakkeesta haihdutetaan 44,44 g vettä/MJ. Alla olevaan taulukkoon 25 on laskettu, kuinka paljon tarvitaan energiaa vuodessa, jotta saadaan kuivatua hake kaasutukseen, kun kuivatus käyttää 1,1 kWh/kg_{höyrystynytvesi} ja laitos on käynnissä 5500 h/a.

Taulukko 25: Hakkeen kuivatukseen tarvitsema energia

	Biopolttoaineisuus				
	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Haihdutettua vettä [kg/s]	1,02	2,04	3,07	4,09	5,11
Hakeen kuivatus [MWh/a]	22 264	44 528	66 792	89 056	111 320

Alla olevaan taulukkoon 26 on arvioitu kaasutuslaitoksen investointikustannukset eri prosentiosuuksilla energiatuotannosta.

Taulukko 26: Hakekaasutuslaitoksen investointikustannukset [milj. €]

	Biopolttoaineisuus				
	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Polttoaine					
Hake (kaasutus)	16,6	21,2	25,8	30,4	35

6.5 Viides skenaario: Bio-SNG:n polttaminen

Bio-SNG olisi voimalaitoksen kannalta helpoin biopolttoaine. Vantaan Energialla on Martinlaakso 2:n lisäksi muitakin kohteita, joissa bio-SNG:tä olisi mahdollista polttaa, esimerkiksi Martinlaakson voimalaitoksen maakaasuturbiini. Bio-SNG ei vaatisi minkäänlaisia muutoksia voimalaitokselle. Bio-SNG:tä on kuitenkin lähes mahdoton saada, jollei investoi omaan tuotantolaitokseen. Tällaisen tuotantolaitoksen investointikustannukset saattavat olla useita satoja miljoonia euroja. Oman tuotantolaitoksen eduksi voidaan myös laskea,

että kun Martinlaakso 2:n käyttöikä tulee täyteen, Vantaan Energia voi hyödyntää bio-SNG:tä muissa kohteissa. Bio-SNG:n tuotanto on hyvin kallista, jolloin porttihinnaksi voidaan arvioida 45 €/MWh. Työssä kuitenkin oletetaan, että bio-SNG:tä olisi tarjolla. Tässä kappaleessa esitellään bio-SNG:n polttamiseen vaadittavat menetelmät sekä sen asettamat rajoitteet.

6.5.1 Bio-SNG:n polttamiseen vaadittava logistiikka, säilytys ja saatavuus

Bio-SNG on maakaasun veroista polttoainetta, jonka ansiosta sitä voidaan kuljettaa voimalaitokselle maakaasuverkon kautta. Martinlaakso 2:ssa käytetään jo nyt maakaasua varapolttoaineena, jonka ansiosta logistiikka ei ole ongelma. Bio-SNG:tä ei voida säilöä missään, vaan se joudutaan käyttämään sitä mukaa kuin sitä tuotetaan. Bio-SNG on tosin korvamerkitty tuote aivan kuten tuulisähkönkin. Käytännön tuotannon ja kulutuksen ei tarvitse olla samanaikaista, vaan niitä tarkastellaan vuositasolla. Tuotannon ei kuitenkaan tarvitse rajoittua Martinlaakso 2:een, koska Vantaan Energialla on useita muitakin käyttökohteita, joissa bio-SNG:tä voidaan käyttää. Tuotetun bio-SNG:n voi myös myydä muihin maakaasua käyttäviin yrityksiin.

Saatavuus on suuri ongelma bio-SNG:ssä. Vantaan Energian olisi todennäköisesti investoitava omaan tuotantolaitokseen, joko yksin tai yhteistyössä muiden energia- tai metsäyhtiöiden kanssa. Tällaiset investoinnit ovat hyvin kalliita. Investoinnin suuruus on otettu huomioon polttoaineen porttihinnassa.

6.5.2 Bio-SNG:n polttamiseen vaadittava laitosmuutokset

Martinlaakso 2 käyttää maakaasua varapolttoaineena kattilassa. Tämän johdosta minkäänlaisia lisäinvestointeja ei voimalaitokseen tarvita.

7 SKENAARIOLASKENTA JA ARVIOINTI

Tässä kappaleessa lasketaan ja vertaillaan edellisessä kappaleessa tehtyjen skenaarioiden biopolttoaineiden savukaasujen koostumusta, käyttäytymistä rikinpoistossa ja tuhkan koostumusta. Lopuksi tehdään kustannuslaskelma jokaisesta biopolttoaineskenaariosta. Vertailun vuoksi skenaariotarkasteluissa esitetään myös kivihiilellä saatuja tuloksia, jolloin voidaan vertailla rinnakkaispolton kannattavuutta. Kuten aiemmin mainittiin, typpioksidipäästöjä ei tässä työssä vertailla, koska NO_x päästöt ovat enemmän riippuvaisia polttotekniikasta kuin polttoaineesta. Vaikka biopolttoaineet sisältävät vähemmän typpeä, kuin kivihiihi, ei tästä voida vetää suoraa johtopäätöstä, että typenoksidipäästöt pienenisivät merkittävästi. (Karjalainen P. 2012; Kivelä M. 2010; Lampio R. 2002, 87, 88; Molcan P. 2009, 2333; Savolainen K, 2003, 377, 378)

Vaikka kappaleessa 5.3.4 kerrottiin, että polttamalla kaasua vain 10–20 % polttoaineesta olisi mahdollista vähentää NO_x päästöjä jopa 60 %, ei tämä päde Martinlaakson voimalaitoksen kattilassa. Käytännön kokemuksesta on havaittu että NO_x päästöt eivät ehdi pelkistyä korkean polttoaineen syöttötason johdosta. (Karjalainen P. 2012)

7.1 Savukaasulaskujen vertailu

Tässä kappaleessa verrataan eri polttoaineiden tuottamia päästöjä. Alla olevaan taulukkoon 27 on koottu kappaleessa 3 laskettujen biopolttoaineiden ja kappaleessa 6 lasketun kivihiihen savukaasun koostumukset.

Taulukko 27: Polttoaineiden savukaasujen koostumukset [mol/MJ]

Polttoaine	CO_2	SO_2	N_2	H_2O	Cl	Yhteensä
Kivihiihi	2,3265	0,0057	9,8630	0,8719	0,0020	13,0690
Sahanpuru	2,4717	0,0004	9,8206	5,4982	0,00003	17,7909
Pelletti	2,2283	0,0003	8,8636	1,9667	0,0001	13,0590
Torrefioitu biohiili	2,1369	0,0003	8,3732	1,2761	0,00003	11,7865
Hake (kaasutus)	2,3312	0,0003	9,2557	3,0266	0,0001	14,6140
Bio-SNG	1,2306	0,0000	9,1990	2,4278	0,0000	12,8574

Taulukon 27 tuloksista voidaan huomata, että rikkidioksidimäärä on biopolttoaineissa huomattavasti pienempi ja yhteenlaskettusavukaasumäärä kasvaa huomattavasti vain sahanpurun kohdalla. Tämä johtuu sahanpurun suuresta (52,5 %) kosteuspitoisuudesta. Jos sahanpuru kuivattaisiin samaan kosteuspitoisuuteen kuin hake (30 % kosteuspitoisuuteen), savukaasumäärät olisivat samat kuin hakkeen kaasuttamisessa. Muiden biopolttoaineiden savukaasumäärät ovat lähes samoja kuin kivihiilellä. Tästä voidaan päätellä, että savukaasujen tilavuusvirrat pysyvät lähes samoina.

Savukaasupuhaltimen kapasiteetti riippuu letkusuodattimien aiheuttamasta paine-erosta. Savukaasunmäärän kasvaessa tarvitaan lisää läpäisy pintaa letkusuodattimissa. Paine-ero on riippuvainen suodattimen pinnalla olevan pölyn paksuudesta, koostumuksesta, määrästä ja viipymästä letkusuodattimessa sekä savukaasumäärästä, eli virtausnopeudesta. Virtausnopeuden kasvaessa kasvaa paine-ero potenssissa toiseen. (Karjalainen P. 2012) Myös tämän vuoksi on tärkeää kuivata kostea polttoaine.

Piipussa mitattu savukaasun rikkipitoisuus on tällä hetkellä noin 170 mg/MJ. Rikkinpoistolaitosta voidaan tehostaa saavuttamaan IE-direktiivin vaatima noin 70 mg/MJ:n rikkipitoisuus piipussa. Tällöin sumutetun lietteen määrää täytyy lisätä, joka kasvattaa savukaasun kiintoainepitoisuutta ja sitä kautta letkusuodattimien räsistystä. Tällöin letkusuodattimien välien paine-ero kasvaa ja rasittaa savukaasupuhallinta. Tätä räsistystä voidaan vähentää esimerkiksi kasvattamalla letkusuodattimien pinta-alaa. Koska räsitys ei kohdistu ainoastaan biopolttoaineisiin vaan letkusuodattimien pidennys jouduttaisiin tekemään joka tapauksessa, niin tätä investointia ei ole huomioitu laskennassa.

Kuten kappaleessa 5.1.5 todettiin, savukaasujen suhteellinen kosteus ei missään vaiheessa saa olla alle 40 %. Suhteellinen kosteus on laskettu kaavan 14 mukaisesti jokaiselle skenaariolle alla olevaan taulukkoon 28, josta nähdään, että pahimmissakin tapauksissa suhteellinen kosteus on noin 13 %. Tällöin liitteen 8 kuvan 45 Mollier-piirroksista katsottuna piipun minimi lämpötila on noin 85 °C. Tämä voi tuottaa ongelmia, koska kosteuspitoisuus lisääntyy sumutetun kalkin ja nuohouksen myötä. Piippulämpötilaa voidaan joutua nostamaan yli 90 °C:een nuohouksen ajaksi. Muissa tapauksissa suhteellinen kosteus on noin 7 %. Tällöin kosteus ei todennäköisesti tuota ongelmia. Liitteen 8 kuvan 45 Mollier-piirroksista katsottuna biopolttoaineskenaarioiden savukaasujen 40 % märkälämpötila on

noin 75 °C. Tämä tuskin tuottaa ongelmia koska normaalissa ajossa kivihiilellä piippulämpötila on noin 85 °C, jolloin korroosioriskiä ei ole.

$$\frac{\frac{(N_{H_2O,bio} \cdot X + N_{H_2O,kh} \cdot (1-X)) \frac{mol}{MJ}}{(M_{H_2O,bio} \cdot X + M_{H_2O,kh} \cdot (1-X)) \frac{g}{mol}}}{\frac{(N_{sk,bio} \cdot X + N_{sk,kh} \cdot (1-X)) \frac{mol}{MJ}}{(M_{sk,bio} \cdot X + M_{sk,kh} \cdot (1-X)) \frac{g}{mol}}} = \frac{kg_{H_2O}}{kg_{sk}} \quad (14)$$

missä,

N = Moolia savukaasussa [mol/MJ]

X = Biopolttoaineen osuus tuotetusta energiasta

M = Moolimassa [g/mol]

alaindeksit

H₂O = Vesihöyry

sk = Savukaasu

bio = Biopolttoaine

kh = Kivihiili

Taulukko 28: Savukaasujen suhteellinen kosteus ennen rikinpoistolaitosta [kg_{H₂O}/kg_{sk}]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398
Sahanpuru	0,0596	0,0785	0,0966	0,1140	0,1307
Pelletti	0,0449	0,0501	0,0553	0,0606	0,0658
Torrefioitu biohiili	0,0421	0,0444	0,0469	0,0493	0,0518
Hake (kaasutus)	0,0493	0,0588	0,0682	0,0774	0,0866
Bio-SNG	0,0474	0,0551	0,0630	0,0710	0,0792

Käytännön kokemukset osoittavat, että suhteellisen kosteuden nousun johdosta rikinpoistolaitoksen loppulämpötilaa täytyy nostaa, verrattuna normaaliin hiilipolttoon. Biopolttoaineilla ja maakaasulla loppulämpötilan nosto tapahtuu suurimmilta osin sumutetun lietteen tarpeen vähenemisellä. Biopolttoaineet sisältävät huomattavasti vähemmän rikkiä, jolloin sumutetun lietteen tarve vähenee. Tällöin sumutetun lietteen mukana tulevan veden höyrytämiseen tarvitaan vähemmän energiaa ja loppulämpötila nousee. Sumutetun lietteen vähentämisellä ei välttämättä päästä aivan riittävän suureen lämmön nousuun, mutta lämpötilaa voidaan myös säätää muuttamalla lämpötilan asetusarvoa automaation kautta. Tämä

vaikuttaa lietteen määrän säätöön. (Karjalainen P. 2012; Mansner T. 2012.) Käytännön kokemus on osoittanut, että jokaista 10 MW maakaasulla tuotettua energiayksikköä kohden, piippulämpötilaa täytyy nostaa 2 °C. (Mansner T. 2012.)

Savukaasujen kosteuspitoisuus saattaa vaihdella huomattavasti ajon aikana, vaikka polttoaine pysyisi samana. Tämä riippuu vuodenajasta, sademäärästä ja polttoaineen laadusta. Sateisena syksynä hiili saattaa olla hyvinkin paljon kosteampaa kuin kesällä ja lastatessa hiiltä kuljettimille talvella, saattaa mukaan joutua suuria lumikuormia. Tästä johtuen poistolämpötila on parempi pitää korkeamana kuin teoreettiset laskennat osoittavat.

7.2 Biopolttoaineiden käyttäytyminen rikinpoistolaitoksessa

Martinlaakson rikinpoistolaitos pääsee kivihiilen normaalissa ajossa tarvittavaan IE direktiivin rajoihin (noin 70 mg/MJ). (Karjalainen P. 2012.; Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 30.) Edellisessä kappaleessa 7.1 todettiin, että useimmissa tapauksissa biopolttoaineen tuoman lisäkosteuden johdosta, ei rikinpoistolaitokselle tulevan savukaasun lämpötilaa tarvitse nostaa. Suurilla biopolttoaineen kosteuspitoisuuksilla, kuten 52,5 % kosteuspitoisuuden omaavalla sahanpurulla, sumutetun lietteen vähentämä lämpötilaero ei välttämättä ole tarpeeksi suuri, jolloin ongelmia saattaa ilmetä ja rikinpoistolaitokselle tulevan savukaasun lämpötilaa voi joutua nostamaan. Tämä savukaasun lämpötilan nosto alentaisi kattilan hyötysuhdetta. Tästä syystä on tärkeää kuivata märkä biopolttoaine ennen polttoa noin 30 % kosteuspitoisuuteen esimerkiksi biokaasuttimessa.

Kalkin käyttö vähenee biopolttoaineilla pienemmän rikkipitoisuuden johdosta. Kappaleeseen 7.1 taulukkoon 27 on koottu savukaasujen rikki- ja klooripitoisuudet, jotka esitetään skenaariokohtaisesti taulukossa 29. Taulukkoon on arvioitu, että 5 % rikkidioksidista sitoutuu pohjatuhkaan ja sähkösuodattimeen. Laskuissa on käytetty SO₂:n moolimassana 64,065 g/mol ja kloorin moolimassana 35,45 g/mol. Tässä kappaleessa käytetyt kaavat ovat peräisin Riionheimo Y. ja Uomala P.:n (1995.) tekemästä laitospohjaisesta SITHTI II hankkeesta. Kaavat eivät välttämättä päde muihin rikinpoistolaitoksiin.

Taulukko 29: Rikin ja kloorin määrä savukaasussa [mg/MJ]

	Rikkidioksidipitoisuus [mg/MJ]				
	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	344,40	344,40	344,40	344,40	344,40
Sahanpuru	312,21	280,03	247,84	215,65	183,47
Pelletti	311,99	279,58	247,17	214,77	182,36
Torrefioitu biohiili	311,70	279,00	246,30	213,60	180,90
Hake (kaasutus)	312,08	279,77	247,46	215,14	182,83
Bio-SNG	309,96	275,52	241,08	206,64	172,20
	Klooripitoisuus [mg/MJ]				
	Biopolttoaine osuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	72,58	72,58	72,58	72,58	72,58
Sahanpuru	65,44	58,30	51,16	44,02	36,88
Pelletti	65,73	58,88	52,03	45,18	38,32
Torrefioitu biohiili	65,41	58,25	51,08	43,92	36,75
Hake (kaasutus)	65,75	58,92	52,08	45,25	38,42
Bio-SNG	65,32	58,06	50,81	43,55	36,29

Päästörajat vaihtelevat biopolttoaineilla tuotetun energiaosuuden mukaan. IE-direktiivin liitteen V mukaan rikkipäästöjen savukaasurajat mitataan mg/Nm^3 , jolloin eri biopolttoaineilla tuotettu savukaasumäärä vaihtelee. Koska vaihtelu ei ole merkittävän suuri, yksinkertaistetaan päästörajaksi kaikille skenaarioille 70 mg/MJ , joka vastaa noin 230 mg/Nm^3 . Tällöin erotettu rikkidioksidimäärä (ΔSO_2) saadaan kaavasta 15 ja määrät on esitelty taulukossa 30.

$$SO_{2,in} - SO_{2,out} = \Delta SO_2 \quad (15)$$

missä,

$SO_{2,in}$ = Savukaasun rikkidioksidimäärä [mg/MJ]

$SO_{2,out}$ = Rikinpoistolaitoksen jälkeinen rikkidioksidimäärä [mg/MJ]

ΔSO_2 = Erotettu rikkidioksidimäärä [mg/MJ]

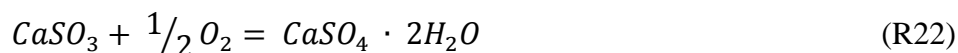
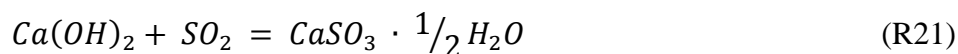
Taulukko 30: Erotettu rikkidioksidi rikinpoistolaitoksella (ΔSO_2) [mg/MJ]

	Biopolttoaineisuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	274,40	274,40	274,40	274,40	274,40
Sahanpuru	242,21	210,03	177,84	145,65	113,47
Pelletti	241,99	209,58	177,17	144,77	112,36
Torrefioitu biohiili	241,70	209,00	176,30	143,60	110,90
Hake (kaasutus)	242,08	209,77	177,46	145,14	112,83
Bio-SNG	239,96	205,52	171,08	136,64	102,20

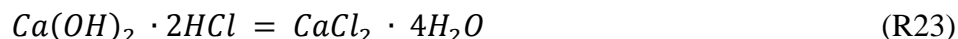
Sammutettaessa poltettu kalkki reagoi veden kanssa reaktion (R20) mukaisesti. Reaktio (R20) mukaan 56 kg puhdasta poltettua kalkkia (100 % CaO) reagoi 18 kg:n kanssa vettä muodostaen 74 kg sammutettua kalkkia $Ca(OH)_2$. Reaktio on voimakkaasti lämpöä luovuttava, jolloin sammuttimen lämpötila pastasammuttimessa on yli 90 °C. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 47.)



Kalkin stökiometrinen kulutus vastaa rikkidioksidin osalta reaktioita (R21) ja (R22) sekä kloorin osalta reaktiota (R23). Tällöin kalkkia kuluu ja lopputuotetta syntyy kaavojen 16 ja 17 mukaan. Lopputuotteen SO_2/SO_3 -suhteena on tämän työn laskennoissa käytetty arvoa 90/10. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 51, 52.)



$$1 \text{ kg } SO_2 = 0,875 \text{ kg } 100 \% CaO = 0,972 \text{ kg } 90 \% CaO = 2,1 \text{ kg lopputuotta} \quad (16)$$



$$1 \text{ kg } Cl = 0,789 \text{ kg } 100 \% CaO = 0,876 \text{ kg } 90 \% CaO = 2,6 \text{ kg lopputuotta} \quad (17)$$

Jolloin teoreettinen 100 % CaO:n kulutus saadaan kaavasta 18. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 52.)

$$M_{CaO, teor} = 0,83 \cdot \Delta Cl + 0,92 \cdot \Delta SO_2 \quad (18)$$

missä $M_{CaO, teor} = \text{Teoreettinen 100 \% CaO:n kulutus}$

$\Delta Cl = \text{Erotettu Cl määrä}$

Tällöin saadaan teoreettiselle 100 % CaO:n kulutukselle määrät taulukosta 31:

Taulukko 31: Teoreettinen 100 % CaO:n kulutus [mg/MJ]

	Biopolttoaineisuus				
	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Polttoaine					
Kivihiili	312,69	312,69	312,69	312,69	312,69
Sahanpuru	277,15	241,61	206,08	170,54	135,00
Pelletti	277,19	241,68	206,18	170,68	135,18
Torrefioitu biohiili	276,66	240,62	204,59	168,56	132,53
Hake (kaasutus)	277,29	241,89	206,49	171,09	135,69
Bio-SNG	274,98	237,27	199,56	161,85	124,14

Koska laitokselle tuleva kalkki on 90 % CaO ja 5 % kalkista reagoi reaktion (R24) mukaisesti savukaasussa hiilidioksidin kanssa saadaan todelliselle kalkin kulutukselle ($M_{CaO, tod}$) kaavan 19 mukaisesti arvot taulukoon 32. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 47, 52, 54.) Kalkin kulutus riippuu myös vapaan $Ca(OH)_2$ määrästä, joka on Martinlaakson rikinpoistolaitoksella noin 0,26 %.



$$\frac{M_{CaO, teor}}{0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9974} = M_{CaO, tod} \quad (19)$$

Taulukko 32: Todellinen CaO:n ($M_{CaO,tod}$) kulutus, kun laitokselle tuleva kalkki on 90 %:sta ja 5 % kalkista reagoi hiilidioksidin kanssa muodostaen $CaCO_3$ sekä 0,26 % on vapaata $Ca(OH)_2$.

	Biopolttoaineisuus				
	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Polttoaine					
Kivihiili	366,67	366,67	366,67	366,67	366,67
Sahanpuru	325,00	283,33	241,66	199,98	158,31
Pelletti	325,04	283,41	241,78	200,15	158,52
Torrefioitu biohiili	324,42	282,17	239,91	197,66	155,41
Hake (kaasutus)	325,16	283,65	242,14	200,63	159,11
Bio-SNG	322,45	278,23	234,01	189,79	145,58

Jolloin kaavan 20 mukaan saadaan laskettua taulukkoon 33 kuinka paljon kalkin käyttö vähenee vuodessa ($\Delta M_{CaO,tod}$) IE-direktiivin päästörajojen mukaiseen kivihiilikuormaan verrattuna.

$$(M_{CaO,tod,kh} - M_{CaO,tod,bio})^{mg/MJ} \cdot 230 MW \cdot 5500 h/a = \Delta M_{CaO,tod} \quad (20)$$

Taulukko 33: Sammuttamattoman kalkin kulutuksen väheneminen normaaliajoiin verrattuna ($\Delta M_{CaO,tod}$) [t/a]

	Biopolttoaineisuus				
	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Polttoaine					
Kivihiili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sahanpuru	189,77	379,55	569,32	759,09	948,86
Pelletti	189,59	379,17	568,76	758,34	947,93
Torrefioitu biohiili	192,42	384,84	577,26	769,67	962,09
Hake (kaasutus)	189,04	378,08	567,13	756,17	945,21
Bio-SNG	201,37	402,75	604,12	805,49	1006,86

Poltettu kalkki maksaa noin 200 €/t jolloin kaavasta 21 saadaan laskettua biopolttoainetta poltettaessa tulevat vuotuiset säästöt kalkinkulutuksessa. Tulokset on esitelty taulukossa 34.

$$d\epsilon_{kalkki} = \Delta M_{CaO,tod} \cdot 200 \text{ €/t} \quad (21)$$

Taulukko 34: Sammuttamattoman kalkin kulutuksen vähenemisen tuoma taloudellinen hyöty ($d\epsilon_{\text{kalkki}}$) [€/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	-	-	-	-	-
Sahanpuru	37 955	75 909	113 864	151 818	189 773
Pelletti	37 917	75 834	113 752	151 669	189 586
Torrefioitu biohiili	38 484	76 967	115 451	153 935	192 418
Hake (kaasutus)	37 808	75 617	113 425	151 234	189 042
Bio-SNG	40 275	80 549	120 824	161 098	201 373

Kalkin vähenemisen lisäksi lopputuotteen määrä vähenee. Lopputuotteen vähenemistä laskettaessa on otettu huomioon kalkin sitoutuminen hiilidioksidiin muodostaen karbonaattia. Karbonaatin osuus lopputuotteen määrästä on noin 2,5 %. Vapaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$:n määrä vaihtelee prosessin hyötysuhteen mukaan. Martinlaakson rikinpoistolaitoksen vapaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$:n määrä lopputuotteesta on noin 0,26 %. Lopputuote sisältää lisäksi 0,85 % vettä. (Riionheimo Y. Uomala P. 1995, 47, 51, 52.) Tällöin lopputuotetta syntyy kaavan 22 mukaan, josta saadut määrät on esitelty taulukossa 35. Martinlaakson rikinpoistolaitoksen hyötysuhde saattaa muuttua eri polttoaineiden myötä. Koska muutosta on vaikea ennustaa etukäteen, ei sitä ole otettu näissä laskuissa huomioon.

$$m_{\text{RPL}} = \frac{2,1 \cdot \Delta\text{SO}_2 + 2,6 \cdot \Delta\text{Cl}}{0,975 \cdot 0,9974 \cdot 0,9915} \quad (22)$$

Taulukko 35: Lopputuotteen määrä (m_{RPL}) [mg/MJ]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	793,35	793,35	793,35	793,35	793,35
Sahanpuru	704,00	614,64	525,29	435,94	346,59
Pelletti	704,29	615,23	526,17	437,12	348,06
Torrefioitu biohiili	702,80	612,26	521,72	431,17	340,63
Hake (kaasutus)	704,54	615,74	526,94	438,14	349,33
Bio-SNG	698,77	604,19	509,61	415,03	320,44

Jolloin kaavasta 23 nähdään, kuinka paljon lopputuotteen määrä vähenee vuodessa, kun polttoaineteho on 230 MW ja laitos toimii 5500 h/a. Tulokset on esitelty taulukossa 36.

$$(m_{\text{RPL.kh}} - m_{\text{RPL.bio}}) \text{ mg/MJ} \cdot 230 \text{ MW} \cdot 5500 \text{ h/a} = \Delta m_{\text{RPL}} \quad (23)$$

Taulukko 36: Rikinpöistön lopputuotteen (Δm_{RPL}) väheneminen normaaliajooon nähden vuodessa [t/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sahanpuru	406,91	813,81	1220,72	1627,63	2034,53
Pelletti	405,57	811,14	1216,71	1622,28	2027,85
Torrefioitu biohiili	412,34	824,68	1237,01	1649,35	2061,69
Hake (kaasutus)	404,41	808,82	1213,23	1617,64	2022,05
Bio-SNG	430,72	861,44	1292,16	1722,88	2153,60

Rikinpöistolaitoksen lopputuotetta ei voida sellaisenaan loppusijoittaa, vaan siihen joudutaan lisäämään lentotuhkaa suhteessa 30 % lopputuotetta ja 70 % lentotuhkaa. Lentotuhkan loppusijoitus lopputuotteen täyteaineena on kalliimpaa, kuin lentotuhkan loppusijoitus/hyötykäyttö sellaisenaan. Tämän ansiosta myös lentotuhkan (LT) loppusijoitus jätteenä vähenee (Δm_{LT}). Kaavalla 24 on laskettu lentotuhkan väheneminen, joka on esitelty taulukossa 37.

$$\Delta m_{LT} = \frac{\Delta m_{RPL}}{30} \cdot 70 \quad (24)$$

Taulukko 37: Jätteenä sijoitetun lentotuhkan (Δm_{LT}) väheneminen [t/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sahanpuru	949,45	1898,90	2848,35	3797,79	4747,24
Pelletti	946,33	1892,66	2838,99	3785,32	4731,65
Torrefioitu biohiili	962,12	1924,24	2886,36	3848,49	4810,61
Hake (kaasutus)	943,62	1887,24	2830,86	3774,49	4718,11
Bio-SNG	1005,01	2010,03	3015,04	4020,05	5025,07

Lentotuhkan ja rikinpöistolaitoksen lopputuotteen loppusijoittaminen maksaa Vantaan Energialle noin 50 €/tn. Hinta sisältää jäteveron 40 €/tn. (Karjalainen P. 2012; Mansner T. 2012.) Koska uuden jäteveron myötä vero nousee 50 €/tn, voidaan ennakoida, että pois viedyn lopputuotteenkin hinta nousee 10 €/tn 1.1.2013 lähtien. Alla olevaan taulukkoon 38 on laskettu kaavan 25 mukaisesti, kuinka paljon säästöjä lentotuhkan ja rikinpöistolaitoksen lopputuotteen vähenemisestä ($d\epsilon_{RPL,LT}$) aiheutuu vuodessa. Kaavassa 25 on oletettu,

että lentotuhka, joka ennen on mennyt jätteenä loppusijoitukseen, viedään hyötykäyttöön, josta joudutaan maksamaan 10 €/tn.

$$d\epsilon_{RPL,LT} = \Delta m_{RPL}^{tn/a} \cdot 60 \text{ €/tn} + \Delta m_{LT}^{tn/a} \cdot 60 \text{ €/tn} - \Delta m_{LT}^{tn/a} \cdot 10 \text{ €/tn} \quad (25)$$

Taulukko 38: Lopputuotteen vähenemisestä tuleva taloudellinen hyöty [€/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	-	-	-	-	-
Sahanpuru	71 887	143 774	215 660	287 547	359 434
Pelletti	71 651	143 301	214 952	286 603	358 253
Torrefioitu biohiili	72 846	145 693	218 539	291 385	364 232
Hake (kaasutus)	71 446	142 891	214 337	285 782	357 228
Bio-SNG	76 094	152 188	228 282	304 376	380 469

Kun lasketaan yhteen kaavan 26 mukaisesti sammuttamattoman kalkin kulutuksesta ja lopputuotteen vähenemisestä tulevat taloudelliset hyödyt, saadaan rikin vähenemisen tuomat vuotuiset säästöt (RVS), jotka on esitelty taulukossa 39.

$$d\epsilon_{kalkki} + d\epsilon_{RPL,LT} = RVS \quad (26)$$

Taulukko 39: Rikin vähenemisen tuomat vuotuiset säästöt (RVS) [€/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	-	-	-	-	-
Sahanpuru	109 841	219 683	329 524	439 366	549 207
Pelletti	109 568	219 136	328 704	438 272	547 840
Torrefioitu biohiili	111 330	222 660	333 990	445 320	556 650
Hake (kaasutus)	109 254	218 508	327 762	437 016	546 270
Bio-SNG	116 368	232 737	349 105	465 474	581 842

7.3 Biopolttoaineiden tuhkan koostumus

Skenaarioissa käytettyjen biopolttoaineiden tuhkan koostumus on lähes sama. Taulukkoon 40 on listattu kivihiilen ja biopolttoaineen (puun) poltossa syntyvän tuhkan pääkomponenttien keskiarvoiset prosenttiosuudet oksideina.

Taulukko 40: Kivihiilen ja puupolttoaineiden poltossa syntyvän tuhkan pääkomponenttien keskiarvoiset prosenttiosuudet (p- %) oksideina (Alakangas E. 2000, 39, 133.)

	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Mn ₃ O ₄
Puupolttoaineen keskiarvo	44,65	12,86	4,81	7,94	2,83	3,12	5,95	2,90	2,53	0,07	-
kivihiili	3,6	2	0,4	2,1	9,5	2,9	51	1,1	23	1	0,1

Kappaleessa 3 esiteltiin biopolttoaineiden ja kappaleessa 6 kivihiilen tuottamat tuhkamäärät MJ kohden. Nämä määrät on kerätty taulukkoon 41. Taulukosta nähdään, että tuhkamäärät ovat lähes samoja eri biopolttoainetoehdoissa. Tällöin voidaan laskea keskimääräinen tuhkamäärä MJ:a kohden, joka on 0,3967 g/MJ.

Taulukko 41: Kivihiilen ja biopolttoaineen tuhkapitoisuus

	Tuhkapitoisuuden keskiarvo	g/MJ
Kivihiili	14 %	5,08
Sahanpuru	0,45 %	0,27
Pelletti	0,60 %	0,32
Torrefioitu biohiili	0,60 %	0,28
Hake (kaasutus)	2 %	1,12
Bio-SNG	0 %	0,00

Edellisen tiedon perusteella saadaan laskettua biopolttoaineiden tuhkan koostumus (p- %) eri biopolttoaineiden prosenttiosuuksille energiantuotannosta. Tuhkan koostumus on esitelty taulukossa 42.

Taulukko 42: Biopolttoaineiden tuhkan koostumus (p- %) eri biopolttoaineen prosenttiosuuksille energiantuotannosta

% biopolttoainetta	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Mn ₃ O ₄
0	3,7	2,1	0,4	2,2	9,8	3,0	52,7	1,1	23,8	1,0	0,1
10 %	4,1	2,2	0,5	2,2	9,8	3,0	52,4	1,2	23,6	1,0	0,1
20 %	4,5	2,3	0,5	2,3	9,7	3,0	51,9	1,2	23,4	1,0	0,1
30 %	5,1	2,4	0,6	2,4	9,6	3,0	51,4	1,2	23,2	1,0	0,1
40 %	5,9	2,6	0,6	2,5	9,5	3,0	50,7	1,2	22,8	1,0	0,1
50 %	6,8	2,9	0,7	2,6	9,4	3,0	49,7	1,3	22,4	1,0	0,1

Yllä olevasta taulukosta huomataan, että alkali- ja maa-alkalimetallien määrät kasvavat poltettaessa biopolttoainetta. Niiden kasvu koko tuhkan osuudesta on kuitenkin hyvin pieni. Poltettaessa biopolttoainetta 50 %:n osuudella energiantuotannosta alkalien ja maa-alkalien osuus on vain 5 % korkeampi kuin puhtaassa kivihiilen poltossa. Kasvu ei ole huomattavan suuri. Hakkeen kaasutuksessa saadaan biopolttoaineen tuhka kerättyä suurimmilta osin talteen eri säiliöön. Tällöin kivihiilen tuhkan koostumus ei muutu ja biopolttoaineen tuhka voidaan hyötykäyttää eri kohteeseen.

Kappaleessa 5.2.2 kerrottiin että korroosion ja kerrostumisen ehkäisemiseksi kerrostumissa tulisi olla mahdollisimman vähän klooria. Klooripitoisuus kerrostumissa kasvaa huomattavasti kun $S/(Ca+2K+2Na)$ molaaripitoisuus laskee alle 0,2 polttoaineessa. Taulukkoon 43 on laskettu jokaisen skenaarion $S/(Ca+2K+2Na)$ suhde. Rikin pitoisuus MJ:a kohden on laskettu edellisessä kappaleessa. Rikkidioksidin moolimassana on käytetty 64,0,65 g/mol. CaO:n, K₂O:n ja Na₂O:n moolimassana on vastaavasti käytetty 56,1, 86 ja 54 g/mol.

Taulukko 43: Skenaarioiden $S/(Ca+2K+2Na)$ suhde

	Biopolttoaineisuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Sahanpuru	0,92	0,84	0,77	0,69	0,61
Pelletti	0,91	0,84	0,77	0,69	0,60
Torrefioitu biohiili	0,91	0,84	0,77	0,68	0,60
Hake (kaasutus)	0,91	0,84	0,77	0,69	0,60
Bio-SNG	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98

Taulukosta nähdään, että $S/(Ca+2K+2Na)$ suhde on jokaisessa skenaariossa yli 0,2. Tällöin klooripitoisuus pysyisi matalana kerrostumissa. Taulukosta kuitenkin havaitaan, että $S/(Ca+2K+2Na)$ suhde pienenee reilusti mitä enemmän poltetaan biopolttoainetta. Biopolttoaineen laatu saattaa vaihdella ja poltettaessa vähärikkistä hiiltä voidaan joutua alle 0,2 suhdeluvun. Tästä syystä hyvin matalan rikkipitoisuuden omaavaa hiiltä tulisi välttää.

Kappaleessa 5.2.2 todettiin myös, että S/Cl molaarisuhteen tulisi olla yli 0,5, jotta kalium ei reagoisi kloorin kanssa. Edellisessä kappaleessa 7.2 laskettiin myös kloorin pitoisuus MJ kohden. Kloorin moolimassana on käytetty 35,45 g/mol. Rikin ja kloorin suhdeluvut on esitelty taulukossa 44 jokaista skenaariota kohden.

Taulukko 44: S/Cl suhde eri biopolttoaine skenaariossa

	Biopolttoaineisuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Kivihiili	2,6256	2,6256	2,6256	2,6256	2,6256
Sahanpuru	2,6399	2,6577	2,6805	2,7106	2,7524
Pelletti	2,6265	2,6275	2,6289	2,6306	2,6330
Torrefioitu bio- hiili	2,6367	2,6504	2,6680	2,6914	2,7239
Hake (kaasutus)	2,6265	2,6276	2,6290	2,6308	2,6333
Bio-SNG	2,6256	2,6256	2,6256	2,6256	2,6256

Taulukosta huomataan, että S/Cl suhdeluvut pysyvät lähes samoina jokaisen skenaarion kohdalla. Tämä johtuu biopolttoaineen alhaisesta rikin ja kloorin määrästä. Tuloksista voidaan päätellä, että todennäköisesti kloori ei tuota ongelmia poltettaessa biopolttoainetta kivihiilen rinnakkaispoltoaineena.

7.4 Biopolttoaineiden kustannuslaskelma ja kannattavuus

Kustannuslaskelma on tehty olettaen eri prosenttiosuuksia biopolttoaineilla tuotetulle energialle Martinlaakso 2 kivihiilipölypolttokattilassa. Laskelmaan on vertailun vuoksi otettu mukaan hiilestä aiheutuvat kustannukset. Kustannuslaskelman teoria on esitelty kappaleessa 5.5.

7.4.1 Kustannuslaskelma ja kannattavuus tämänhetkisillä arvoilla

Kappaleessa 6 on arvioitu eri biopolttoaineiden investointikustannukset eri prosenttiosuuk-
silla energiatuotannosta. Nämä arviot on koottu alla olevaan taulukkoon 45. Koska kappaleessa 6.1.1 arvioitiin, että sahanpurua ei voida saada voimalaitokselle yli 20 % tuotetusta energiamäärästä, 30–50 % skenaariotarkastelu on jätetty pois sahanpurun osalta.

Taulukko 45: Biopolttoaineiden investointikustannukset ennen energiatukea (I_0) [milj. €]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Sahanpuru	2	3			
Pelletti	2	3	10	12	14
Torrefioitu biohiili	2	3	4	5	7
Hake (kaasutus)	16,6	21,2	25,8	30,4	35

Taulukosta 46 nähdään kuinka paljon kustannukset ovat, otettaessa huomioon kappaleessa 4.1.2 esitellyn energiatuen investointihankkeeseen. Energiatuki investointihankkeissa, jotka sisältävät uusiutuvan energian tuotantoa edistävää tavanomaista teknologiaa voivat saada 30 % tukea investoinnista. Oletetaan että investoinnista saadaan täysi tuki. Torrefioidun biohiilen ja bio-SNG:n tuotto on uutta teknologiaa, mutta niiden polttaminen vanhaa, jonka vuoksi niiden käyttöön liittyvistä investoinneista saadaan vain 30 % investointitukea.

Taulukko 46: Biopolttoaineiden investointikustannukset energiatuen jälkeen (I) [milj. €]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Sahanpuru	1,4	2,1			
Pelletti	1,4	2,1	7	8,4	9,8
Torrefioitu biohiili	1,4	2,1	2,8	3,5	4,9
Hake (kaasutus)	11,62	14,84	18,06	21,28	24,5

Seuraavaksi lasketaan kuinka paljon biopolttoaineiden investointikustannukset tulevat olemaan vuotta kohden. Tämä lasketaan annuiteettimenetelmällä, joka on esitelty kappaleessa 5.5, kaavalla 5 olettaen että jälleenmyyntiarvo on 0. Annuiteettitekijä on laskettu kaavassa 6 ja vuotuiset investointikustannukset on esitelty taulukossa 47.

Taulukko 47: Biopolttoaineiden vuotuiset investointikustannukset energiatuen jälkeen (A) [€/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Sahanpuru	176 263	264 394	881 314	1 057 577	1 233 839
Pelletti	176 263	264 394	881 314	1 057 577	1 233 839
Torrefioitu biohiili	176 263	264 394	352 526	440 657	616 920
Hake (kaasutus)	1 462 981	1 868 386	2 273 790	2 679 194	3 084 599

Alla olevassa taulukossa 48 on arvioitu eri biopolttoaineiden tarvitsema huolto- ja korjauskustannukset. Näiden kustannusten on arvioitu olevan 1,2 % investointikustannuksista. Kustannukset on laskettu käyttäen kappaleen 5.5 kaavaa 7.

Taulukko 48: Biopolttoaineiden vuotuiset huolto- ja korjauskustannukset (HK) [€/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
Sahanpuru	24 000	36 000			
Pelletti	24 000	36 000	120 000	144 000	168 000
Torrefioitu biohiili	24 000	36 000	48 000	60 000	84 000
Hake (kaasutus)	199 200	254 400	309 600	364 800	420 000

Kappaleen 5.5 taulukkoon 13 on kerätty biopolttoaineiden- ja hiilen hinnat portilla [€/MWh]. Lisäksi taulukosta 13 nähdään myös hiilen hiilidioksidimaksu [€/MWh].

Tämän lisäksi kustannuksia aiheuttaa hakkeen kuivaus. Kappaleessa 6.4.2 taulukossa 25 on esitetty, kuinka paljon energiaa hakkeen kuivattaminen vaatii. Hakkeen kuivauksen kustannukset voidaan laskea kappaleen 5.5 kaavasta 10, josta saadut tulokset on esitelty taulukossa 49. Kappaleessa 5.6.4 on laskettu hakekuivaimen hyötysuhteeksi 67,6 %, jota on käytetty kaavassa 10. Kattilanhyötysuhteena on käytetty 84 %.

Taulukko 49: Hakkeen kuivumiseen käytetty kaukolämmön hinta [€/a]

	23 MW (10 %)	46 MW (20 %)	69 MW (30 %)	92 MW (40 %)	115 MW (50 %)
HKKL	156 004	321 393	496 166	680 324	873 866

Lopuksi taulukossa 50 on polttoainekohtaiset vuosikustannukset [€/a]. Kustannukset on laskettu kappaleen 5.5 kaavalla 11.

Kaavassa on oletettu että biopolttoaine aiheuttaa kattilaan hyötysuhdehäviötä. Kappaleessa 5.1.4 on kaasutetulle hakkeelle esitetty hyötysuhdehäviöksi 0,5 %. (Isaksson J. 2012.) Jos palaminen on täydellistä, niin hyötysuhdehäviöihin vaikuttavat eniten savukaasumäärät. Koska savukaasumäärät pysyvät lähes samoina jokaisessa skenaariossa, voidaan olettaa että sahanpurun ja pelletin hyötysuhdehäviöt ovat samaa luokkaa kaasutetun hakkeen kanssa.

Syöttötariffi on laskettu kappaleen 4.1.1 kaavalla 1. Kuten kappaleesta 4.1.1 käy ilmi, metsähake on ainoa biopolttoaine, joka on oikeutettu syöttötariffitukeen tämänhetkisellä lainsäädännöllä, kun biopolttoainetta käytetään rinnakkaispolttoaineena vanhassa kivihiilikattilassa. (Oesch P. 2012) Kaavassa on oletettu kivihiilen hinnaksi 12,32 €/MWh ja hiilidioksidipäästömaksuksi 8,59 €/t_{CO2}, jolloin hakkeelle maksettu syöttötariffi on suurin mahdollinen, eli ST = 18,00 €/MWh.

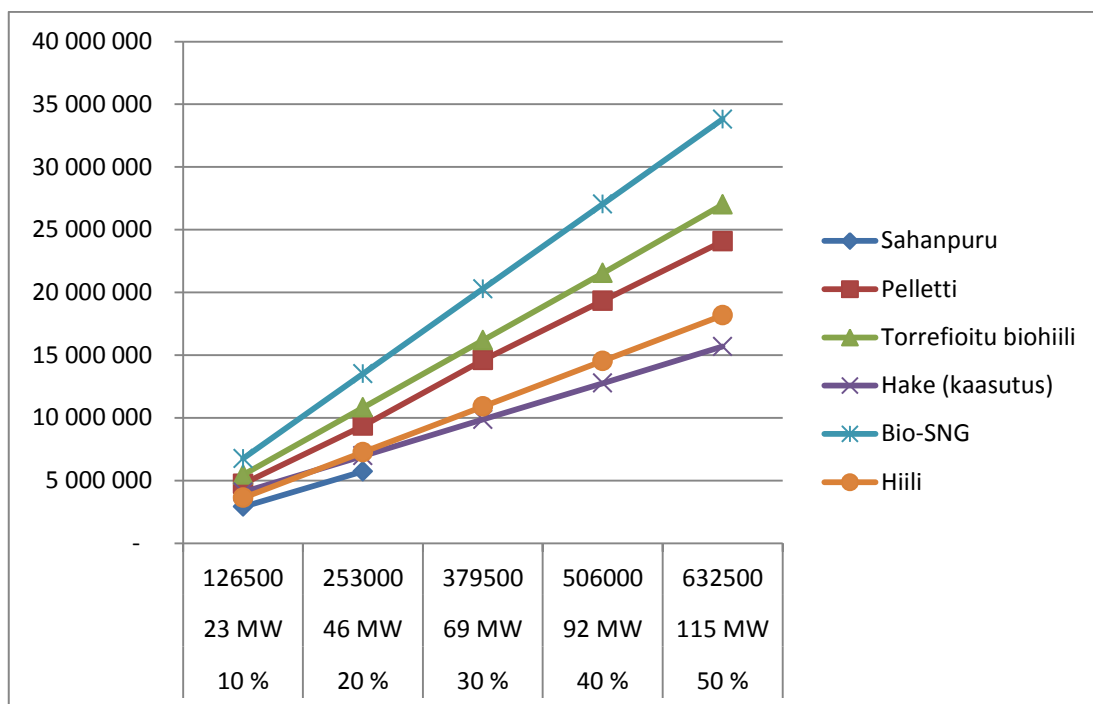
Laskuissa on myös oletettu, että:

- laitos on käynnissä 5500 h/a
- sähkön ja lämmön muuttuvat käyttökustannukset ovat 1 €/MWh ja 0,5 €/MWh
- kulutussuhde sähkölle ja lämmölle ovat 1,31 ja 1,13
- 1/3 tuotetusta energiasta on sähköä ja 2/3 lämpöä
- hiilenkaukolämpövero on 13 €/MWh (Lehtinen S. Karjalainen P. 2012.)

Tällöin saadaan taulukkoon 50, tämänhetkisellä tukijärjestelmällä ja hintatasolla, polttoainekohtaiset vuosikustannukset [milj. €/a], jotka on havainnollistettu myös kuvassa 29.

Taulukko 50: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset [milj. €/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	2,9	5,7			
Pelletti	4,7	9,4	14,6	19,3	24,1
Torrefioitu biohiili	5,5	10,8	16,2	21,5	27,0
Hake (kaasutus)	4,1	7,0	9,9	12,8	15,7
Bio-SNG	6,8	13,5	20,3	27,0	33,8
Hiili	3,6	7,3	10,9	14,5	18,2



Kuva 29: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset [€/a] y-akselilla ja tuotettavan energian [MWh/a] määrä x-akselilla.

Jotta voidaan tutkia onko investointi kannattava, lasketaan investoinnin sisäinen korko, joka on laskettu kappaleen 5.5 kaavalla 12. Tulokset on kirjattu taulukkoon 51. Taulukossa olevat tyhjät kohdat tarkoittavat, että sisäisen koron laskenta on mahdoton, vuotuisen erotuskassavirran biopolttoaineen ja hiilen välillä (k_t) ollessa negatiivinen.

Taulukko 51: Polttoainekohtaiset investoinnin sisäinen korko [%]

	Biopolttoaineisuus				
Polttoaine	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW(20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	51 %	73 %			
Pelletti					
Torrefioitu biohiili					
Hake (kaasutus)		-17 %	-5 %	0 %	3 %
Bio-SNG					

7.4.2 Kustannuslaskelman ja kannattavuuden arvioita tulevaisuudesta

Koska tulevaisuuden tukijärjestelmät ovat epävarmoja ja hiilidioksidin päästöoikeuksien hintatasoa on hyvin vaikea arvioida, on tässä kappaleessa vertailtu kaikkien skenaarioiden

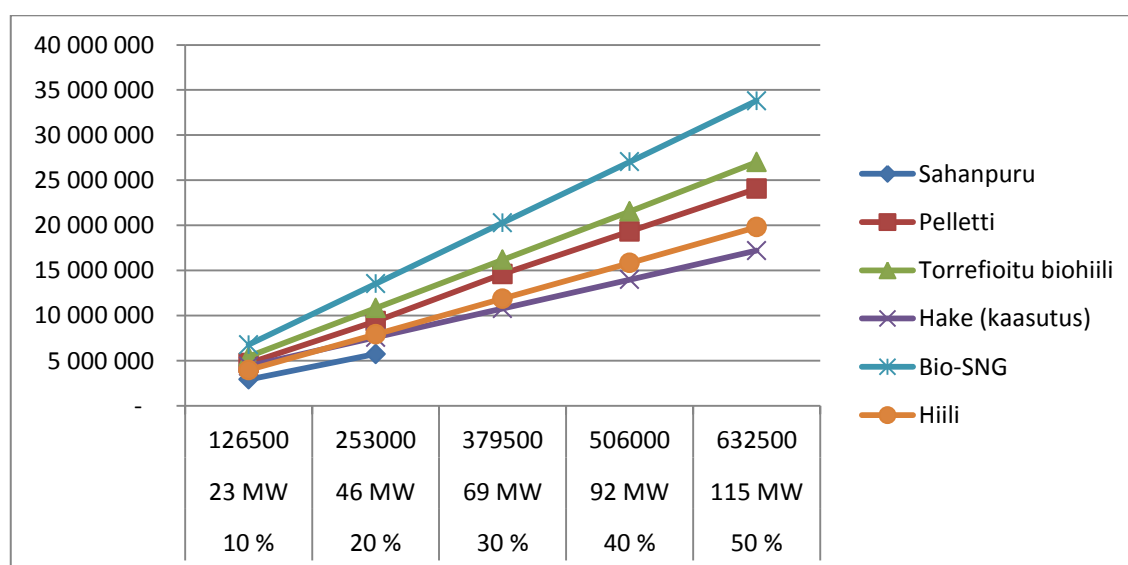
polttoainekohtaisia vuosikustannuksia. Vertailun vuoksi tähän kappaleeseen on koottu mahdollisia skenaarioita tulevaisuuden tukijärjestelmistä.

Tämänhetkinen tukijärjestelmä, kun hiilidioksidin päästöoikeuksien hinta on 15 €/tCO₂.

Taulukosta 52 ja kuvasta 30 nähdään, kuinka paljon eri skenaarioiden polttoainekohtaiset vuosikustannukset ovat, kun päästöoikeuksien hinta on 15 €/tCO₂. Taulukkoon 53 on laskettu tämän skenaarion sisäinen korko. Tämä skenaario osoittaa, miten hiilidioksidin päästöoikeuden hinta vaikuttaa kannattavuuslaskentaan. Kaikki muut parametrit on laskettu aivan kuin kappaleessa 7.4.1.

Taulukko 52: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset, kun hiilidioksidipäästöoikeuksien hinta on 15 €/tCO₂ [milj. €/a]

Polttoaine	Biopolttoaineosuus				
	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	2,9	5,7			
Pelletti	4,7	9,4	14,6	19,3	24,1
Torrefioitu biohiili	5,5	10,8	16,2	21,5	27,0
Hake (kaasutus)	4,4	7,6	10,8	14,0	17,2
Bio-SNG	6,8	13,5	20,3	27,0	33,8
Hiili	4,0	7,9	11,9	15,8	19,8



Kuva 30: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset, kun hiilidioksidipäästöoikeuksien hinta on 15 €/tCO₂ [€/a] y-akselilla ja tuotettavan energian [MWh/a] määrä x-akselilla.

Taulukko 53: Polttoainekohtaiset investoinnin sisäiset korot, kun hiilidioksidipäästöoikeuksien hinta on 15 €/t_{CO2} [%]

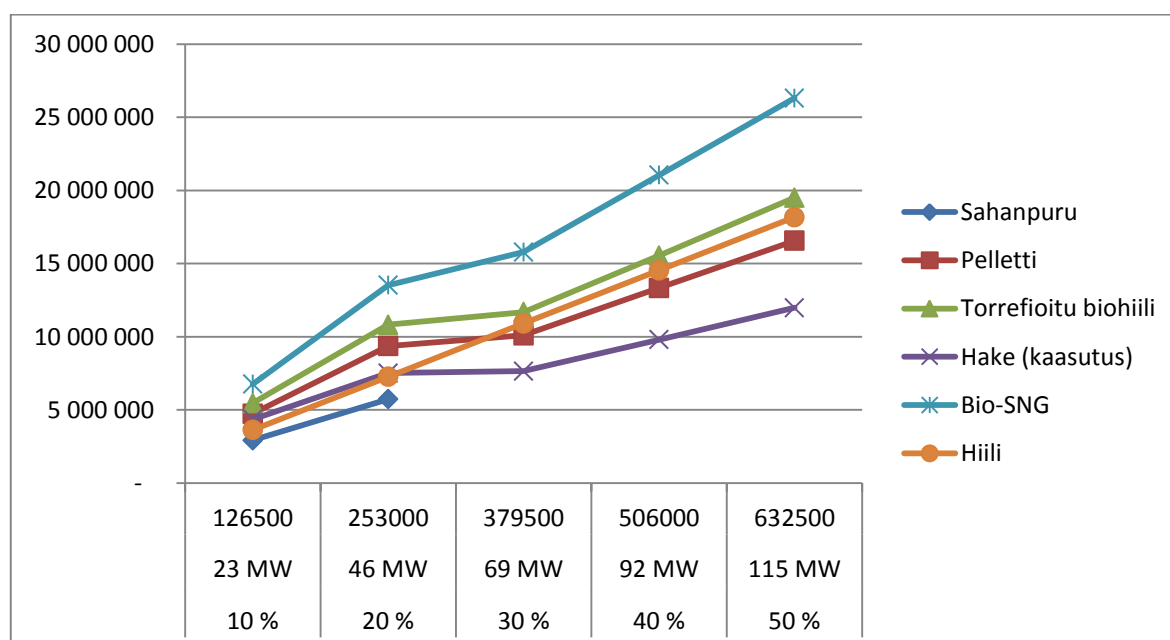
	Biopolttoaineisuus				
Polttoaine	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	74 %	104 %			
Pelletti					
Torrefioitu biohiili					
Hake (kaasutus)		-16 %	-5 %	1 %	4 %
Bio-SNG					

Kappaleessa 4.2.4 esitetyn mahdollisesti tulevan syöttötariffin skenaario.

Taulukosta 54 ja kuvasta 31 nähdään, kuinka paljon eri skenaarioiden polttoainekohtaiset vuosikustannukset ovat, kun syöttötariffi on laskettu kappaleen 4.2.4 kaavoilla 2 ja 3. Kaavaa 2 on käytetty hakkeelle, kun biomassalla tuotettu energia on 20 % tai alle tuotetusta kokonaisenergiasta. Muut biomassapolttaineet eivät ole oikeutettuja syöttötariffitukeen, kun sähköntuotanto on alle 37,5 GWh/tariffikausi. Kun biomassalla on tuotettu yli 20 % energiatuotannosta, tuotanto kuuluu metsäjalosteen syöttötariffin piiriin, joka on laskettu kaavalla 3. (Oesch P. 2012) Kaavoissa on oletettu kivihiilen hinnaksi 12,32 [€/MWh] ja hiilidioksidinpäästömaksuksi 8,59 €/t_{CO2}, jolloin ST = 11,50 €/MWh hakkeelle, kun hakkeella tuotettu energia on 20 % tai alle kokonaistuotannosta ja ST = 35,57 €/MWh kaikille skenaarioissa tarkastelluille biopolttoaineille, kun biomassalla tuotetun energian on yli 20 % kokonaistuotannosta. Kaikki muut parametrit on laskettu aivan kuin kappaleessa 7.4.1. Taulukkoon 55 on laskettu tämän skenaarion sisäinen korko.

Taulukko 54: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset, kun käytetään kappaleessa 4.2.4 esitetyn mahdollisesti tulevaa syöttötariffin skenaariota [milj. €/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	2,9	5,7			
Pelletti	4,7	9,4	10,1	13,3	16,6
Torrefioitu biohiili	5,5	10,8	11,7	15,5	19,5
Hake (kaasutus)	4,4	7,5	7,6	9,8	12,0
Bio-SNG	6,8	13,5	15,8	21,0	26,3
Hiili	3,6	7,3	10,9	14,5	18,2



Kuva 31: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset, kun käytetään kappaleessa 4.2.4 esitettyä mahdollisesti tulevan syöttötariffin skenaariota [€/a] y-akselilla ja tuotettavan energian [MWh/a] määrä x-akselilla.

Taulukko 55: Polttokohtainen investoinnin sisäinen korko, kun käytetään kappaleessa 4.2.4 esitettyä mahdollisesti tulevan syöttötariffin skenaariota [%]

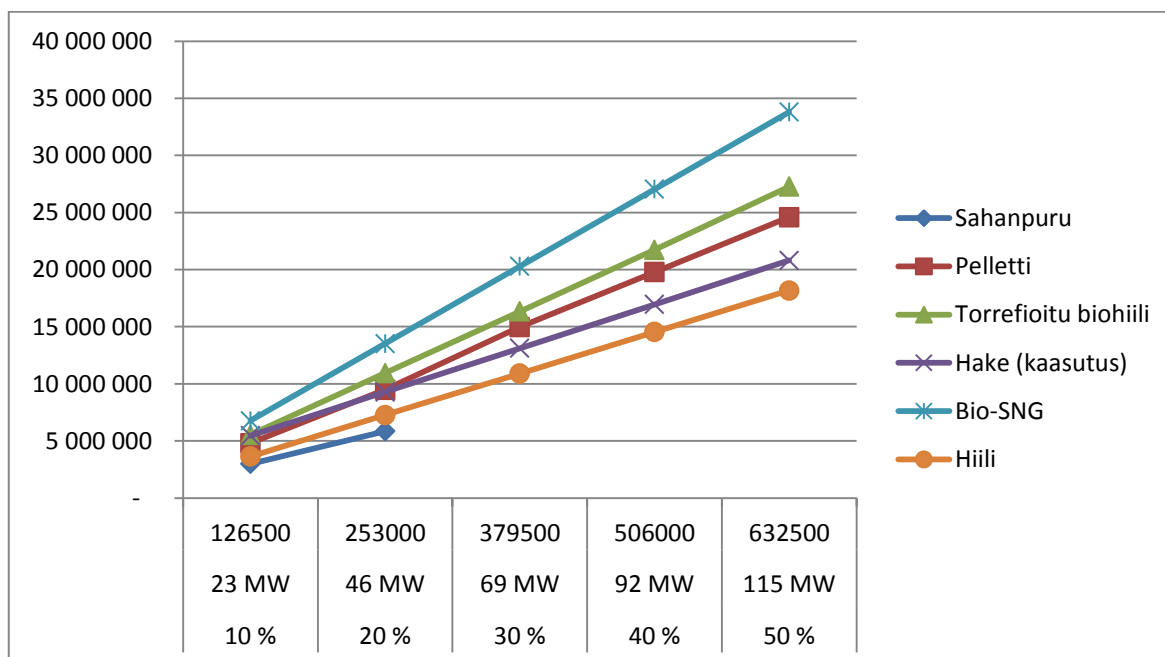
	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	51 %	73 %			
Pelletti			5 %	9 %	12 %
Torrefioitu biohiili					
Hake (kaasutus)			15 %	20 %	23 %
Bio-SNG					

Kustannuslaskelmat ilman investointitukea ja syöttötariffia.

Taulukosta 56 ja kuvasta 32 nähdään, kuinka paljon eri skenaarioiden polttoainekohtaiset vuosikustannukset ovat, kun investointituet ja syöttötariffijärjestelmä poistetaan kokonaan. Taulukkoon 57 on laskettu tämän skenaarion sisäinen korko. Kaikki muut parametrit on laskettu aivan kuten kappaleessa 7.4.1. Tämä skenario on niin kutsuttu kauhuskenario, jos rinnakkaispolttolaitos ei saisi minkäänlaista tukea.

Taulukko 56: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset ilman investointitukea ja syöttötariffia. [milj. €/a]

Polttoaine	Biopolttoaineosuus				
	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	3,0	5,8			
Pelletti	4,8	9,5	15,0	19,8	24,6
Torrefioitu biohiili	5,5	10,9	16,3	21,7	27,3
Hake (kaasutus)	5,5	9,3	13,1	17,0	20,8
Bio-SNG	6,8	13,5	20,3	27,0	33,8
Hiili	3,6	7,3	10,9	14,5	18,2



Kuva 32: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset ilman investointitukea ja syöttötariffia [€/a] y-akselilla ja tuotettavan energian [MWh/a] määrä x-akselilla.

Taulukko 57: Polttoainekohtaiset investoinnin sisäinen korko ilman investointitukea ja syöttötariffia [%]

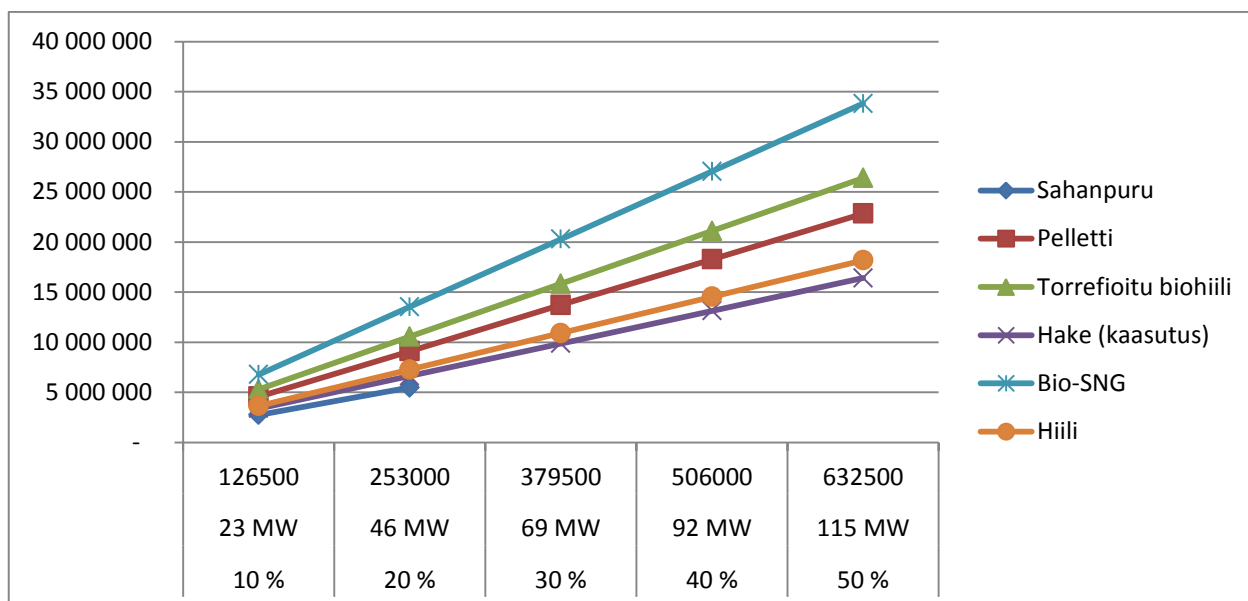
	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	31 %	47 %			
Pelletti					
Torrefioitu biohiili					
Hake (kaasutus)					
Bio-SNG					

Kustannuslaskelmat ilman tukia, kun investointi on jo maksettu.

Taulukosta 58 ja kuvasta 33 nähdään kuinka paljon eri skenaarioiden polttoainekohtaiset vuosikustannukset ovat ilman syöttötariffitukia, kun investointi on jo maksettu. Tämä skenaario on suuntaa antava tilanteelle 12 vuoden jälkeen, kun rinnakkaispolton vaatimat investoinnit on jo maksettu takaisin sekä syöttötariffitukea ei enää saada ja muut kustannukset ovat nykytasoa. Kaikki muut parametrit on laskettu aivan kuin kappaleessa 7.4.1. Tälle skenaariolle ei ole laskettu sisäistä korkoa, koska investointi on jo maksettu. Tällöin energia kannattaa tuottaa halvimmallalla mahdollisella tavalla.

Taulukko 58: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset ilman syöttötariffia, kun investointi on jo maksettu.
[milj. €/a]

	Biopolttoaineosuus				
Polttoaine	23 MW (10 %) 126500 MWh/a	46 MW (20 %) 253000 MWh/a	69 MW (30 %) 379500 MWh/a	92 MW (40 %) 506000 MWh/a	115 MW (50 %) 632500 MWh/a
Sahanpuru	2,7	5,5			
Pelletti	4,6	9,1	13,7	18,3	22,8
Torrefioitu biohiili	5,3	10,6	15,8	21,1	26,4
Hake (kaasutus)	3,4	6,6	9,9	13,1	16,4
Bio-SNG	6,8	13,5	20,3	27,0	33,8
Hiili	3,6	7,3	10,9	14,5	18,2



Kuva 33: Polttoainekohtaiset vuosikustannukset ilman syöttötariffia, kun investointi on jo maksettu, [€/a] y-akselilla ja tuotettavan energian [MWh/a] määrä x-akselilla.

7.5 Biopolttoaineiden hankinta

Vantaan Energialla on käytössä polttoainekohtaisesti keskitetty hankintaorganisaatio. Tämä tarkoittaa että, jokaisella polttoaineella on omat vastuhenkilönsä. Polttoaineiden logistiikkapalvelut ostetaan ulkopuolisilta yrittäjiltä. Vastaavanlaista organisaatiokaaviota tulisi soveltaa myös biopolttoaineiden hankintaan. Biopolttoainevalinnasta riippuen yhtiön tulisi rekrytoida biopolttoaineen hankintaorganisaatio tai henkilö, jonka tehtävänä olisi ostaa biopolttoaineita. (Ahl M. 2012.)

Sahanpurun, pelletin, torrefioitu biohiilien ja bio-SNG:n hankintaorganisaatio on yksinkertaisempi kuin hakkeen hankintaorganisaatio; tämä johtuu tuotannosta. Sahanpurua, pellettiä ja torrefioitua biohiiltä tuotetaan tietyissä tehtaissa, jolloin hankintasopimukset keskityvät vain näihin tehtaisiin. (Patomeri K. 2012.)

Hakkeen hankintaorganisaatio on riippuvainen kaasutuslaitoksen suuruudesta ja yhtiön strategisesta suunnitelmasta. Yksinkertaisimmillaan se voi toimia niin, että yhtiö ostaa kaiken hakkeen yhdeltä suurelta toimittajalta. Tällöin sovitaan polttoaineen hinta, joka voi muutaman vuoden jälkeen nousta merkittäviä määriä, koska yhtiö on riippuvainen poltto-

aineentoimittajasta. Tässä mallissa polttoaineen saanti on varmempaa, mutta polttoaineketjuun tulee yksi välikäsi lisää, joka nostaa porttihintaa korkeammaksi. (Patomeri K. 2012.)

Hakkeen hankintaorganisaation toinen vaihtoehto on yrityksen oma hankintaorganisaatio, joka ostaa kaiken polttoaineen suoraan maanomistajilta tai pieniltä metsäalan yrityksiltä. Tällöin hankintaorganisaatio työllistää kaasutuslaitoksen koosta riippuen jatkuvasti 2-4 henkilöä, jotka ostavat polttoainetta. Tämä malli on epävarmempi polttoaineen saatavuuden, laadun ja hinnan johdosta, koska yritys joutuu jatkuvasti kilpailemaan muiden biopolttoainetta käyttävien yritysten kanssa polttoaineesta. Oman suuremman hankintaorganisaation tuomat säästöt polttoaineen hankinnassa voivat kuitenkin olla merkittäviä, koska polttoaineketjusta jää pois yksi välikäsi. (Patomeri K. 2012.)

Ostettaessa haketta usealta pieneltä toimittajalta polttoaine tarvitsisi välivaraston, jossa voitaisiin säilöä suurempia määriä polttoainetta, esimerkiksi kantoja ja tukkipuuta, puskurivarastona. Tällaisessa välivarastossa voitaisiin säilöä myös puhdasta haketta lyhyen aikaa. Tällöin hankintaorganisaatiolla olisi enemmän pelivaraa neuvotellessaan hinnoista. Tällaisen välivaraston tulisi olla voimalaitoksen lähistöllä. Esimerkiksi Långmossebergeeniin rakennettavan jätevoimalan tontilla voisi olla tilaa pienelle välivarastolle. Noin 40 MW:n kaasutuslaitoksella tulisi olla noin 4 ha välivarastointialue. Poltettaessa suuria määriä haketta Långmossebergenin varastotila on yksinään liian pieni, jonka takia yhtiö joutuisi luultavasti hankkimaan toisen varastoalueen. (Patomeri K. 2012.)

Polttoaineen hankinta tapahtuisi lähialueilta. Tämä tarkoittaa, että yhtiö ryhtyisi kilpailemaan muiden haketta käyttävien yhtiöiden kanssa polttoaineesta. Tällöin hakkeen hinta luultavasti nousisi ja Vantaan Energia pakottaisi muiden metsäenergiaa käyttävien yhtiöiden laajentamaan heidän hankinta-alueitaan kauemmaksi pääkaupunkiseudulta. (Patomeri K. 2012.)

Kolmas hankintaorganisaatiomalli olisi näiden kahden mallin yhdistelmä. Tällöin taattaisiin polttoaineen saanti suurelta metsäyritykseltä ja voitaisiin myös ostaa osa tarvittavasta hakkeesta vapailta markkinoilta, jolloin yhtiö ei olisi täydellisesti riippuvainen vain yhdestä suuresta metsäyrityksestä. Tässä mallissa yhtiö saisi myös arvokasta kokemusta hakkeen hankinnasta ja kilpailusta. (Patomeri K. 2012.)

Vantaan Energian tulisi jo hyvissä ajoin kartoittaa lähiseudun biopolttoainevirrat. Tällöin voitaisiin tehdä sopimuksia polttoaineiden tuottajien kanssa, jolloin saataisiin varmistettua polttoaineen saatavuus. Jos biopolttoainesopimuksia tehdään ja Vantaan Energia ryhtyy ostamaan polttoainetta, mutta päättääkin myöhemmin hankkeen purkamisesta, voi sopimuksen ja polttoaineen myydä eteenpäin muille biopolttoainetta käyttäville yrityksille. (Patomeri K. 2012.)

7.6 IE-direktiivin joustomahdollisuuksien hyödyntäminen

Mar. 2:n voisi hyödyntää IE-direktiivissä annettuja joustomahdollisuuksia. Sitoutuminen 1 500 käyttötuntiin vuodessa olisi yksi mahdollisuus, mutta silloin Mar. 2:sen käyttötunnit vähentyisivät noin 4 000 h/a. Ainoana hyötynä olisi, että käyttöä voisi jatkaa vuoden 2023 jälkeen. Koska Mar. 2:ssa on jo nyt pienemmät päästöt, kuin LCP rajat velvoittavat ei sitoutuminen 1 500 käyttötuntiin vuodessa aiheuttaisi savukaasupäästöjen vähentämiseen tarvittavia investointikustannuksia. Sitoutuminen käyttämään laitosta enintään 17 500 tuntia ($< 2\,200$ h/a) 1.1.2016–31.12.2023 välisenä aikana olisi myös mahdollista, jolloin lisäinvestointeja ei myöskään tarvittaisi. Tällöin tuotanto Mar. 2:ssa jouduttaisiin lopettamaan ennen arvioitua käyttöänsä päättymistä. Tällä hetkellä Mar. 2:sen käyttötunnit ovat 5 000–6 000 h/a ja arvioitu käyttöikä on yli 15 vuotta. Sitoutuminen näihin joustomahdollisuuksiin aiheuttaisi huomattavat vuosittaiset tappiot. Jos kesällä 2012 tehtävässä kuntotarkastuksessa havaitaan merkittäviä vikoja (esimerkiksi huomattavaa virumista tulistimilla), jotka alentavat merkittävästi kattilan käyttöikää ja joita ei investoinnin kannalta kannata enää korjata, niin tuotantoa ei kannata jatkaa nykyisellään. Tällöin Mar. 2 voisi sitoutua 1 500 käyttötuntiin vuodessa tai 17 500 käyttötuntiin 1.1.2016–31.12.2023 välisenä aikana. (Karjalainen P, 2012)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vantaan Energian kannattaa jatkaa biopolttoaineen rinnakkaispolton tutkimista Martinlaakson voimalaitokselle. Kappaleessa 7.4 esiteltujen skenaarioiden perusteella hakkeen oma kaasutuslaitos ja sahanpurun mahdollisimman suuri hyötykäyttö ovat taloudellisimmat vaihtoehdot hiilen rinnakkaispoltoille. Biopolttoaineen rinnakkaispolton kannattavuus riippuu kuitenkin saatavien tukien määrästä. Kuten kuvasta 32 nähtiin, ilman tukia biopolttoaineen rinnakkaispolto ei ole kannattavaa tämänhetkisillä hinnoilla muilla biopolttoaineilla kuin sahanpurulla. Tulevaisuuden epävarmuuksien johdosta ei välittömiin investointeihin kannata ryhtyä. Tulevat muutokset energiatuessa ovat kriittisiä investointikohdetta valittaessa.

Kappaleessa 4.2.4. todettiin, että uusiutuville energialähteille tarvitaan lisää tukea, jotta niillä voitaisiin korvata kivihiiltä. Tätä väitettä tukevat myös kuva 29 ja taulukko 51, joista nähdään, että biopolttoaineen rinnakkaispoltoon investoiminen tämänhetkisillä tuilla on riskialtista. Tämänhetkisillä tuilla turvallisin vaihtoehto olisi polttaa pieniä määriä sahanpurua, mikäli sahanpurun saatavuus voitaisiin taata. Toinen vaihtoehto olisi tehdä oma kaasutuslaitos, jossa kaasutettaisiin haketta, mutta investoinnin kannalta tämä ei ole kannattavaa, koska sisäinen korko jää hyvin pieneksi.

Jos kappaleessa 4.2.4 esitetty skenaario tulevasta syöttötariffista toteutuu, kannattaa investoida mahdollisimman suureen kaasutuslaitokseen. Suurimpana riskinä kaasutuslaitosinvestoinnissa on hakkeen saatavuus pääkaupunkiseudulla. 200 km:n säteellä pääkaupunkiseudusta on useita yrityksiä, jotka suunnittelevat hyödyntävänsä biopolttoaineita tulevaisuudessa. Mahdollisen kilpailun takia hakkeen hinta saattaa nousta tulevaisuudessa, jolloin kaasutuslaitoksen investoinnin kannattavuus kärsii. Kaasutuslaitoksessa voi käyttää myös muitakin biopolttoaineita, mutta halvemman hakkeen käyttö on kannattavinta. Mahdollisen kilpailun johdosta Vantaan Energian tulisi kartoittaa hakkeen saatavuutta ja ryhtyä suunnittelemaan omaa hankintaorganisaatiota.

Pelkän sahanpurun poltto, 10 ja 20 %:n osuudella, hiilen rinnalla olisi myös kannattavaa, mutta sahanpurun heikon saatavuuden johdosta biopolttoaineen osuus jäisi hyvin pieneksi.

Sahanpurun saanti voimalaitokselle olisi myös täysin riippuvainen lähiseudun sahateollisuudesta. Konkurssit, lakot ja hintakilpailu saattaisi vesittää investoinnin kannattavuuden.

Pellettien hyödyntäminen hiilipölypolttokattilassa rinnakkaispolttoaineena on kolmanneksi paras vaihtoehto jokaisessa skenaariossa. Pellettien hyötykäyttö olisi taloudellisesti kannattavaa ainoastaan, jos kappaleessa 4.2.4 esitetty syöttötariffiskenaario toteutuu. Tällöin pelletti saattaisi olla jopa turvallisempi biopolttoainevaihtoehto kuin kaasutuslaitos. Tämä johtuu pellettien hyvästä saatavuudesta. Tämänhetkisillä energiatuilla hiilipölypolttolaitoksen muuttaminen pellettejä käyttäväksi rinnakkaispolttolaitokseksi ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Torrefioidun biohiilen käyttäminen hiilen rinnakkaispolttoaineena ei ollut missään skenaarioissa kannattavaa. Torrefioidun biohiilen saatavuus ja maailmanlaajuinen kiinnostus nostaa sen hinnan liian suureksi. Torrefioitu biohiili saattaa olla tulevaisuudessa erinomainen vaihtoehto, kun tuotantotekniikka on kehittynyt ja tuotantokustannukset ovat laskeneet.

Vaikka Martinlaakso 2:sen kannalta bio-SNG:n käyttö on kaikissa skenaarioissa huonoin vaihtoehto, ei se välttämättä päde maakaasuturbiineissa. Vantaan Energian tulisi selvittää bio-SNG:n kannattavuutta muissa Vantaan Energian tuotantolaitoksissa. Hinta saattaa olla kalliimpi kuin maakaasulla, mutta tukien avulla ja mahdollisten tulevien maakaasuverojen kiristysten johdosta, bio-SNG saattaa olla tulevaisuudessa taloudellisempi vaihtoehto. Bio-SNG:n jatkoselvityksessä ei kannata keskittyä pelkästään hakkeen kaasuttamiseen, vaan kannattaa perehtyä muihinkin kaasutusmahdollisuuksiin. Esimerkiksi Helsingin Energia suunnittelee bio-SNG:n tuotantoa metsäteollisuuden jätteistä eli puun kuoresta, kannoista ja purusta tai jätteestä. Myös Haminan Energialla on suunnitelmissa tuottaa bio-SNG:tä autojen polttoaineeksi mädättämällä nurmirehua, kalanviljelylaitoksen perkuujätettä, karja-eläinten lantaa sekä elintarviketeollisuuden jätettä.

Koska valtio tulee hyvin todennäköisesti tukemaan biopolttoaineita tulevaisuudessakin, on oman kaasutuslaitoksen rakentaminen kaikkien skenaarioiden mukaan todennäköisesti kaikkein kannattavin tapa tuottaa energiaa biopolttoaineista. Oman kaasutuslaitoksen jatkoselvityksen kannalta on tärkeää ottaa huomioon muutkin kaasutettavat biomassat, kuten sahanpuru ja peltobiomassa. Sahanpurun porttihinta on 2 €/MWh halvempi kuin metsä-

hakkeen. Tällöin yhtiö voisi saada lisäsäästöä ja parantaa polttoaineen saatavuutta. Sahanpuru on hakkeen tyyppinen kostea polttoaine, joka tulisi myös kuivata ennen kaasutusta.

Biopolttoaineen käyttäminen on ympäristön ja yhteiskunnan kannalta erittäin hyvä teko. Näin saadaan vähennettyä kasvihuonekaasuja hiilidioksidin, rikin ja luultavasti myös typen osalta. Tällöin Suomi pääsee myös lähemmäksi RES-direktiivin asettamaa tavoitetta. Oman kotimaisen polttoaineen käyttäminen on myös Suomen näkökulmasta kannattavaa, koska polttoaineeseen käytettävät varat tukevat kotimaista työvoimaa. Kotimaisen biopolttoaineen käyttö edistää myös Suomen tavoitetta olla energiaomavaraisempi.

Yrityksen kannalta monipuolinen energiatuotantorakenne lisää myös tuotantokykyä ja vähentää riskejä tulevaisuudessa. Tällöin tulevat energiaverot ja polttoaineiden hinnan vaihtelut eivät vaikuta yrityksen energiatuotantoon yhtä merkittävästi, kuin jos yritys olisi riippuvainen vain yhdestä polttoaineesta.

Jatkoselvityksessä tulee huomioida, että tässä työssä saadut tulokset ovat vain suuntaa antavia. Tulevaisuuden energiatuet, verojen korotukset ja polttoaineen hinnan vaihtelu vaikuttavat merkittävästi investoinnin kannattavuuteen. Investoinnin pitoaika on myös riippuvainen kesän 2012 aikana tehdystä Martinlaakso 2:sen kuntotarkastuksesta. Työn tuloksista saadaan kuitenkin suuntaa antavaa informaatiota, josta selviää, minkälaisia biopolttoainevaihtoehtoja kannattaa tutkia tarkemmin.

9 YHTEENVETO

Euroopan unionin asettamat maakohtaiset tavoitteet uusiutuvan energian hyödyntämisestä ohjaavat maita vihreämpään teknologiaan. RES-direktiivissä Suomelle asetettu tavoite tuottaa 38 % energian kokonaiskulutuksesta uusiutuvalla energialla velvoittaa Suomea panostamaan uusiutuvaan energiaan. Uusiutuvilla polttoaineilla tuotettu energia on myös osa Vantaan Energian strategista tavoitetta. Yhtiön tavoitteena on vuonna 2016 tuottaa 40 % energiatuotannosta hiilidioksidivapaana samalla kun 20 % energiatuotannosta on kokonaan uusiutuvalla energialla tuotettua.

Tämä diplomityö on tehty Vantaan Energialle osana yhtiön energiastrategiasuunnitelmaa. Työn tarkoituksena oli selvittää, minkälainen biopolttoaine sopisi parhaiten Martinlaakso 2:sen rinnakkaispolttoon ja kuinka suuria määriä sitä pystytään hyödyntämään. Tutkimuksessa kartoitettiin viisi eri biopolttoainevaihtoehtoa, joita on mahdollista käyttää hiilipölypolttokattilassa kattilamuutosten jälkeen. Työssä huomioitiin tulevat IE-direktiivin asettamat säädökset päästöjen tarkastelussa ja kattilan mahdollinen käyttöikä.

Tutkimuksessa selvisi, että biopolttoaineen kannattavuus rinnakkaispolttona hiilipölypolttokattilassa on riippuvainen energiatuesta. Pieniä määriä poltettaessa sahanpuru on ylivoimaisesti kannattavin vaihtoehto pienen investointikustannuksen ja halvan hinnan ansiosta. Sahanpurun hyötykäyttö on kannattavaa vaikka energiatukia ei saisi lainkaan. Huonon saatavuutensa johdosta sahanpurua ei kuitenkaan voida käyttää polttoaineena suuria määriä. Suuria määriä poltettaessa kannattavuus on riippuvainen tulevista energiatuista. Tällöin hakkeen kaasutuslaitos on tämän tutkimuksen perusteella kannattavin biopolttolaitosinvestointi. Tulevaisuuden ennusteet sähkön ja lämmön tarpeesta vaikuttavat myös investoinnin kannattavuuteen. Koska tulevaisuus on epävarma, ei välittömiin investointihankkeisiin kannata ryhtyä, mutta jatkoselvityksiä sahanpurun, pelletin ja oman kaasutuslaitoksen osalta kannattaa tehdä.

LÄHDELUETTELO

591/2006, Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa
28.6.2006 [viitattu 19.6.2012] Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060591>

1313/2007, Valtioneuvoston asetus energiatuen myöntämisen yleisistä ehdoista.

20.12.2007 [viitattu 3.4.2012] Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20071313>

24/11, Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmistelaista 1.9.2011 [viitattu
27.6.2012] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/37638-11024fi.pdf>

539/2006, Lannoitevalmistelaki 29.6.2006 [viitattu 27.6.2012] Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060539>

1396/2010, Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. 30.12.2010.
[viitattu 30.3.2012] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>

1126/2010, Jäteverolaki. 17.12.2010. [viitattu 23.5.2012] Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101126>

8.4.2011/311, Päästökauppalaki 8.4.2011. [viitattu 6.8.2012] Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110311>

646/2011, Jätelaki 17.6.2011. [viitattu 14.6.2012] Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>

1999/31/EY, Euroopan unionin neuvoston direktiivi 26.4.1999 kaatopaikoista. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti 16.7.1999

2009/28/EY, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 23.4.2009. Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja

2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti 5.6.2009.

2010/75/EU, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi. 24.11.2010. Teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen). Euroopan unionin virallinen lehti 17.12.2010.

A. Ahlsröm Oy. [Höyrykattilan 80 kg/s kattilan käyttö- ja huolto-ohjeet kansio] Ei julkista materiaalia

- a. Kansio II. Peters – myllyn tyyppi EM, kuvas ja huolto-ohjeet, 1981 10 s.
- b. Kansio IV. Ljugström-ilmanesilämmittimen käyttöohje Osa A. 86 s.
- c. Kansio VI. Prosessi kuvaus, sähkösuodattimen käyttö- ja hoito-ohjeet, 1982 4 s.

Agar David, Wihersaari Margareta. 2010. Torrefiointiprosessi biomassan jalostamiseen ”biohiili”. [verkkodokumentti] Kestävä bioenergia. Esitys. [viitattu 10.1.2012]. Saatavissa: http://users.jyu.fi/~daagar/agar_torrefiointi_fi.pdf

Ahl Marko. 2012. Tuotantopäällikkö; Tuotanto ja lämmönjakelu, Vantaan Energia Oy. Keskustelu.

Alakangas Eija. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. [verkkodokumentti] VTT Tiedotteita 2045. [viitattu 20.2.2012] 172 s. ISSN 1455-0865 Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Argus, 10.10.2011. Sweden’s Vattenfall upbeat over terrified pellet test. [artikkeli] [viitattu 28.6.2012] Saatavissa: <http://www.argusmedia.com/News/Article?id=769833>

Austin Anna. 23.8.2011. Glorified, torrefied & Cofired. [artikkeli] Biomass power & thermal. [viitattu 28.2.2012]. Saatavissa: <http://biomassmagazine.com/articles/5750/glorified-torrefied-cofired>

Becidan Michaël, Sørum Lars, Frandsen Flemming, Juul Pedersen Anne. 14.10.2008. Corrosion in waste-fired boilers: A thermodynamic study. [Artikkeli] Fuel, vol 88, issue 4. 595 – 604 s.

Bergman Patrick C. A. 2005. Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process. [verkkodokumentti] Energy Research Centre of the Netherlands. ECN-C--05-073. [viitattu 15.2.2012] 29 s. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf>

Bergman P. C. A. Boersman A. R. Zwart R. W. R. Kiel J. H. A. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations “BIOCOAL”. [verkkodokumentti] Energy Research Centre of the Netherlands. ECN-C--05-013. [viitattu 21.2.2012] 60 s. Saatavissa: <ftp://kernenergie.nl/pub/www/library/report/2005/c05013.pdf>

Bergman Patric C. A. Kiel Jacob H. A. 2005. Torrefaction for biomass upgrading. [verkkodokumentti] Energy Research Centre of the Netherlands. ECN-RX--05-180. [viitattu 21.2.2012] 8 s. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf>

Broström Markus, Kassman Håkan, Helgesson Anna, Berg Magnus, Andersson Christer, Backman Rainer, Nordin Anders. 14.8.2007. Sulfation of corrosive alkali chlorides by ammonium sulfate in a biomass fired CFB boiler. [Artikkeli] Fuel Processing Technology, vol 88, issue 11 – 12, 1171 – 1177 s.

Chew J.J., Doshi V. 25.10.2011. Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology. [Artikkeli] Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 15, issue 8, 4212 – 4222 s.

Dahlman. 2007. [Dahlman renewable technology www-sivut] OLGA process philosophy. [viitattu 27.3.2012] Saatavissa: <http://www.renewableenergy.nl/index.php?pageID=3238&n=544&itemID=358608>

Energiamarkkinavirasto. [Energiamarkkinaviraston www-sivut] Sähkön tuotantotuki, Syöttötariffin määräytyminen. [viitattu 30.3.2012] Saatavissa: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/alasivu.asp?gid=436&pgid=436&languageid=246>

Energiateollisuus. [Energiateollisuuden www-sivut] Päästökauppadirektiivi ja päästökauppalaki. [viitattu 4.4.2012] Saatavissa: <http://www.energia.fi/energia-ja-ymparisto/ilmastonmuutos/paastokauppa/paastokauppadirektiivi-ja-laki>

Esmerk/Pohjolan Sanomat, 17.4.2012, Energiapuun ylitarjonta vaikeuttanut Vapon pellettivientä. [Artikkeli] s. 3.

Fiber&Paper&Power express, 2/2008, KUVO-viirakuivain hyödyntää tehtaan jätelämpöä biomassan kuivauksessa. [Artikkeli] s. 6. [viitattu 6.6.2012] Saatavissa: [http://www.metso.com/MP/marketing/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-080618-2256E-75B00/\\$File/2_08_EX_FI_web.pdf?openElement](http://www.metso.com/MP/marketing/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-080618-2256E-75B00/$File/2_08_EX_FI_web.pdf?openElement)

Flyktman Martti, Kärki Janne, Hurskain Markus, Helynen Satu, Sipilä Kai. 30.6.2011. Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa. [verkkodokumentti] VTT tiedote 2595. [viitattu 10.1.2012] 63 s. ISSN 1455-0865. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2595.pdf>

Helsingin Energia, 6.9.2011. [Helsingin Energian www-sivut] Helsingin Energia mukana kehittämässä biojalostamoa Joutsenoon [tiedote] [viitattu 4.5.2012] Saatavissa: <http://www.helen.fi/tiedotteet/tiedotteet.aspx?id=338>

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi, Pakkanen Heikki. 2004, Höyrykattilatekniikka. Edita opetushallitus. 6. muuttamaton painos. 379 s. ISBN 951-37-3360-2

Hämäläinen Essi. Heinimö Jussi. 2006, Esiselvitys puupolttoaineen jalostamisesta torrefiointitekniikalla. [verkkodokumentti] Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Tutkimusraportti EN B-170. [viitattu 17.2.2012] 21 s. ISSN 1459-2630. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31048/TMP.objres.459.pdf?..>

Isaksson Juhani. 2012. Tuotepäällikkö Kaasutus- ja Pyrolyysijärjestelmät, Voimantuotantotuotelinja, Metso. Sähköposti keskustelu.

Karjalainen Pekka. 2012. Kehityspäällikkö; Tuotanto ja lämmönjakelu, Vantaan Energia Oy. Keskustelu.

Kassman Håkan, Båfven Linda, Åmand Lars-Erik. 7.3.2010. The importance of SO₂ and SO₃ for sulphation of gaseous KCl – An experimental investigation in a biomass fired CFB boiler. [Artikkeli] Combustion and Flame. vol 157, issue 9, 1649 – 1657 s.

Kauppalehti. 10.5.2012. Helsingin Energia on jo testannut biohiiltä. [artikkeli]

Kiel Jaap, 7.5.2007. Torrefaction for biomass upgrading into commodity fuels. [verkkodokumentti] Energy Research Centre of the Netherlands. IEA Bioenergy Task 32 workshop “Fuel storage, handling and preparation and system analysis for biomass combustion technologies. [viitattu 29.2.2012] Saatavissa: http://www.ieabcc.nl/workshops/task32_Berlin_ws_system_perspectives/03_Kiel.pdf

Kiel Jaap, 22.11.2011. Prospects of torrefaction to optimize bioenergy value chains. [verkkodokumentti] Energy Research Centre of the Netherlands. ECN-L--11-120 [viitattu 20.2.2012] 22 s. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2011/111120.pdf>

Kilpimaa Sari, Kuokkanen Toivo, Lassi Ulla. 2011. Kemiallisten menetelmien käyttö biotuhkien hyödyntämiseksi. [verkkodokumentti] Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineeksi, HighBio-projektijulkaisu, Jyväskylän yliopisto Kokkolan yliopistokeskus Chydenius. [viitattu 27.6.2012] 81-86 s. ISBN 978-951-39-4313-4 Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/27058/978-951-39-4313-4.pdf?sequence=1>

Kivelä Matti, 22.4.2010 Kokemuksia termisestä kaasutuksesta [verkkodokumentti] Lahti Energia. [viitattu 9.2.2012] Saatavissa: <http://www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/esitykset/Matti%20Kivel%C3%A4%20-%20Kokemuksia%20termisestä%C3%A4%20kaasutuksesta.pdf>

Kleinschmidt C. P. 2011, Overview of international developments in torrefaction. [verkkodokumentti] KEMA Nederland BV. [viitattu 24.2.2012] 9 s. Saatavissa: <http://www.bioenergytrade.org/downloads/grazkleinschmidtpaper2011.pdf>

Koivunen Kirsi, Salamäki Jouni. 23.8.2011. Raportti: IE-direktiivin ja PINO-asetuksen vaikutukset Vantaan Energian laitoksiin. ÅF-Consult Oy. 26 s. Ei julkista materiaalia.

Kone. 1984, Roller Screen Crusher BSM 20-40-50 [esite] Salpausselän Kirjapaino. 4 s. Ei julkista materiaalia

Koskiniemi Esa. 23.2.2012. Polttoaineen hankinta voimalaitoksen näkökulmasta, Vaskiluodon Voima. [verkkodokumentti] Pohjanmaan metsäklusteripäivä Pietarsaareissa [viitattu 6.6.2012] Saatavissa:

http://www.metsakeskus.fi/sv_SE/c/document_library/get_file?uuid=a9cb2724-90e9-46f6-8bdf-85d0abe49ee2&groupId=10156

Kymen Sanomat 3.6.2012, Biokaasulaitokselle mädätyksen avuksi takavarikoitua alkoholia. [artikkeli] [viitattu 26.7.2012] Saatavissa:

<http://www.kymensanomat.fi/Online/2012/06/03/Biokaasulaitokselle+m%C3%A4d%C3%A4tyksen+avuksi+takavarikoitua+alkoholia/2012313528021/4>

Lahden Energia, [Lahden Energian www-sivut]

a, Kaasutinprosessi, [viitattu 6.2.2012] Saatavissa:

<http://www.lahtienergia.fi/lahti-energia/energian-hankinta-ja-tuotanto/50/kaasutinprosessi>

b, Lahti Energian KYVO2-kaasutuslaitos, Hankkeen kuvaus, [viitattu

30.5.2012] Saatavissa: <http://www.roskatenergiaksi.fi/voimalaitos/hankkeen-kuvaus>

Lampio Raine. 18.2.2002, Puupelletin ja kivihiilen seospoltto kaukolämpölaitoksessa. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, 98 s.

Lillman Eeva. 15.11.2011. Miksi Lahdessa päädyttiin kaasutukseen? Kymijärvi II kaasutusvoimalaitos. [verkkodokumentti] Jätteen hyötykäyttöpäivät [viitattu 30.5.2012] Saatavissa: http://www.lut.fi/fi/jatepaivat/program/Documents/E_Lillman.pdf

Livingston W. R. 2011. The technical aspects of the firing and co-firing of torrefied materials in large pulverised coal-fired boilers. [verkkodokumentti] Doosan Babcock Energy [viitattu 26.2.2012] 13 s. Saatavissa:

<http://www.bioenergytrade.org/downloads/grazlivingston2011.pdf>

Lommi Marko. 2012 Käyttöinsinööri; Käyttö, Vantaan Energia Oy. Keskustelu.

Maa- ja metsätalousministeriö, 21.2.2012. [Maa- ja metsätalousministeriön www –sivut] Pienpuun energiatukilain (101/2011) voimaantulo edellyttää komission hyväksyntää. [artikkeli] [viitattu 2.5.2012] Saatavissa:

http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/metsat/hankkeet_tyoryhmat/lainsaadantohankkeet_0/pienpuunenergiatuki.html

Mansner Tarmo. 2012. Vanhempi käyttöinsinööri; Käyttö, Vantaan Energia Oy. Keskustelu.

Miktech Oy, 20.02.2012. Tavoitteena Suomen ensimmäinen biohiilipellettitehdas Ristiinaan. [Artikkeli] [viitattu 3.5.2012] Saatavissa:

<http://www.epressi.com/tiedote/energia/tavoitteena-suomen-ensimmainen-biohiilipellettitehdas-ristiinaan.html>

Molcan Peter, Gang Lu, Le Bris Thomas, Yan Yong, Taupin Benoît, Caillat Sébastien.

16.6.2009. Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3 MW_{th} Combustion Test Facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques. [Artikkeli] Fuel vol 88, issue 12, 2328 – 2334 s.

Nieminen Jorma, Kivelä Matti. 17.11.1998. Biomass CBF gasifier connected to a 350 MW_{th} steam boiler fired with coal and natural GAS – Thermine demonstration project in Lahti in Finland. [Artikkeli] Biomass and Bioenergy vol 15, issue 3, 251 – 257 s.

Oesch Pia. 9.8.2012. Asiantuntija; Sähköntuotanto ja sähkömarkkinat, tuotantokapasiteetti, tuotannon energiatehokkuusasiat, Energiateollisuus ry, Puhelinkeskustelu

Ollila Jussi. 8.6.2011. Metsolta maailman suurin biomassan kaasutuslaitos Vaskiluodon Voimalle Vaasaan. [lehdistötiedote] Metso Oyj [viitattu 6.6.2012] Saatavissa: <http://www.metso.com/news/newsdocuments.nsf/Web3NewsDoc/7F7B651311618249C22578A900207D2B?OpenDocument&ch=ChMetsoWebFin&id=7F7B651311618249C22578A900207D2B&>

Paavo Ristola Oy, 4.12.1997, Kristiinan voimalaitoksen laajennus ympäristövaikutusten arviointiselostus. [verkkodokumentti] Pohjolan Voima Oy [viitattu 27.6.2012] 161 s. Saatavissa: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:DR0IZD8QVBAJ:www.pohjolan.voi-ma.fi/_sys_/data/pubfilebank/savefile.php%3FfolderId%3D1057%26fileId%3D5699%26key%3D184d8d22d78de9be9e7c26e3b2a8f876+m%C3%A4rk%C3%A4menetelm%C3%A4ll%C3%A4+poistetun+kiintoaineen+loppusijoitus&cd=9&hl=fi&ct=clnk

Patomeri Kalle. 2012. Käyttöpäällikkö; Käyttö, Vantaan Energia Oy. Keskustelu.

Pekkarinen Mauri. 20.4.2010. Kohti vähäpäästöistä Suomea. Uusiutuvan energian velvoitepaketti. [verkkodokumentti] Työ ja elinkeinoministeriö. [viitattu 12.1.2012] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/26643/UE_lo_velvoitepaketti_Kesaranta_200410.pdf

Pesonen Janne. 2012, Oulun biotuhkien fraktiointi, kemialliset ominaisuudet ja hyötykäyttöpotentiaali. Pro gradu-tutkielma, Oulun yliopisto, Kemian laitos, 112 s.

Puheloinen Eeva-Maija, Ekroos Ari, Warsta Matias, Watkins Gary, Harju-Oksanen Mari-Linda, Dahl Olli. 2011. Teollisuuden päästädirektiivin (IED) voimaansaattaminen ja muita ympäristösuojelulain kehittämisajatuksia. Ympäristöministerin raportti 6/2011, 201 s. ISBN 978-952-11-3847-8 Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=124556&lan=fi>

Pöyry. 21.5.2010a. Raportti: IE-direktiivin investointivaikutusten skenaariotarkastelu. 17 s. Ei julkista materiaalia.

Pöyry, 29.3.2010b. Raportti: Energiateollisuuden ympäristörpooli. IE -direktiiviehdotuksen BREF –päästörajojen kustannusvaikutukset. 62 s. Ei julkista materiaalia.

Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko, Kurki-Suonio Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. Toinen täydennetty painos. 675 s. ISBN 951-666-604-3

Rantakokko Jukka-Pekka. 11/2010. Kansainvälinen Energiaverovertailu, Selvitys sähkön, polttoaineiden ja kaukolämmön ja liikenteen veroista Suomessa ja eräissä muissa maissa. [verkkodokumentti] Energiateollisuus [viitattu 4.4.2012] 133 s. Saatavissa: http://www.energia.fi/sites/default/files/rantakokko_energiaverovertailu_korjausversio_2011_01_14.pdf

Riionheimo Yrjö, Uomala Pertti. 15.8.1995. SIHTI II: Savukaasujen puhdistustekniikoiden seurantajärjestelmä, Savukaasujen puhdistustekniikoiden toiminta, Loppuraportti. YHR-Consulting Oy, Ympäristö- ja biotekniikan toimisto – BTT Oy. 343 s. Ei julkista materiaalia.

Rotaweven, 24.9.2010. 'Intelligent' energy system set to revolutionise the world's biomass fuel supply market. [verkkoartikkeli] Rotawave News release. [viitattu 26.6.2012] Saatavissa: <http://www.rotawave.com/press%20releases/Rotawave%20TIES%20-%20News%20Release%20II.pdf>

Roxon, 1986, Hankintasopimus n:o 15976 Hiilenkäsittelylaitteet. 12 s. Ei julkista materiaalia

Sarvelainen H. 2011. Lämpöyrittäjäkonsepti biotuotteelle. Diplomityö. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. 81 s.

Savolainen Kati. 2003, Co-firing of biomass in coal-fired utility boilers. [Artikkeli] Applied Energy vol. 74, 369 – 381 s.

Teknologia teollisuus. 11.3.2011. Teollisuuden päästädirektiivi 2010/75/EU [verkkodokumentti] [viitattu 5.1.2012] Saatavissa: <http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/palvelut/ippc-direktiivi.html>

TEM 22.12.2011 [Työ- ja elinkeinoministeriön www-sivut] Lainsäädäntöhankehaku, VNA energiatuen myöntämisen yleisistä ehdoista. [viitattu 3.4.2012] Saatavissa: <http://www.tem.fi/?offset=2&s=4421&xmid=4730>

TEM/2933/03.01.01/2011. 22.11.2011 (kivihiilen korvaus), Hallituksen esitys Eduskunnalle laiksi uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta annetun lain muuttamiseksi. [luonnos] HARE/Mahti [viitattu 18.4.2012] 15 s. Ei julkista materiaalia

Vaasan Yliopisto, Investoinnin sisäinen korkolaskenta. [verkkodokumentti] Talousmatematiikan perusteet. [viitattu 27.7.2012] 154–160 s. Saatavissa: <http://lipas.uwasa.fi/~mla/tma003/moniste/tmp108.pdf>

van den Berg J. W. 27.5.2010. Fly ash for concrete the new EN 450. [verkkodokumentti] Euro coal ash Conference 2010. [viitattu 19.6.2012] Saatavissa: http://ida.dk/netvaerk/idaforum/U0637a/Documents/EurocoalAsh%20Conference%2027.%20-%2028.%20maj%202010/Fly%20ash%20for%20concrete_%20the%20new%20EN%20450.pdf

van der Drift A. Boerrigter H. Coda B. Cieplik M. K. Hemmes K. 27.4.2004, Entrained flow gasification of biomass; Ash behavior, feeding issues, and system analyses. [verkkodokumentti] Energy Research Centre of the Netherlands. ECN-C--04-039. [viitattu 22.3.2012] 36 s. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/c04039.pdf>

van der Meijden Cristiaan M., Veringa Hurbert J., Rabou Luc P. L. M. 28.10.2009. The production of synthetic natural gas (SNG): A comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency. [Artikkeli] Biomass and Bioenergy, vol 34, issue 3, 302 – 311 s.

Vattenfall, 13.12.2011 [Vattenfallin www-sivut] Excellet results from co-firing tests.

[verkkodokumentti] Press & News [viitattu 28.6.2012] Saatavissa:

<http://www.vattenfall.com/en/news->

[archive.htm?newsid=AF7274C47C564F51A29B39CAE31B73C0&WT.ac=search_success](http://www.vattenfall.com/en/news-archive.htm?newsid=AF7274C47C564F51A29B39CAE31B73C0&WT.ac=search_success)

VE, [Vantaan Energian www-sivut]:

a, Tapamme toimia. [viitattu 7.3.2012] Saatavilla:

<http://www.vantaanenergia.fi/fi/TietoaKonsernista/Tapammetoimia/Sivut/default.aspx>

b, Jätevoimala – uuden ajan energiaa. [viitattu 7.3.2012] Saatavilla:

<http://www.vantaanenergia.fi/fi/TietoaKonsernista/jatevoimalahanke/Sivut/default.aspx>

c, Strategiset painopisteet. [viitattu 7.3.2012] Saatavilla:

<http://yhteiskuntavastuu2010.vantaanenergia.fi/VastuullinenJohtaminen/StrategisetPainopi/Sivut/default.aspx>

VE sisäiset tiedostot, Hiilikuljetin laitteisto pikakäyttöohje, Ei julkista materiaalia

Vesanto Petri. 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. [verkkodokumentti] Suomen ympäristökeskus Julkaisu 27/2006 97 s. ISBN 952-11-2309-5. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=54918&lan=fi>

Vision Hunters. 31.10.2011. Raportti. Metsäbiomassaan perustuvan energiantuotannon ja liiketoimintamahdollisuuksien strateginen tarkastelu Vantaan Energia Oy:lle. 134 s. Ei julkista materiaalia.

Vuoro 4. 2012. Martinlaakson voimalaitoksen valvomon vuoron 4 työntekijät; Käyttö Vantaan Energia Oy. Keskustelu.

Vuoro 5. 2012. Martinlaakson voimalaitoksen valvomon vuoron 5 työntekijät; Käyttö Vantaan Energia Oy. Keskustelu.

Liite 1

Taulukko 59: Männyn sahanpurun ja kivihiilten aineominaisuudet (Savolainen K. 2003, 373)

Parametri	Männyn sahanpuru	Venäläinen kivihiili	Puolalainen kivihiili
Kausaalinen analyysi			
Kosteuspitoisuus saapumistilassa (p-%)	51 – 63	9 – 11	9 – 13
Haihtuvat aineet (p-% _{k-a})	85 – 87	26 – 29	31 – 34
Tuhka (p-% _{k-a})	0,25 – 0,3	9 – 11	12 – 15
Perimmäinen analyysi (p-% _{k-a})			
C	51,5	76,5	70
H	6,2	4,5	4,2
O	41,8	4,9	9,2
N	0,2	1,9	1,2
S	< 0,1	0,3 – 0,4	0,8 – 1,0
Cl	< 0,01	0,25	0,21
Alempi lämpöarvo (MJ/kg saapumistilassa)	5,5 – 7	25 – 26	24 - 25

Taulukko 60: Sahanpurun ja kivihiilen tuhkan aineominaisuudet (Savolainen K. 2003, 373)

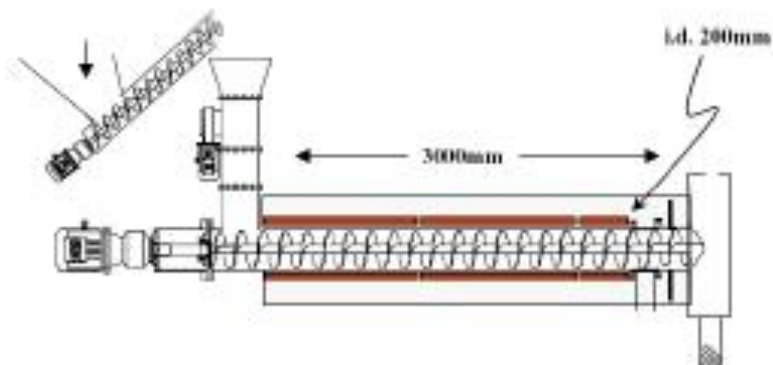
Tuhkan alkuanalyysi (p-%)	Männyn sahanpuru	Puolalainen kivihiili
K ₂ O	2 – 12	1,8 – 2,4
P ₂ O ₂	4 – 8	0,6 – 0,7
CaO	22 – 62	2,5 – 3,6
MgO	6 – 16	1,3 – 2,6
Fe ₂ O ₃	0,5 – 0,8	8,1
SO ₃	2 – 5	2,5 – 3,2
SiO ₂	1,5 – 5	50 – 55
Al ₂ O ₃	1,1 – 2,5	22 – 25
TiO ₂	< 0,6	0,9 – 1,3
Na ₂ O	0,4 – 0,8	0,3 – 1,2
Tuhkan muodostumislämpötilat (pelkistymisen ilmanpaineessa)		
Ensisulamispiste	1495	1205
Pehmenemispiste	1510	1240
Puolipallopiste	1520	1275
Täysin sulanut	1520	1340

Taulukko 61: Pelletöidyn biomassan ja hiilen ainekoostumus (Molcan P. et al. 2009, 2330)

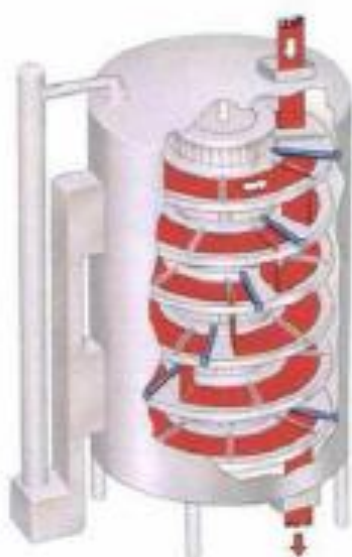
Sisältö	Biomassa	Hiili
Kosteus (p-%, saapumistilassa)	3,40	2,80
Haituva materiaali (p-%, saapumistilassa)	89,20	25,10
Tuhka (p-%, kuiva-aineesta)	4,50	14,60
C (% kuiva-aineesta)	48,60	72,10
H (% kuiva-aineesta)	4,65	3,60
O (% kuiva-aineesta)	42,00	8,01
N (% kuiva-aineesta)	0,09	1,36
S (% kuiva-aineesta)	0,093	0,35
Cl (% kuiva-aineesta)	0,024	-
Tehollinen lämpö arvo (MJ/kg)	17,5	27,8



Moving bed reactor



Screw conveyor reactor

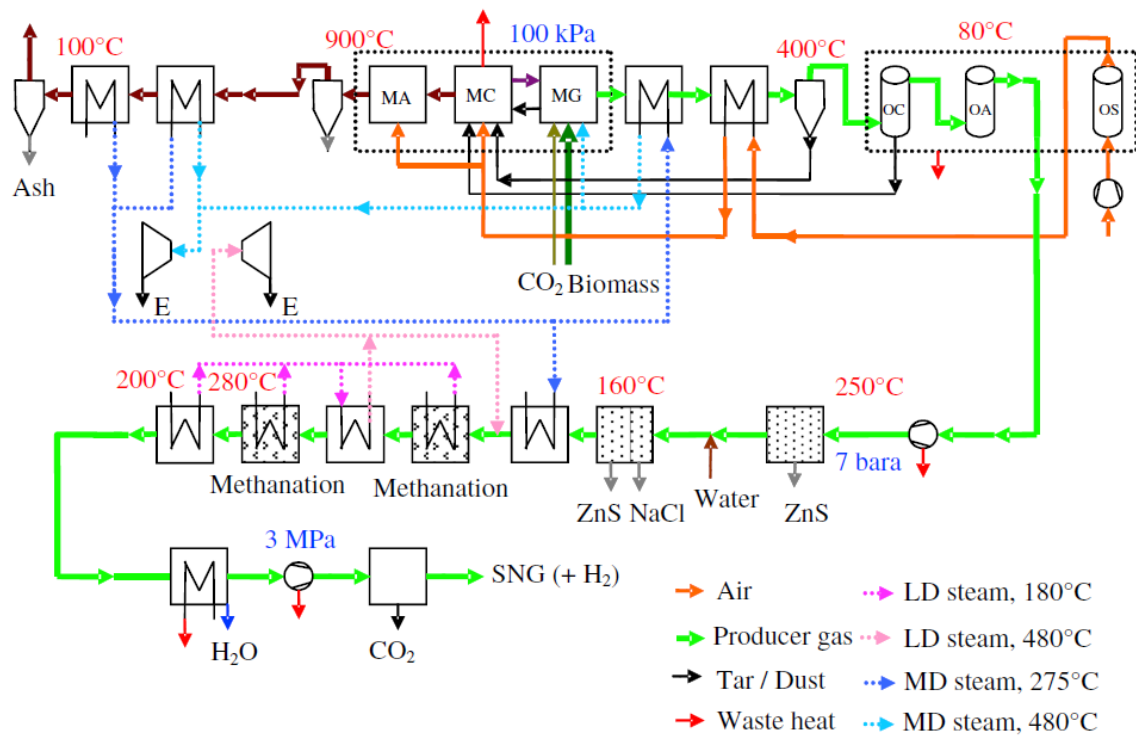


TurboDryer



Microwave reactor

Kuva 35: Eri tyyppisiä torrefiointi reaktoreita (Kiel J. 2011, 12.)



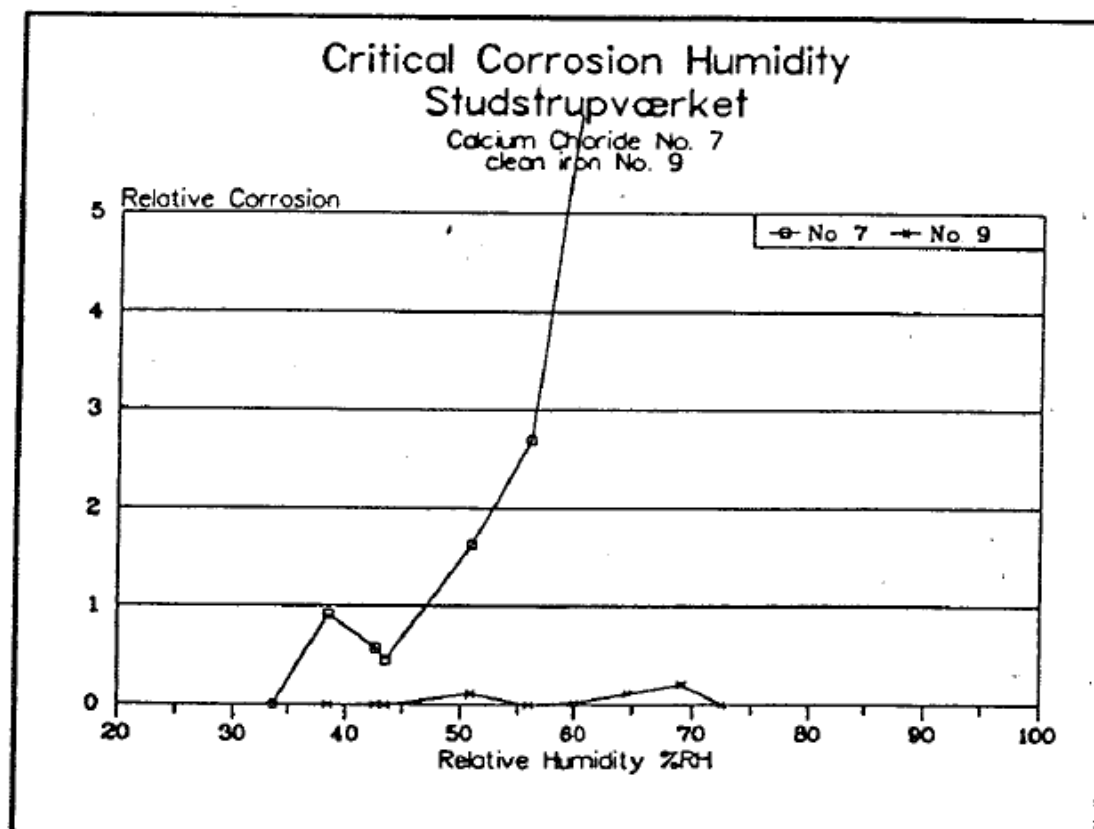
Kuva 38: Bio-SNG:n tuotantokaavio epäsuoralla lämmönsiirtoreaktorilla (van der Meijden C. M. et al. 2009, 305.)

Liite 4

Taulukko 62: Joidenkin kiinteiden polttoaineiden tuhkapitoisuus sekä tuhkan alkuainekoostumus painoprosentteina alkuaineen oksidina ilmaistuna. Arvot ovat viitteellisiä. (Raiko R. et al. 2002, 271)

Polttoaine	Tuhka %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	muu*
Hiilet											
Ruskohiili	5,2	9,8	1,6	11,3		51,2		0,1	0,1	1,3	24,6
	22,0	42,6	9,7	1,3		8,9		6,2	0,9	15,6	11,8
	4,9	12,6	8,0	14,0		16,9	4,8	9,3	0,2	23,7	10,5
Bituminen	7,5	43,2	21,5	13,7		6,9	3,0	2,8	0,5	0,8	7,6
Puut											
Koivu	0,3	0,9			3,5	45,8	11,6	8,7	15,1	2,6	11,8
Mänty	0,2	3,5			2,7	41,8	16,1	3,1	15,3	4,5	13,0
Kuusi	0,3	1,0			2,7	36,8	9,8	3,2	29,6	4,3	12,6
Kuoret											
Koivu	1,6	3,0		1,0	3,0	60,3	5,9	0,7	4,1		22,0
Mänty	1,8	14,5		3,8	2,7	40,0	5,1	2,1	3,4		28,4
Kuusi	3,4	21,7		1,8	2,7	50,5	4,2	2,8	3,5		12,8
Olki	5,8	40,0	0,6	0,4	3,1	12,0		0,4	32,0	3,3	8,2
Energia-ruoho	8,4	3,3	0,3	0,3	7,6	27,7	3,1	0,7	28,4	1,9	26,7
Ruokohelpi	8,9	65,7	1,7	1,4	5,0	2,7	1,8	0,3	4,6	1,4	15,4

Liite 5



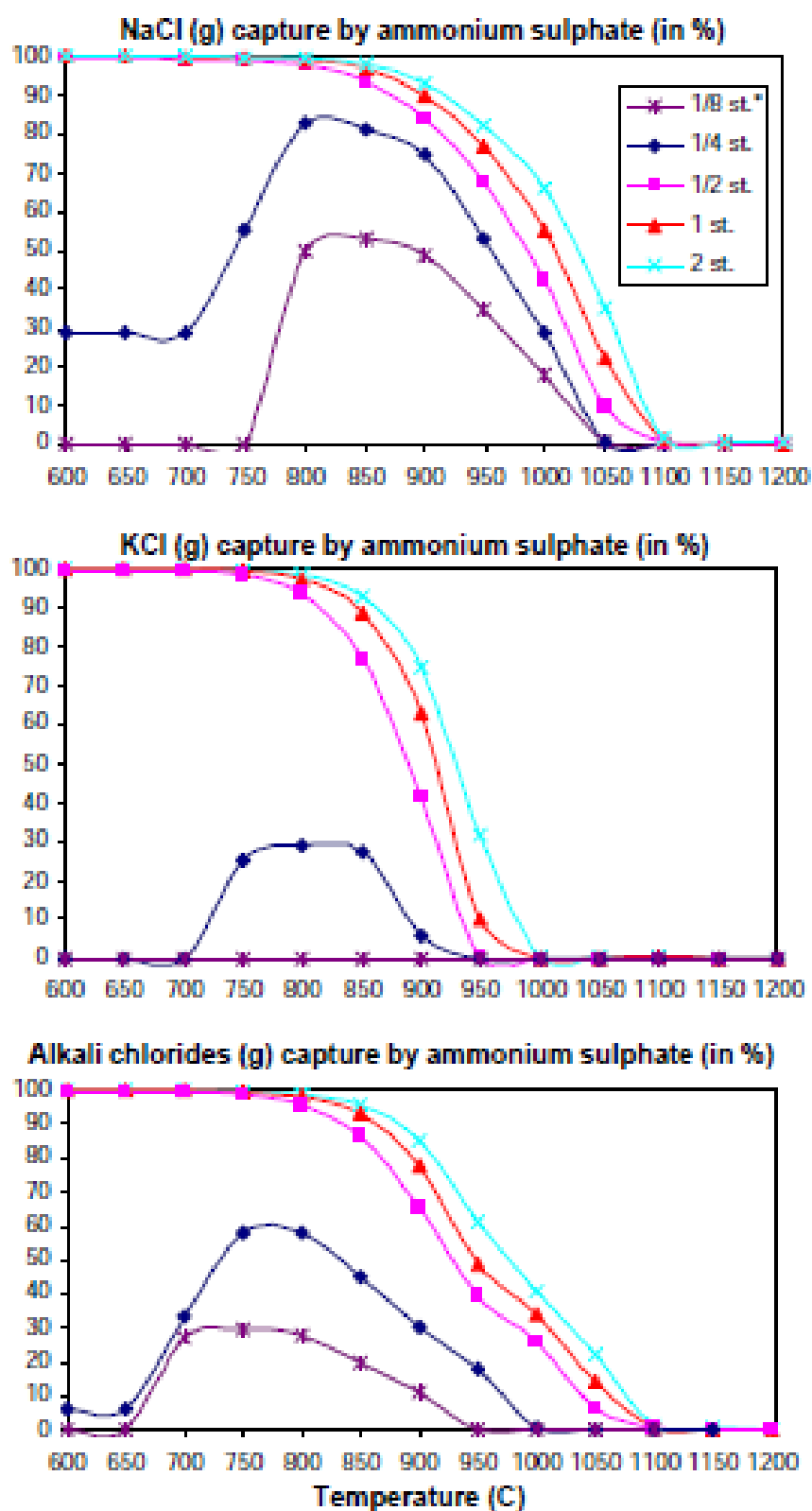
Kuva 39: Savukaasun suhteellisen kosteuden vaikutus korroosionopeuteen, CaCl_2 (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 80.)

Liite 6

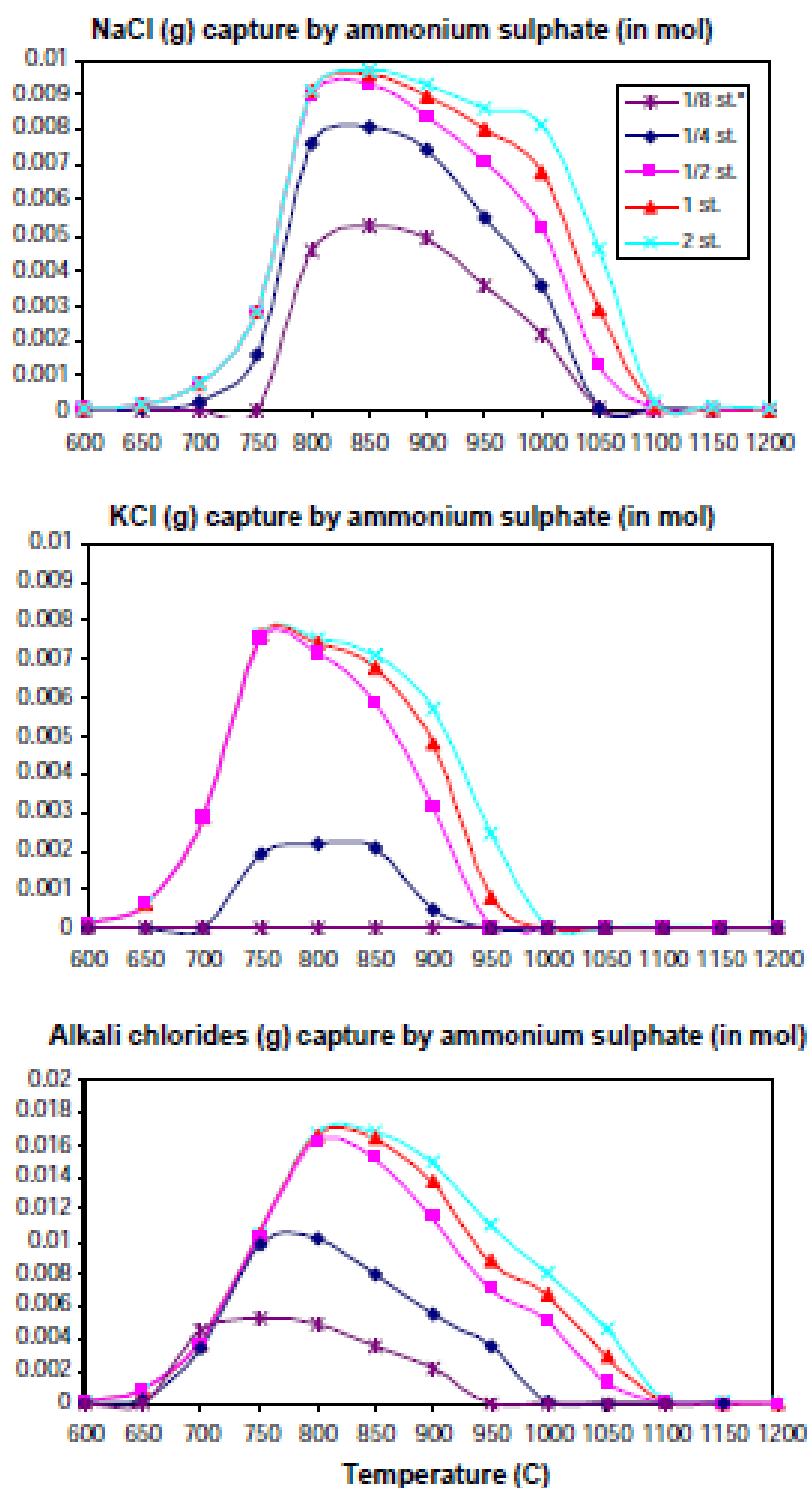
Taulukko 63: Syötetyt parametriarvot (100 g kosteaa yhdyskuntajätettä ja polttoilma) (Becidan M. et al. 2008, 597.)

Aine	Määrä (g)	Määrä (mol)
C ^a	30	2,5
O ^a	226	14,13
H ^a	12,6	12,5
N ^a	430	30,70
Pb	0,025	1,12E-4
Zn	0,025	3,82E-4
S	0,05 ja 0,5	1,56E-4 ja 1,65E-3
Cl	0,1 ja 0,01	2,28E-3 ja 2,82E-2
Na	0,03 ja 0,3	1,31E-3 ja 1,31E-2
K	0,03 ja 0,3	7,67E-4 ja 7,67E-3

^a Arvioituja savukaasun arvoja: 24,4% H₂O, 9,7% CO₂ ja loput N₂

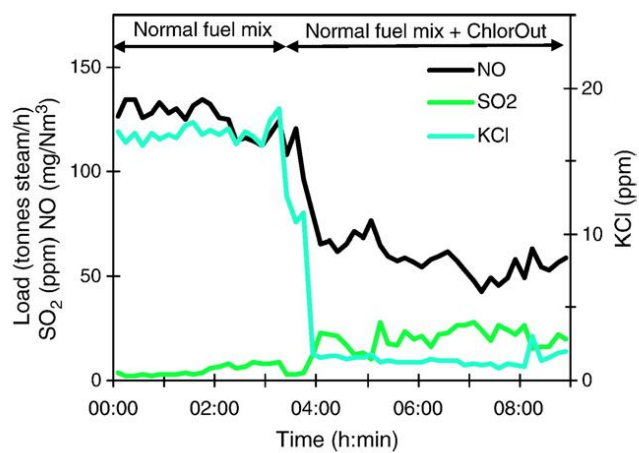


Kuva 40: Kaasumaisen alkalikloridin kaappaus ammoniumsulfaatilla (% , suhteutettuna pahimpaan skenaarioon yhteiskuntajätteen poltossa) lämpötilan funktiona. st = stökiometrisestä ammoniakin tarpeesta. (Becidan M. et al. 2008, 601.)



Kuva 41: Kaasumaisen alkalikloridin kaappaus ammoniumsulfaatilla (moolia, suhteutettuna pahimpaan skenaarioon yhteiskuntajätteen poltossa) lämpötilan funktiona. st = stökiometrisestä ammoniakin tarpeesta. (Becidan M. et al. 2008, 602.)

Liite 7



Kuva 42: Operointitila ja savukaasupäästöt (Broström M. et al. 2007, 1173.)

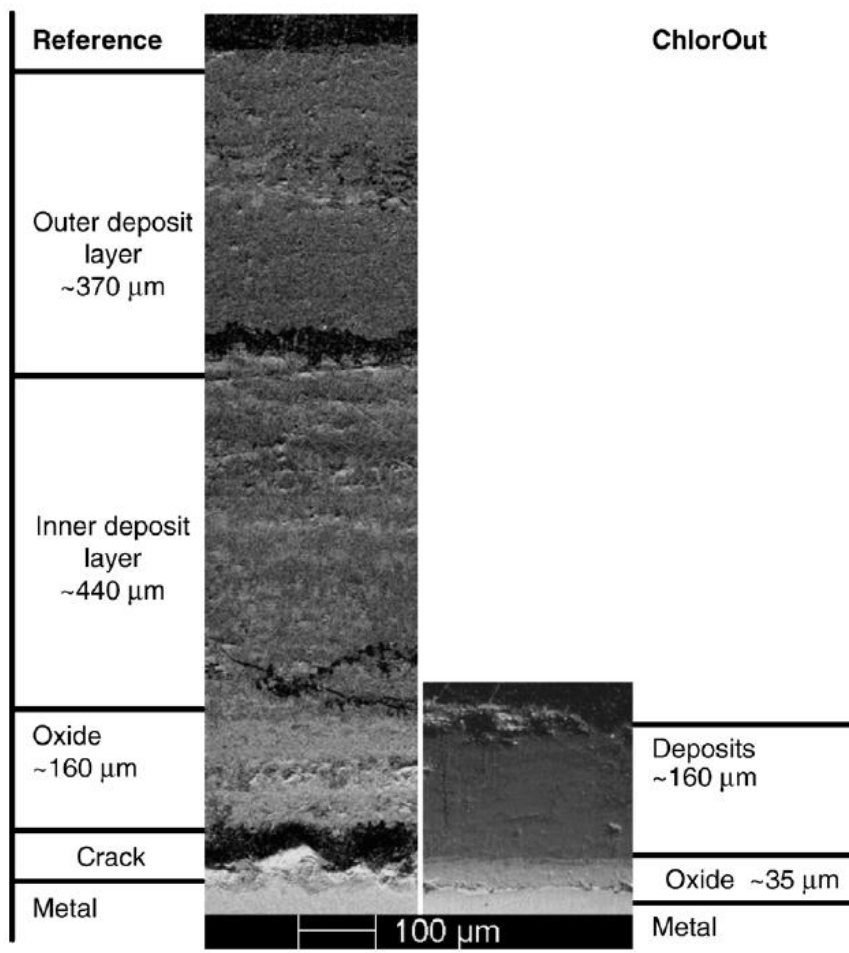
a)



b)



Kuva 43: Renkaat 1 – 3 korroosioselvitys normaaliajossa (a) ja ammoniumsulfaatti lisäyksessä (b) (Broström M. et al. 2007, 1174.)

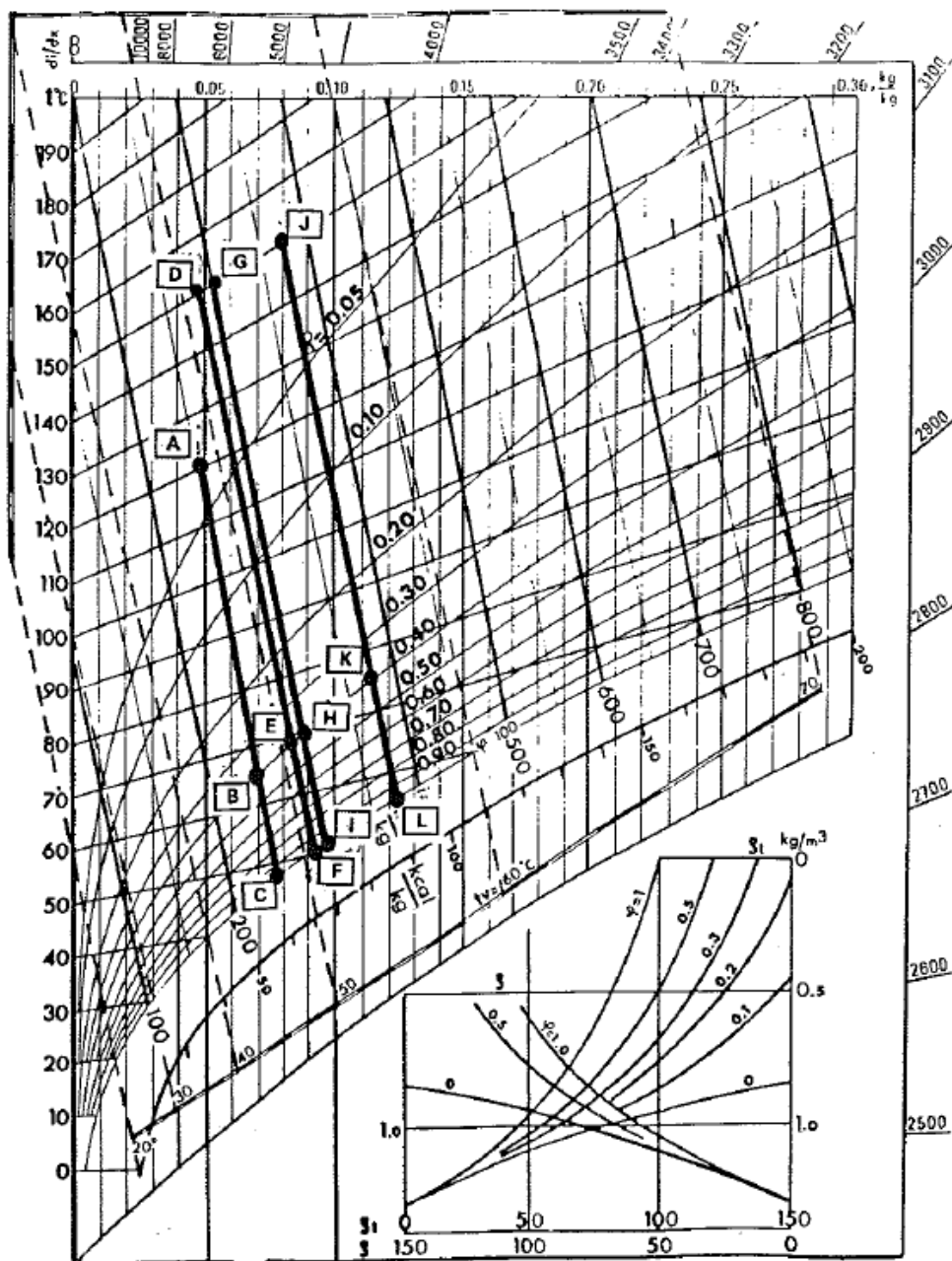


Kuva 44: SEM mikrogrammi 4. renkaan (15Mo_3 , $480\text{ }^\circ\text{C}$) hapettumisesta ja kerrostumasta normaaliajossa ja käytettäessä ChlorOut tekniikka (Broström M. et al. 2007, 1175.)

Liite 8

KOSTEAN ILMAN MOLLIERPIIRROS

Ilmalämpötilat 0...+ 2000°C



MOLLIERPIIRROKSET PATEVAT ILMANPAINEELE 1013 mbar

- | | |
|--|--|
| h = kuivan ilman lämpösisältö, kJ/kg | t_w = märän lämpömittarin lämpötila, °C |
| x = kuivan ilman vesisisältö, kg/kg | f_c = kg kuivaa/m ³ kosteaan ilmaan |
| φ = suhteellinen kosteus, % | f = kg kosteaan ilmaa/m ³ kosteaan ilmaan |
| t = kuivan lämpömittarin lämpötila, °C | $f = f_c (1 + x)$ |

Kuva 45: Kostean ilman mollierpiirros (Riionheimo Y, Uomala P. 1995, 54.)