

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Reetta Sorsa

HAKKUUTÄHTEESTÄ VALMISTETUN PYROLYYSI- ÖLJYN ELINKAAREN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT

The Life Cycle Assessment of Pyrolysis Oil Derived from Logging Residues

Työn tarkastajat:

Professori, TkT Esa Vakkilainen

Erikoistutkija, DI Sampo Soimakallio

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Reetta Sorsa

Hakkuutähteestä valmistetun pyrolyysiöljyn elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt

Diplomityö

2011

109 sivua, 36 kuvaa, 9 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Erikoistutkija, DI Sampo Soimakallio

Hakusanat: LCA, Elinkaariarviointi, RES, Biomassa, Bioneste, Päästövähennys,
Pyrolyysiöljy, Hakkuutähte.

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi EU:ssa on säädetty direktiivi uusiutuvan energian käytön edistämisestä (RES-direktiivi). Direktiivissä annetaan ohjeet biopolttoaineiden ja bionesteiden kasvihuonekaasuvaikutusten laskemiseen. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, täyttääkö hakkuutähteistä valmistettu pyrolyysiöljy RES-direktiivin asettamat määrälliset vaatimukset kasvihuonekaasujen päästövähennykselle silloin, kun pyrolyysiöljyllä korvataan raskasta polttoöljyä lämmöntuotannossa. Laskenta suoritettiin direktiivin ohjeiden mukaan. Lisäksi työssä pohdittiin laskentamenetelmän soveltuvuutta pyrolyysiöljyn ilmastovaikutusten arviointiin yleisesti.

Laskennassa huomioitiin raaka-aineen tuotannosta, jalostuksesta sekä kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt. Päästöt laskettiin ensin oletusarvoilla, jonka jälkeen suoritettiin todennäköisyyspohjainen herkkyystarkastelu valituille parametreille. Herkkyystarkastelun tuloksista huomattiin, että päästövähennys riippuu pääasiassa kahdesta tekijästä: maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvista päästöistä ja pyrolyysiprosessin tarvitseman lämmön tuotantoon käytetyistä polttoaineista. Eniten tuloksiin vaikutti kuitenkin se, oletettiin pyrolysaattori ja kattila tarkastelussa erillisiksi yksiköiksi (tapaus 1) vai kokonaisuudeksi (tapaus 2).

Tulosten perusteella näyttää siltä, että pyrolyysiöljyn käyttö lämmöntuotannossa raskaan polttoöljyn sijasta johtaa päästövähennyksiin. Saatuja tuloksia ei kuitenkaan voida pitää ennusteina pyrolyysiöljyn todellisista ilmastovaikutuksista, koska elinkaariarviointiin liittyy monia epävarmuuksia. RES-direktiivin laskentaohjeet esimerkiksi järjestelmärajausten muodostamisesta ja päästöjen kohdentamisesta ovat epätarkat. Tästä syystä direktiiviä on mahdollista tulkita usealla eri tavalla, jolloin toisistaan poikkeavat tulokset voivat silti olla kaikki direktiivin mukaisesti laskettuja. Jotta liika tulkinnanvaraisuus ei aiheuttaisi ongelmia, olisi RES-direktiivin laskentaohjetta hyvä tarkentaa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Energy Technology

Reetta Sorsa

The Life Cycle Assessment of Pyrolysis Oil Derived from Logging Residues

Master's thesis

2011

109 pages, 36 figures, 9 tables and 3 annexes

Examiners: Professor, D. (Tech.) Esa Vakkilainen
Senior research scientist, M.Sc. (Tech.) Sampo Soimakallio

Keywords: LCA, Life Cycle Assessment, RED, Biomass, Bioliquld, Greenhouse Gas Emission Saving, Pyrolysis Oil, Logging Residue.

In order to mitigate the climate change and promote the use of renewable energy, the European Community has enacted the so called Renewable Energy Directive (RED). A methodology for calculating the greenhouse gas emissions of biofuels and bioliquids is presented in RED (annex V). The climate impact of pyrolysis oil derived from logging residues was evaluated in this thesis. The greenhouse gas emissions were calculated in accordance with the methodology. The aim of this thesis was to find out whether pyrolysis oil fulfils the greenhouse gas emission saving demands or not. Heavy fuel oil was used as a fossil fuel comparator in heat production. The applicability of calculation methodology was also evaluated in this thesis.

Emissions from extraction of raw materials, processing the bioliquld, transport and distribution were taken into account. The life cycle emissions were first calculated using the best estimates for each parameter and then Monte Carlo -simulation was performed. The emissions from diminished carbon stocks and boiler fuels seemed to play a significant role to greenhouse gas emission savings of pyrolysis oil. However, the results depended on the assumption whether boiler and pyrolyzer are seen as two independent units (case 1) or as one unit (case 2).

Substituting heavy fuel oil with pyrolysis oil in heat production probably reduces greenhouse gas emissions. But the calculated greenhouse gas emission savings can't be seen as real or accurate predictions of climate effect caused by pyrolysis oil because there are many uncertainties involved with life cycle assessment. The methodology doesn't state accurately enough how to define system boundary or how to allocate emissions. That's why the methodology can be interpreted in many ways. Different interpretations create different results. To avoid interpretation problems, calculation methodology should be made more specific.

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin VTT:n Ilmastonmuutostiimissä pääasiassa syksyn ja talven 2010 aikana. Työ on osa TEKES-rahoitteista projektia ”Toisen sukupolven pyrolyysin integroidut käyttöketjut”. TEKESin BioRefine – uudet biomassatuotteet -ohjelman lisäksi rahoittajina olivat Fortum, Lassila & Tikanoja, Metso Power, UPM ja VTT.

Haluaisin kiittää kaikkia diplomityön tekoon tavalla tai toisella osallistuneita. Kiitos ennen kaikkea työn ohjaajalle Sampo Soimakalliolle, työn tarkastajalle professori Esa Vakkilaiselle ja Yrjö Solantaustalle, joka toimi projektin yhteyshenkilönä VTT:llä.

Espoossa 19.1.2011

Reetta Sorsa

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO.....	4
LYHENTEET JA TERMIT	6
1 JOHDANTO.....	9
2 ILMASTONMUUTOKSEN HILLINTÄ JA UUSIUTUVA ENERGIA.....	12
2.1 RES-direktiivi.....	13
2.2 Uusiutuvan energian käyttö Suomessa.....	14
2.2.1 Uusiutuvan energian käytön lisäämistavoitteet	15
2.3 Biomassan rooli ilmastomuutoksen hillinnässä.....	16
2.3.1 Metsät ilmastomuutoksen hillinnässä.....	17
2.3.2 Metsähakkeen tuotanto, varastointi ja käyttö	18
2.4 Pyrolyysiöljy.....	20
2.4.1 Pyrolyysiöljyn valmistus	21
2.4.2 Kattilaan integroitu pyrolysaattori	22
2.4.3 Pyrolyysiöljyn ominaisuudet	24
2.4.4 Pyrolyysiöljyn ja sivutuotteiden käyttökohteet.....	25
2.5 Elinkaariarviointi	26
2.5.1 Haitanjaollinen ja seurausvaikutuksellinen elinkaariarviointi.....	27
3 MENETELMÄ JA PARAMETRIEN VALINTA.....	29
3.1 Järjestelmärajaus.....	30
3.1.1 Tarkasteltavat tapaukset.....	32
3.1.2 Toiminnallinen yksikkö	34
3.1.3 Päästöjen kohdentaminen	34
3.1.4 GWP-kertoimet	35
3.1.5 Päästöjen laskenta ja herkkyystarkastelu.....	35
3.2 Prosessiarvot.....	36
3.3 Raaka-aineiden tuotannosta aiheutuvat päästöt.....	37
3.3.1 Metsän kasvatusta	38
3.3.2 Hakkeen tuotanto	40
3.3.3 Hakkeen kuivaus	42
3.3.4 Maaperän hiilitaseen muutos	43

3.4	Jalostuksesta aiheutuvat päästöt	47
3.4.1	Kattilan valinta.....	47
3.4.2	Sähköntuotanto	48
3.4.3	Hakkeen polttaminen.....	50
3.4.4	Turpeen tuotanto ja poltto.....	51
3.4.5	Etanolin lisääminen	54
3.5	Kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuvat päästöt	56
3.6	Muut parametrit	57
3.7	Päästövähennys.....	58
3.7.1	Fossiilisesta vertailukohdasta aiheutuva kokonaispäästö.....	58
4	TULOKSET	61
4.1	Oletusarvoilla saadut tulokset.....	61
4.1.1	Tapaus 1: Pyrolysaattori ja kattila erillisinä yksiköinä tarkasteltuna	61
4.1.2	Tapaus 2: Pyrolysaattori ja kattila yhtenä yksikkönä tarkasteltuna	62
4.1.3	Päästövähennys	64
4.2	Herkkyystarkastelun tulokset	65
4.2.1	Tapaus 1: Pyrolysaattori ja kattila erillisinä yksiköinä tarkasteltuna	65
4.2.2	Tapaus 2: Pyrolysaattori ja kattila yhtenä yksikkönä tarkasteltuna	68
5	TULOSTEN TARKASTELU	74
5.1	Yleistä elinkaariarviointien epävarmuuksista.....	74
5.2	Laskennassa tehdyt oletukset	74
5.2.1	GWP-kertoimet	75
5.2.2	Tarkasteluajanjakson valinta.....	75
5.2.3	Hakkeen varastointi.....	76
5.2.4	Kattilaan liittyvät valinnat	76
5.2.5	Raaka-aineen kuivaus.....	77
5.3	RES-direktiivin laskentamenetelmän soveltuvuus pyrolyysiöljyn ilmastovaikutusten arviointiin	80
5.3.1	Järjestelmärajaus	80
5.3.2	Kohdentaminen	85
5.3.3	Sähköntuotannon päästöt.....	86
5.3.4	Termien määritelmät.....	88

5.3.5	Biopolttoaineen käytön päästöt.....	<u>89</u>
5.3.6	Vertailuketju.....	<u>89</u>
5.4	Tulosten vertailu muihin tutkimuksiin	<u>90</u>
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	<u>92</u>
	LÄHDELUETTELO.....	<u>97</u>

Liitteet

Liite I	Kattilan mitoitus
Liite II	Iteroimalla ratkaistu päästötase tapaukselle 1
Liite III	Oletusarvoilla lasketut elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt

SYMBOLILUETTELO

Kreikkalaiset

ΔT	lämpötilojen ero	[K]
η	hyötysuhde	[-]
σ	rakennusaste	[-]
ϕ	teho	[MW]

Latinalaiset

a	ositekohtainen parametri puun kasvulle	[-]
b	ositekohtainen parametri puun kasvulle	[-]
B	kasvukerroin	[-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
e	päästö	[gCO _{2ekv} /MJ]
E	kokonaispäästö	[gCO _{2ekv} /MJ]
h	haihdutuksen energiankulutus	[MJ/kg _{H2O}]
M	kosteuspitoisuus	[%]
q_m	massavirta	[kg/s]
Q	lämpöarvo	[MJ/kg]
s	savukaasun määrä	[kg _{sk} /kg _{pa}]
t	puuston ikä	[a]

Alaindeksit

ar	saapumistilainen
b	bioneste
C	hiili
ccr	hiilidioksidin talteenotto ja korvaaminen
ccs	hiilidioksidin talteenotto ja geologinen varastointi
CO ₂	hiilidioksidi
d	kuiva-aine
e	sähkö
ec	raaka-aineiden tuotanto tai viljely
ee	sähkön ja lämmön yhteistuotannossa saatava ylimääräinen sähkö
ekv	ekvivalentti
f	fossiilinen vertailukohta
H ₂	vety
H ₂ O	vesi
i	osite
k	kuivaus
kl	kaukolämpö
l	maankäytön muutoksista johtuvat hiilivarantojen muutokset
net	tehollinen
N ₂ O	typpioksiduuli
O ₂	happi
p	jalostus
pa	polttoaine
S	rikki
sca	paremmista maatalouskäytännöistä johtuva maaperän hiilikertymä
sk	savukaasu
SO ₂	rikkidioksidi
td	kuljetus ja jakelu
tot	kokonais-
u	käytössä oleva polttoaine

LYHENTEET JA TERMIT

Lyhenteet

BFB	Kuplaleijukattila (Bubling Fluidized Bed).
CFB	Kiertoleijukattila (Circulating Fluidized Bed).
CHP	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto (Combined Heat and Power)
GWP	GWP-kertoimella (Global Warming Potential) kuvataan kasvihuonekaasun kykyä lämmittää ilmastoa suhteessa hiilidioksidiin valitulla ajanjaksolla.
IPCC	Hallitusten välinen ilmastopaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change), jonka päätehtävä on koota ja valmistella ilmastomuutosta koskevia tieteellisiä raportteja.
ITP	Kattilaan integroitu pyrolyysiprosessi (Integrated Thermal Process), jossa pyrolyysin tarvitsema lämpö saadaan kattilasta.
LCA	Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment) on menetelmä tuotteen elinkaaren ympäristövaikutusten arviointiin.
LCI	Inventaarioanalyysi (Life Cycle Inventory) on elinkaariarvioinnin vaihe, jossa tuotteen elinkaaren aikaiset syötteet ja tuotokset kootaan.
LCIA	Vaikutusarviointi (Life Cycle Inventory Assessment) on elinkaariarvioinnin vaihe, jossa arvioidaan tuotteen ympäristövaikutusten merkitsevyyttä.
LULUCF	Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous (Land Use, Land-Use Change and Forestry).

UNFCCC Yhdistyneiden kansakuntien ilmastonmuutospaneeli (United Nations Framework Convention on Climate Change), jonka tavoitteena on asettaa yhteiset tavoitteet ja säännöt ilmastonmuutoksen vastaisessa taistelussa.

Termit

Biomassa Tässä työssä biomassalla tarkoitetaan maataloudesta (sekä kasvi- että eläinperäiset aineet mukaan lukien), metsätaloudesta ja niihin liittyviltä tuotannonaloilta, myös kalastuksesta ja vesiviljelystä, peräisin olevia biologista alkuperää olevien tuotteiden, jätteiden ja tähteiden biohajoavaa osaa sekä teollisuus- ja yhdyskuntajätteiden biohajoavaa osaa.

Bioneste Tässä työssä bionesteellä tarkoitetaan biomassasta muuhun energiakäyttöön kuin liikennettä varten tuotettua nestemäistä polttoainetta.

Biopolttoaine Tässä työssä biopolttoaineella tarkoitetaan nestemäistä tai kaasumaista liikenteessä käytettävää polttoainetta, joka tuotetaan biomassasta.

Hakkuutähte Ainespuun korjuun yhteydessä hakkuupalstalle jäävää oksa- ja latvusmassaa.

Herkkyysanalyysi Menetelmä jonka avulla arvioidaan lähtötietojen vaikutusta laskennan tuloksiin.

Järjestelmärajaus Rajaus joka sulkee sisäänsä ne yksikköprosessit, jotka huomioidaan elinkaaritarkastelussa.

Kohdentaminen Syöte- ja tuotosvirtojen jakaminen pää- ja sivutuotteiden kesken.

Metsäbiomassa	Metsäbiomassa käsittää oksat, latvukset, neulaset, kannot, juuret, energiapuun, kokopuun sekä taimikonhoidosta ja vajaa tuottoisista metsistä saatavan puun.
Pyrolyysi	Hapettomassa tilassa tapahtuva terminen prosessi, jonka seurauksena syntyy nestemäinen, kaasumainen ja kiinteä jae.
Pyrolyysiöljy	Tumman ruskeaa nestettä, joka syntyy raaka-aineen hapettomissa oloissa tapahtuvan kuumennuksen seurauksena.
RES-direktiivi	Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (2009/28/EY).
Toiminnallinen yksikkö	Yksikkö, jonka avulla ilmaistaan tuotteen suorituskykyä kuvaavat ominaisuudet määrällisessä muodossa. Toiminnallisen yksikön tarkoituksena on antaa vertailuyksikkö, johon syötteitä ja tuotoksia suhteutetaan.
Uusiutuva energia	Uusiutuvalla energialla tarkoitetaan tuuli-, aurinko-, geotermistä, hydrotermistä, valtameri- ja ilmalämpöenergiaa sekä vesivoimaa, biomassaa ja kaatopaikoilla sekä jätevedenpuhdistamoilla syntyvää kaasua ja biokaasua.

1 JOHDANTO

Viimeisen sadan vuoden aikana tapahtuneet muutokset ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksissa johtuvat pääasiallisesti ihmisen toiminnasta. Antropogeenisistä lähteistä peräisin olevat kasvihuonekaasut vahvistavat kasvihuoneilmiötä, jonka seurauksena maapallon keskilämpötila nousee. Ihmisten toiminnasta ennen kaikkea fossiilisten polttoaineiden käyttö ja maankäytössä tapahtuvat muutokset kiihdyttävät ilmastonmuutosta. IPCC:n arvion mukaan maapallon keskilämpötila nousee tällä vuosisadalla 1,4–5,8 °C. Epävarmuutta arvioon aiheuttavat mm. takaisin kytkennät, hiukkasten vaikutukset ilmakehässä ja ilmastonmuutokseen vaikuttavien tekijöiden epälineaarisuus. Takaisin kytkentöjen, kuten vesihöyryn määrän vaikutusta ilmaston lämpenemiseen ei tunneta tarkasti. (IPCC 2001a, 91–92 & 527)

Rio de Janeirossa vuonna 1992 solmittu YK:n ilmastopimus oli ensimmäinen kansainvälinen sopimus ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Ilmastopimuksen tavoitteena on stabilisoida ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuudet sellaiselle tasolle, jolla voidaan estää ilmastoyhteisön vakava häiriintyminen (UNFCCC 1992, 4). Vuonna 1997 hyväksyttiin ilmastopimusta täydentävä Kioton pöytäkirja, jossa määritellään vähennettävät kasvihuonekaasut eli hiilidioksidi, metaani, typpioksiduuli, fluorihilivedyt, perfluorihilivedyt ja rikikiheksafluoridi. Pöytäkirja velvoittaa teollistuneet maat vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 5 % vuoden 1990 päästötasosta vuosina 2008–2012 (UNFCCC 1998, 3). Euroopan unionin osalta tavoite on 8 % (UNFCCC 1998, 20), joka on jaettu jäsenmaiden kesken siten, että jäsenvaltiokohtainen tavoite Suomelle on vakiinnuttaa päästöt vuoden 1990 tasolle (UNFCCC 2002, 8).

Ilmastonmuutoksen hillinnässä yksi tärkeimmistä keinoista on uusiutuvan energian käytön lisääminen. IPCC mainitsee muiksi tärkeiksi keinoiksi energiatehokkuuden parantamisen ja vähemmän hiili-intensiivisten polttoaineiden käyttöön siirtymisen. (IPCC 2001b, 5.) Eräs uusiutuva energialähde on biomassa, jolla voidaan mm. turvata tulevaisuuden energiansaantia ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Bioenergian tehokkuudessa hillitää ilmastonmuutosta on kuitenkin eroja eri bioenergiaketjujen välillä.

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi Euroopan unionissa on säädetty direktiivi uusiutuvasta energiasta eli ns. RES-direktiivi (2009/28/EY). Direktiivissä asetettu tavoite on, että vuonna 2020 vähintään 20 % energian kokonaisloppukulutuksesta yhteisössä on peräisin uusiutuvista lähteistä. Tämä tavoite on jaettu jäsenmaiden kesken siten, että kansallinen kokonaistavoite Suomelle on 38 %. Toinen tärkeä direktiivissä asetettu tavoite on, että vuonna 2020 vähintään 10 % kunkin jäsenmaan liikenteen energian loppukulutuksesta on peräisin uusiutuvista lähteistä. (2009/28/EY, artikla 3(1,4).) Jotta tuotetut biopolttoaineet ja bionesteet huomioitaisiin kansallisia tavoitteita sekä uusiutuvan energian velvoitteita täytettäessä ja että ne olisivat tuki-kelpoisia, tulee niiden täyttää RES-direktiivin kestävyyskriteerit ja päästövähennykselle annetut määrälliset tavoitteet. (2009/28/EY, artikkelit 17 & 27)

Biomassalla tuotetun energian ilmastovaikutukset riippuvat raaka-aineesta ja käytettävästä tekniikasta, mutta ennen kaikkea ilmastovaikutusten laskennassa käytetystä menetelmästä ja tehdyistä valinnoista, kuten järjestelmärajauksesta, kohdentamismenetelmästä ja toiminnallisesta yksiköstä (Soimakallio et al. 2009). Biopolttoaineiden ja bionesteiden tuotannossa syntyy kasvihuonekaasupäästöjä, koska raaka-aineiden kasvatusta, korjuuta ja polttoaineen prosessointia sekä kuljetukset vaativat yleensä fossiilisia energiapanoksia. Raaka-aineen korjuun seurauksena maaperän hiilitase voi pienentyä ja siitä aiheutuvilla päästöillä voi olla suuri vaikutus raaka-aineen tuotantoketjun kokonaispäästöihin (Kirkinen 2010, 3). Joissain tapauksissa biomassasta valmistettujen polttoaineiden päästöt voivat olla jopa fossiilista vertailukohtaa suuremmat. Tämän vuoksi on erittäin tärkeää selvittää kunkin biopolttoaineen elinkaaren ilmastovaikutukset.

Metsäbiomassasta valmistettava pyrolyysiöljy on eräs potentiaalinen uusiutuvista lähteistä peräisin oleva biopolttoaine, jota voidaan käyttää lämmön ja sähkön tuotannossa sekä jalostaa liikenteen polttoaineeksi. Pyrolyysiöljylle ei tiettävästi ole aiemmin julkaistu elinkaariarviointia Suomessa. Ulkomaisissa lehdissä on julkaistu joitakin artikkeleita pyrolyysiöljyn elinkaariarvioinneista, mutta löydettyissä artikkeleissa ei ollut käytetty RES-direktiivin laskentamenetelmää kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa. Muistakaan biopolttoaineista tai -nesteistä ei ole julkaistu kuin muutamia RES-direktiivin laskentamenetelmään perustuvia elinkaariarviointeja. Koponen (2009) testasi diplomityössään RES-direktiivin laskentamenetelmän soveltuvuutta jäte-etanolille. Thamsiroj & Murphy (2009)

laskivat rypsiä valmistetun dieselin päästöt RES-direktiivin laskentamenetelmää noudattaen. Artikkelin pohjalta näytti, että direktiiviä ei ollut tulkittu riittävän tarkasti. Artikkelissa oli esimerkiksi laskettu mukaan korvaushyötyjä, jotka tulisi RES-direktiivin mukaan rajata tarkastelun ulkopuolelle. Direktiivin laskentamenetelmää ei kuitenkaan ole vielä sovellettu käytännössä, koska direktiivi on uusi, sen vaatimukset astuvat voimaan vasta tämän vuoden aikana.

Tässä diplomityössä lasketaan hakkuutähteistä valmistettavan pyrolyysiöljyn elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt. Työssä tarkastellaan teoreettista tuotantolaitosta. Laskenta suoritetaan RES-direktiivissä esitetyn laskentaohjeen mukaisesti hyödyntäen kirjallisuudesta löytyviä arvoja pyrolyysiöljyketjun eri vaiheissa syntyvien päästöjen laskennassa. Työn tavoitteena on selvittää täyttääkö hakkuutähteistä valmistettu pyrolyysiöljy RES-direktiivin vaatimukset kasvihuonekaasupäästövähennykselle silloin, kun pyrolyysiöljyllä korvataan raskasta polttoöljyä lämmöntuotannossa. Tämän lisäksi työssä pohditaan RES-direktiivin laskentamenetelmän soveltuvuutta pyrolyysiöljyn ilmastovaikutusten arviointiin. Työssä ei tarkastella muita ympäristö- tai ilmastovaikutuksia kuin kasvihuonekaasupäästöjä. Vastavälanlaista elinkaariarviointia ei ole aiemmin julkaistu ja ottaen huomioon kasvavan kiinnostuksen pyrolyysiprosessia ja hakkuutähteiden hyödyntämistä kohtaan sekä RES-direktiivin asettamat vaatimukset, tällä elinkaariarvioinnilla tulee todennäköisesti olemaan merkittävää uutuusarvoa. Jatkossa kaikkien biopolttoaineiden ja -nesteiden tuottajien on osoitettava, että heidän valmistamansa biopolttoaineet ja bionesteet täyttävät RES-direktiivin kestävyyskriteerit. Jos direktiivissä ei ole annettu oletusarvoa, tulee päästövähennys laskea RES-direktiivin laskentamenetelmän mukaisesti. Näin ollen alan toimijoiden voi olla mahdollista hyödyntää tässä työssä saatavia tietoja laskiessaan biopolttoaineiden ja bionesteiden kasvihuonekaasupäästöjä RES-direktiivin menetelmän mukaisesti. Jos pyrolyysiöljyn päästövähennys osoittautuu RES-direktiivin vaatimusten mukaiseksi, voi tällä työllä olla myötävaikutusta pyrolyysiöljyn tuotantoinvestointeja suunniteltaessa.

2 ILMASTONMUUTOKSEN HILLINTÄ JA UUSIUTUVA ENERGIA

Ilmastonmuutoksen hillitseminen edellyttää merkittäviä päästövähennyksiä seuraavien vuosikymmenten aikana. Kööpenhaminassa 2009 järjestetyssä ilmastokokouksessa tavoitteeksi asetettiin rajoittaa maapallon keskilämpötilannousu 2 °C:een (UNFCCC 2010, 5). Jotta tämä tavoite toteutuisi, tulisi päästöjä vähentää vuoden 2000 tasosta 50–85 % vuoteen 2050 mennessä ja vuosisadan loppuun mennessä päästövähennysten pitäisi olla jo yli 100 %. Tämän suuruisilla päästövähennyksillä ilmaston keskilämpötilan nousu rajoittuu todennäköisesti 1,4–3,6 °C:een. Vaihteluväli on suuri, koska ilmastoherkkyyksiä ei tunneta tarkasti. Ilmastoherkkyydellä tarkoitetaan hiilidioksidipitoisuuden ja ilmaston lämpötilan nousun välistä yhteyttä. Parhaimman arvion mukaan keskilämpötilan nousu saataisiin rajoittumaan 2–2,4 °C:een. (IPCC 2007, 172 & 229)

Vuonna 2008 Suomen kasvihuonekaasupäästöt olivat noin 70 miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. Tämä on noin 1 % vähemmän kuin vuoden 1990 kasvihuonekaasupäästö-taso, joka Suomen pitää saavuttaa Kioton pöytäkirjan ensimmäisellä velvoitekaudella 2008–2012. Energiasektori aiheuttaa suurimman osan Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Vuonna 2008 energiasektorin osuus päästöistä oli noin 78 %. Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous (LULUCF) -sektori on Suomessa nettonielu eli poistuma ilmakehästä on suurempi kuin päästö. Vuonna 2008 nettonielun suuruus oli 35,4 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. LULUCF-sektorin sitomista kasvihuonekaasuista suurin osa oli metsien ilmakehästä sitomaa hiiltä. (Tilastokeskus 2010b, 10–13 & 249)

Uusiutuvalla energialla on merkittävä rooli päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa. Esimerkiksi biomassasta voidaan tuottaa suoraan sähköä ja lämpöä tai jalostaa biopolttoaineita korvaamaan nestemäisiä tai kaasumaisia fossiilisia polttoaineita. Jalosteen etu raaka-aineeseen verrattuna on parempi energiatiheys. Biomassasta saatavia jalosteita ovat esimerkiksi puuhiili, pelletit, briketit, etanoli, metanoli, rypsidiesel ja pyrolyysiöljy. (Helynen et al. 2002, 77.) RES-direktiivin uusiutuvan energian käytön tavoitteen saavuttaminen edellyttää uusiutuvan energian lisäämistä noin 40 TWh:lla vuoteen 2005 verrattuna (Asplund et al. 2009, 53). Suomen kansallisessa toimintasuunnitelmassa (TEM 2010a) on asetettu tavoitteet, joiden avulla uusiutuvan energian osuus saadaan nostettua kokonaistavoitteeseen.

2.1 RES-direktiivi

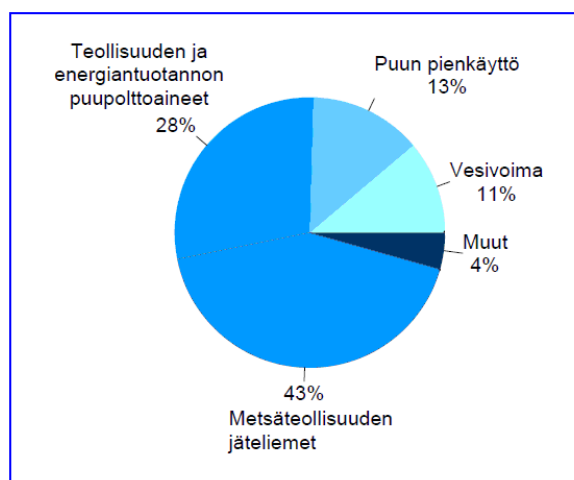
Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (2009/28/EY) uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä annettiin 23. huhtikuuta 2009. Direktiivissä on määrätty uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuus energian kokonaisloppukulutuksesta yhteisössä (2009/28/EY, artikla 3(1)). Yhteisökohtainen tavoite on jaettu kansallisiksi kokonaistavoitteiksi siten, että vuonna 2020 uusiutuvan energian osuus olisi koko yhteisössä vähintään 20 prosenttia. Suomelle asetettu kansallinen kokonaistavoite on 38 prosenttia vuoden 2020 energian kokonaisloppukulutuksesta (2009/28/EY, liite I). Tämän lisäksi jokaisessa jäsenvaltiossa uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuus kaikissa liikennemuodoissa tulee olla vuonna 2020 vähintään 10 prosenttia liikenteen energian loppukulutuksesta (2009/28/EY, artikla 3(4)).

RES-direktiivin tarkoituksena on lisätä uusiutuvan energian käyttöä ja sitä kautta vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Samalla pyritään varmistamaan, että biopolttoaineiden ja bionesteiden tuotanto on kestävä. Direktiivissä määritellään biopolttoaineita ja -nesteitä koskevat kestävyyskriteerit, jotka voidaan jakaa laadullisiin ja määrällisiin kriteereihin. Osa kriteereistä rajoittaa biopolttoaineiden ja -nesteiden tuotannossa käytettävien raaka-aineiden alkuperää ja osa niiden elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä. (2009/28/EY, artikla 17.) Biopolttoaineita ja bionesteitä ei esimerkiksi saa valmistaa raaka-aineesta, joka on hankittu biologisesti monimuotoiselta alueelta, kuten aarniometsästä ja luonnonsuojelutarkoituksiin varatulta alueelta (2009/28/EY, artikla 17(3)). RES-direktiivi rajoittaa kasvihuonekaasupäästöjä määrällisesti sekä kasvihuonekaasupäästöjen laskentaa varten annetun ohjeen kautta. Jotta tuotetut biopolttoaineet ja bionesteet huomioitaisiin kansallisia tavoitteita ja uusiutuvan energian velvoitteita täytettäessä ja ne olisivat myös tukikelpoisia, tulee niiden täyttää direktiivissä annetut kestävyyskriteerit ja biopolttoaineiden sekä bionesteiden käytöstä saatava kasvihuonekaasupäästövähennys tulee olla vähintään 35 %. Vuodesta 2017 alkaen vähennys tulee olla 50 % ja vuonna 2017 tai sen jälkeen käytössä olevissa laitoksissa vuodesta 2018 eteenpäin 60 %. (2009/28/EY, artikla 17(1,2).) EU:n jäsenmaiden on täytynyt toimeenpanna RES-direktiivi kansalliseen lainsäädäntöönsä 5.12.2010 mennessä. Kestävyyskriteereiden kasvihuonekaasupäästöjä koskevaa osuutta sovelletaan 1.4.2013 alkaen niihin liikenteen biopolttoaineisiin ja bionesteisiin, jotka on tuotettu 23.1.2008 jo toiminnassa olleissa laitoksissa. Muutoin direktiiviä sovelletaan ilman siirtymäaikaa.

Jos biopolttoaineet ja bionesteet aiotaan huomioida kansallisia tavoitteita ja uusiutuvan energian velvoitteita täytettäessä, jäsenvaltioiden on vaadittava talouden toimijoita eli polttoaineen toimittajia osoittamaan, että RES-direktiivin 17 artiklassa annetut kestävyyskriteerit täyttyvät. Näin tulee menetellä myös biopolttoaineiden ja bionesteiden tukikelpoisuutta arvioitaessa. (2009/28/EY, artikla 18(1).) Biopolttoaineiden ja bionesteiden käytöstä saatava kasvihuonekaasupäästövähennys voidaan osoittaa käyttämällä oletusarvoa tai lasquemalla todellinen arvo. Jos tuotantoketjulle on RES-direktiivin liitteessä V määritetty kasvihuonekaasupäästöjen vähennysten oletusarvo ja jos liitteen V, kohdan C7 mukaisesti laskettu maankäytön muutoksista johtuvista hiilivarantojen muutoksista aiheutuvat päästöt ovat nolla tai alle nolla, voidaan käyttää kyseistä oletusarvoa. Jos oletusarvoa ei ole RES-direktiivissä annettu, täytyy todellinen arvo laskea liitteen V laskentaohjeen mukaisesti. (2009/28/EY, artikla 19(1).) Esimerkiksi pyrolyysiöljylle ei ole määritetty oletusarvoa, jonka vuoksi todellinen arvo lasketaan direktiivin laskentaohjeen mukaisesti.

2.2 Uusiutuvan energian käyttö Suomessa

Vuonna 2006 energian kokonaiskulutuksesta (1492 PJ) tuotettiin 25 % uusiutuvalla energialla. Puupolttoaineiden osuus kokonaiskulutuksesta oli 21 % ja vesi- ja tuulivoiman sekä muiden uusiutuvien osuus oli yhteensä 4 %. Kuvassa 1 on esitetty uusiutuvan energian käyttö energialähteittäin eriteltynä vuodelta 2006. Muut uusiutuvat energialähteet sisältävät kierrätyspolttoaineen bio-osuuden, biokaasun, lämpöpumput, tuulivoiman ja muut biopolttoaineet. (Energiatilasto 2007)



Kuva 1. Uusiutuvien energialähteiden käyttö energialähteittäin vuonna 2006 (muokattu lähteestä Energiatilasto 2007).

2.2.1 Uusiutuvan energian käytön lisäämistavoitteet

RES-direktiivissä uusiutuvan energian käytölle asetetun tavoitteen saavuttaminen edellyttäisi uusiutuvan energian lisäämistä noin 40 TWh:lla vuoteen 2005 verrattuna (Asplund et al. 2009, 53). Kansallisessa uusiutuvan energian toimintasuunnitelmassa todetaan, että metsävarojen tarjoamaa hakkuupotentiaalia ei hyödynnetä tällä hetkellä täysimääräisesti. Suurin lisäyspotentiaali on metsähakkeella, jonka käyttöä CHP-tuotannossa ja erillisessä lämmöntuotannossa on tarkoitus nostaa 13,5 milj. kiinto-m³:een. Vuonna 2009 metsähakkeen käyttö oli vain 5 milj. kiinto-m³. Suurin osa metsäenergian hyödyntämisen lisäyksestä on tarkoitus tuottaa pienpuulla ja kannoilla (TEM 2010a, 2–3).

Vaikka metsäteollisuuden raaka-ainekäyttö on puun ensisijainen käyttökohde, on energiantuotantoon kuitenkin tarjolla hukkarunkopuuta ja latvusmassaa, joille ei ole kysyntää metsäteollisuudessa. Arviolta noin 15 milj.m³ latvusmassaa, kantoja, hukkarunkopuuta ja pienlöpimittaista kokopuuta voitaisiin ohjata energiakäyttöön vaarantamatta metsäteollisuuden raaka-aineen saantia. Suurin potentiaali muodostuu juuri pätehakkuiden hakkuutähteistä, kantomurskeesta ja pienpuuhakkeesta, joka tuotetaan energiapuusta ja ensiharvennuspuusta. (Pirilä et al. 2004, 123.) Metsähakkeiden saatavuuteen liittyy oleellisesti puun kysyntä ja paikallisuus, sillä jalostamattomana metsähakkeita ei ole taloudellisesti kannattavaa kuljettaa kauas (Helynen et al. 2002, 13). Asplund et al. (2005, 15–16) arvioi metsähakkeen tuotantomahdollisuudeksi 15 TWh vuonna 2015, joka on 63 % arvioidusta teknistaloudellisesta korjuupotentiaalista (23,8 TWh).

Suomen kansallisessa toimintasuunnitelmassa on uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämiseksi asetettu tavoitteet, jotka kattavat monipuolisesti eri uusiutuvan energian muodot. Asetetut tavoitteet on tarkoitus saavuttaa vuoteen 2020 mennessä. Tuuli-voiman tuotanto on tarkoitus nostaa 6 TWh:iin ja metsähakkeen käyttö CHP-tuotannossa ja erillisessä lämmöntuotannossa 28 TWh:iin. Vesivoiman tuotantoa lisätään 0,5 TWh:a olemassa olevien voimalaitosten tehonkorotuksilla ja pienvesivoiman rakentamisella. Pienpuun käyttö pyritään pitämään nykyisellä tasolla 12 TWh:ssa. Sekä pellettien käytön, että kierrätyspolttoaineiden uusiutuvan energian osuuden on tarkoitus olla 2 TWh:a vuonna 2020. Tämän lisäksi tavoitteeksi on asetettu lämpöpumppujen uusiutuvan energian tuotannon, liikenteen biopolttoaineiden sekä biokaasun käytön kasvattaminen. (TEM 2010a, 2–6)

Asplund et al. (2009) ehdottavat raportissaan ”Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015” uusiutuvien energialähteiden käytön kotimaiseksi tavoitteeksi 40 %, EU:n asettaman 38 % sijaan. Asplundin et al. (2009) asettamat tavoitteet poikkeavat Suomen kansallisessa toimintasuunnitelmassa asetetuista tavoitteista. Asplundin et al. ehdottaman uuden kotimaisen tavoitteen saavuttamiseksi tulisi vuonna 2020 lämpö- ja voimalaitoksissa käyttää haketta 20 TWh eli käytön tulisi nelinkertaistua nykyiseen verrattuna. Lisäksi metsähaketta tulisi käyttää 3,5 TWh raaka-aineena liikenteen biopolttoaineille ja muissa kohteissa korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Loput uusiutuvasta energiasta koostuisi mm. tuuli- ja aurinkovoimasta, biomassalla tuotetusta sähköstä sekä jätteiden hyödyntämisestä. Uusiutuvan energian käytön tavoitteiden saavuttaminen edellyttää panostusta tutkimukseen, tuotekehitykseen, demonstrointilaitoksiin ja tukijärjestelmiin. Asplundin et al. (2009) mukaan huomiota tulee kiinnittää myös energiankulutuksen kasvun hillitsemiseen ja asuntojen lämmitykseen. (Asplund et al. 2009, 53–54)

2.3 Biomassan rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä

Biomassan kyky vähentää hiilidioksidipäästöjä perustuu siihen, että biomassan poltossa vapautunut hiili sitoutuu uudelleen kasvavaan biomassaan. Biomassan palamisessa vapautuu energiayksikköä kohden suurin piirtein yhtä paljon hiilidioksidia kuin fossiilisten polttoaineiden palamisessa. Biomassan palamisessa syntyviä hiilidioksidipäästöjä ei tarvitse kuitenkaan huomioida päästöjen laskennassa, koska hiili sitoutuu uudelleen kasvavaan biomassaan. Palamisessa syntyneet päästöt on jätetty huomioimatta, jotta päästöjen laskenta olisi helpompaa ja siksi, että biomassaa käytettäisiin fossiilisten polttoaineiden sijasta. Biomassan palamisesta syntyvät hiilidioksidipäästöt jätetään huomioimatta raportoitaessa päästöjä ilmastopöytäkirjalle, Kioton pöytäkirjalle ja EU:n päästökaupalle. Biomassan palamisesta syntyvät hiilidioksidipäästöt tulevat kuitenkin välillisesti huomioiduksi maatalous, metsätalous ja muu maan käyttö -sektorissa osana hiilivarantojen muutosta, vaikka niitä ei raportoidakaan osana energiasektoria. (IPCC 2006.) Bioenergian avulla voidaan siis saavuttaa suhteellisia ilmastohyötyjä silloin, kun sen käytöllä korvataan fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä enemmän kuin niitä syntyy biopolttoaineiden tuotannossa. Ilmastohyödyn saaminen edellyttää, että biomassan käyttö on kestävä eli polttamisessa vapautuva hiili sitoutuu takaisin kasvavaan biomassaan riittävän nopeasti. (Soimakallio et al. 2009)

2.3.1 Metsät ilmastonmuutoksen hillinnässä

Metsäbiomassan osuus uusiutuvista raaka-aineista on useissa Euroopan maissa, kuten Suomessa ja Ruotsissa paljon merkittävämpi kuin peltobiomassan osuus (Börjesson 2000). Suomessa metsät muodostavat hiilinielun, jonka suuruus on vaihdellut 20–50 %:iin Suomen vuosittaisista kasvihuonekaasupäästöistä vuosina 1990–2008 (Tilastokeskus 2010b, 14). Metsätalous satoi vuonna 2008 38,3 milj.tCO_{2ekv} ja kuolleeseen orgaaniseen ainekseen sitoutui 9,9 milj.tCO_{2ekv}. Maaperän hiilivarastoista vapautui samaan aikaan 6,1 miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. (Tilastokeskus 2010b, 258)

Suomen maapinta-alasta 86 % (26,3 miljoonaa hehtaaria) on metsätalousmaata. Suomen metsien puusto kasvaa pääasiassa metsä- ja kitumaalla, jonka osuus metsätalousmaasta on noin 87 %. Noin 11 % metsä- ja kitumaasta on suojeltua, jonka vuoksi nämä alueet eivät ole käytettävissä puuntuotantoon. Puuston runkotilavuus viimeisimmän metsäinventoinnin mukaan oli 2206 miljoonaa kuorellista kiintokuutiometriä. Männyn osuus runkotilavuudesta oli 50 % ja kuusen 30 %, loppu koostui koivusta ja muista lehtipuista. Metsä- ja kitumaalla kasvavan elävän puuston kuiva-aineen biomassan määrä oli 1,67 miljardia tonnia vuonna 2007. Oksien, lehtien ja neulasten osuus tästä oli 22 % ja rungon 57 %. Biomassasta 45 % oli mäntyä ja 33 % kuusta. (Metla 2009, 29–30)

Suomen metsillä on suuri merkitys Suomen päästötaseessa. Metsät toimivat niin hiilinieluinä kuin uusiutuvien puuperäisten tuotteiden ja energian tuottajina. Metsäbiomassaa voidaan käyttää monin tavoin ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Metsien hiilinielua voidaan pyrkiä ylläpitämään tai kasvattamaan. Hiilinielua voidaan kasvattaa istuttamalla lisää metsiä, vähentämällä nykyisten metsien hakkaamista ja tehostamalla metsien uudistumista ojittamalla ja lannoittamalla (Pohjola et al. 2006, 4). Hiiltä voidaan sitoa myös käyttämällä puuta esimerkiksi rakennusmateriaaleina, jolloin hiili on poissa luonnon kiertokulusta tuotteiden elinkaaren ajan. Tällöin puutuotteet toimivat hiilen varastoina ja varastojen kasvaessa hiilinieluinä. Samalla puun käyttö vähentää välillisesti päästöjä, kun puuta käytetään energiaintensiivisten materiaalien korvaajana, jolloin voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Hyötyjen saaminen edellyttää kuitenkin, että päätehakkuualalle istutetaan uusi metsä materiaalikäyttöön otetun puun tilalle. (Pingoud 2006, 11.) Kolmas tapa on käyttää puuta ja puusta valmistettuja jalosteita energiana fossiilisten polttoaineiden sijasta.

Näin voidaan saavuttaa suhteellisia ilmastohyötyjä silloin, kun korvataan fossiilisen polttoaineiden käytöstä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä enemmän kuin niitä syntyy puujalosteen tuotannossa.

Metsäbiomassaa polttamalla saadaan lämpöä lämmitykseen sekä höyryn ja sähkön tuotantoon. Kaasuttamalla metsäbiomassasta voidaan valmistaa kaasumaista polttoainetta, jota voidaan käyttää energianlähteenä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä jatkojalostaa liikenteen biopolttoaineiksi. Lisäksi metsäbiomassaa voidaan termisesti muuntaa nestemäiseksi polttoaineeksi, pyrolyysiöljyksi. Pyrolyysiöljyllä voidaan korvata mm. perinteisiä polttoöljyjä lämpökeskuksissa ja sähköntuotantosovelluksissa sekä jatkojalostaa kemikaaleja ja liikenteen polttoaineita. (Bridgwater et al. 1999.) Metsäbiomassasta voidaan valmistaa muitakin jalosteita, kuten pellettejä ja brikettejä. Termisen muunnon lisäksi biomassaa voidaan muuntaa energiakäyttöön myös kemiallisesti; mädättämällä ja fermentoimalla.

Edullisin vaihtoehto kasvihuonekaasupäästöjä vähennettäessä on bioenergian hyödyntäminen yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Bioenergian käyttö kiinteistöjen lämmityksessä on hieman kalliimpaa, mutta kuitenkin edullisempaa kuin käyttö liikenteen polttoaineena. Sähkön ja lämmön sekä liikenteen biopolttoaineiden tuotanto kilpailevat kaikki samasta raaka-aineesta, eivätkä varat ole jakautuneet maittain tasaisesti. Suomen varat ovat Euroopan suurimpia, mutta esimerkiksi Viron ja Tanskan varat ovat hyvin rajalliset. Bioenergiavarojen niukkuuden, lisääntyvän käytön sekä epätasaisesti jakautuneiden varojen takia kilpailu biomassavaroista lisääntyy energia- ja raaka-aine käytön sekä eri energiankäyttömuotojen välillä. (Alakangas 2010)

2.3.2 Metsähakkeen tuotanto, varastointi ja käyttö

Metsähaketta voidaan tuottaa hakkuutähteistä, pienpuusta, kannoista ja runkopuusta. Tyypillisellä eteläsuomalaisella uudistushakkuualalla tähteen määrä neulaset mukaan lukien on mäntymetsässä noin 50 ja kuusimetsässä noin 120 kiinto-m³/ha. (Palosuo & Wihersaari 2000, 11.) Vuonna 2009 metsähakkeen kokonaiskäyttö oli 6,1 milj.m³ eli runsaat 12 TWh. Tästä määrästä lämpö- ja voimalaitoksissa käytettiin 5,4 milj.m³ ja pientalokiinteistöissä 0,7 milj.m³. Lämpö- ja voimalaitoksissa käytetystä hakkeesta 36 % oli peräisin hakkuutähteistä, 29 % pienpuusta (koko- ja rankapuu), 15 % kannoista ja 20 % järeästä, lahovikaisesta runkopuusta. (Kärhä 2010.) Hakkeen tuotantoon on olemassa useita tuotantomenetelmiä,

jotka voidaan luokitella esimerkiksi haketuspaikan perusteella. Tuotantoketjut koostuvat metsäkuljetuksesta, haketuksesta ja kaukokuljetuksesta. Tuotantoketjusta riippuen työvaiheet voivat olla yhdistettyinä toisiinsa tai tapahtua eri järjestyksessä. Yleisimmät tuotantoketjut ovat palsta-, tienvarsi-, terminaali- ja käyttöpaikkahaketus. Palstahaketuksessa tähde haketetaan palstalla ja kuljetetaan tievarteen jatkokuljetusta varten. Tienvarsihaketuksessa hakkuutähteet kuljetetaan tienvarteen varastokasoihin, joissa niitä voidaan varastoida tarpeen mukaan. Tässä tuotantoketjussa haketus tapahtuu suoraan haketta kuljettavaan autoon. Terminaalihaketusketjussa hakkuutähteet kerätään palstalta ja kuljetetaan samalla työkoneella terminaalille, joka sijaitsee muutaman kilometrin päässä palstalta. Haketusvaihe toteutetaan terminaalilla. Käyttöpaikkahaketusketju voidaan toteuttaa irtotähteenä tai paalattuna eli ns. risutukkimenetelmänä. Kummassakin menetelmässä hakkuutähteet kuljetetaan tienvarteen varastokasoihin, joista tähteet kuljetetaan käyttöpaikalle hakettavaksi. Risutukkimenetelmässä tähtien kuljetus tapahtuu paaleina, joihin tähteet on sidottu ja puristettu tukkia muistuttavaan muotoon. Risutukkimenetelmän etuna on kuljetuksen helppous, koska paalien kuljetus voi tapahtua tukkien kanssa samassa kuormassa. (Wihersaari & Palosuo 2000, 15–16.) Vuonna 2009 hakkuutähdehakkeesta yli 60 % tuotettiin tienvarsihaketusketjulla. Vajaa kolmannes tuotettiin käyttöpaikkahaketusketjulla ja noin kymmenes hakettiin terminaaleissa. Se millä tuotantoketjulla hake tuotetaan, riippuu mm. korjuu-oloista, tienvarren varastotiloista ja kuljetusmatkoista. (Kärhä 2010)

Haketta voidaan joutua varastoimaan esimerkiksi ennen kuljetusta käyttöpaikalle tai käyttöpaikalla ennen hakkeen hyödyntämistä. Tutkimuksissa on huomattu hakkeen varastointiin liittyvän materiaalihäviöitä, hakkeen kostumista ja kuiva-ainehäviöitä. Kuiva-ainehäviöt syntyvät hakkeen biologisen hajoamisen seurauksena, kun hake kompostoituu lämpimässä ja kosteassa varastossa. Fagnäs et al. (2004) tutkivat varastoinnin ja kuivaamisen vaikutusta raaka-aineen laatuun. Tutkimuksessa oli mukana vihreä ja ruskea hakkuutähdehake sekä tuore sahanpuru. Varastoinnin aikana tapahtui muutoksia orgaanisten aineiden pitoisuuksissa. Seitsemän kuukauden aikana uuteainepitoisuus pieneni tutkituilla raaka-aineilla 60–70 % ja viherhakkeella 10 kuukauden aikana 90 %. (Fagnäs et al. 2004, 165.) Pitkäaikaisvarastoinnissa materiaalihäviöiden pitämiseksi kohtuullisena tulisi hakkeen kosteuden olla alle 20 %, mikä ei käytännössä ole mahdollista ilman keinokuivausta. Varastoinnin aikana syntyviä päästöjä ei kuitenkaan tunneta tarkasti. Päästökertoimien määrittäminen varastoinnin aikana vapautuville kasvihuonekaasupäästöille on hankalaa,

koska varastointiolosuhteet ja päästöihin vaikuttavat parametrit vaihtelevat suuresti. On kuitenkin todennäköistä, että hakkeiden varastoinnista aiheutuu kasvihuonekaasupäästöjä. Metaanipäästöjen osuus kasvihuonekaasupäästöistä vaikuttaisi olevan typpioksiduulipäästöjä suurempi. (Wihersaari 2005a)

2.4 Pyrolyysiöljy

Pyrolyysiöljy on tumman ruskeaa nestettä, joka syntyy raaka-aineen hapettomissa oloissa tapahtuvan kuumennuksen seurauksena (Bridgwater et al. 1999). Lähes 100 eri raaka-ainetta on testattu pyrolyysiöljyn raaka-aineena (Yaman et al. 2004). Tyypillisesti raaka-aineena käytetään metsätähteitä, sahanpurua, kuoria sekä maatalousjätteitä kuten sokerijuurikkaan puristusjätettä. Pyrolyysiöljyä voidaan valmistaa myös hiilestä ja turpeesta. (Bradley 2006, 6.) Oasmaa et al. (2010) mukaan Skandinaviassa toteuttamiskelpoisin vaihtoehto pyrolyysiöljyn raaka-aineeksi ovat metsätähteet.

Kirjallisuudessa pyrolyysiöljylle käytetään mm. seuraavia synonyymeja: bioöljy, pyrolyysineste, biopolttoöljy, bioraakaöljy ja bioneste (Oasmaa et al. 2010). Biomassasta valmistettua pyrolyysiöljyä pidetään halvimpana biomassasta valmistettavana polttonesteenä (Helynen et al. 2002, 79). Tämä johtuu mm. siitä, että pyrolyysiöljyn valmistusprosessi ei ole kovin energiantensiivinen, jos verrataan esimerkiksi bioetanolin valmistukseen. (Hongisto et al. 2001, 41)

Kiinnostus biomassan nopeaa pyrolyysiä kohtaan on lisääntynyt Euroopassa, koska sen on havaittu tarjoavan logistisia ja taloudellisia etuja muihin termisiin muuntoprosesseihin nähden. Nestemäistä tuotetta voidaan varastoida ja kuljettaa sinne missä sen hyödyntäminen on tehokkainta. (Bridgwater et al. 1999.) Logistiset edut perustuvat siihen, että pyrolyysiöljyn energiatiheys on moninkertainen verrattuna hakkeeseen (Oasmaa et al. 2005). Tällä hetkellä pyrolyysiprosessi on kuitenkin vielä kaupallistumisvaiheessa ja pyrolyysiöljyn käyttö on rajoittunut lähinnä sähkön- ja lämmöntuotantoon. Esimerkiksi Kanadassa on jo muutamia toimivia laitoksia, mutta Suomessa on vasta rakennettu ensimmäinen suuren kokoluokan koelaitos. (Bradley 2006, 76)

Pyrolyysiöljyn käyttömahdollisuudet ovat moninaiset, koska se voi korvata niin erilaisia polttoaineita eri käyttökohteissa. Pyrolyysiöljylle ei kuitenkaan vielä ole kehittynyt selviä markkinoita, koska tuotetta ei tunneta laajasti ja saatavuus on huono. Kaupallistumiseen vaikuttavia kriittisiä tekijöitä ovat mm. pyrolyysiöljyn logistiikan järjestäminen niin raaka-aineen kuin lopputuotteenkin osalta, vallitseva taloustilanne, bionesteiden verotus ja valtion kannusteet sekä saatavuuden varmistaminen (Bradley 2006, 35–36). Euroopassa suurin este pyrolyysiöljyn kaupallistumiselle on halvan raaka-aineen huono saatavuus ja polttoöljyjen suhteellisen matalat kuluttajahinnat verrattuna liikenteen polttoaineiden hintoihin, jolloin pyrolyysiöljyn tuottaminen ei ole vielä taloudellisesti kannattavaa. Oasmaan (2010) mukaan kaupallistaminen olisi helpointa aloittaa käyttämällä pyrolyysiöljyä polttoöljyjen sijasta lämmöntuotantoon.

2.4.1 Pyrolyysiöljyn valmistus

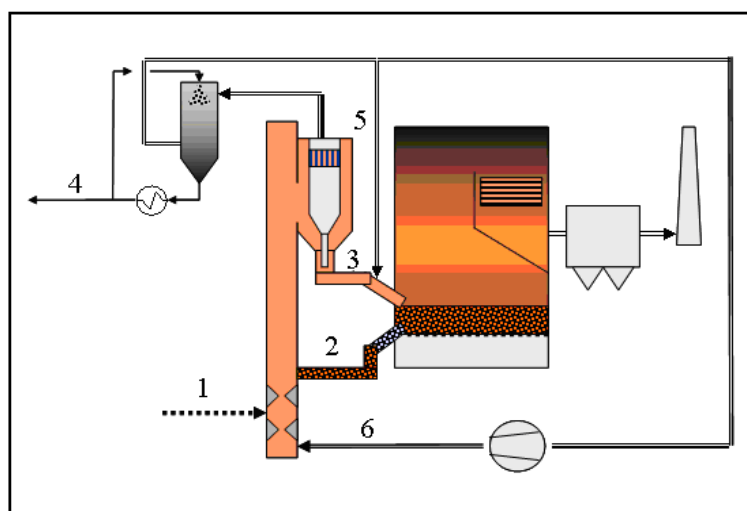
Pyrolyysi on termo-kemiallinen prosessi, jossa raaka-aine muunnetaan korkeassa lämpötilassa ja hapettomissa oloissa kaasumaiseksi, nestemäiseksi ja kiinteäksi jakeeksi eli hiiltojäännökseksi. Pyrolyysiprosesseja on nopeita ja hitaita. Nopealla pyrolyysillä tuotetaan pyrolyysiöljyä, hitaalla tervaa ja hiiltojäännöstä (Bridgwater et al. 1999). Nopea ja hidas pyrolyysi eroavat toisistaan myös lämpötilan, viipymääjan ja raaka-aineen kuumentumisnopeuden suhteen ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$). Nämä olosuhteet vaikuttavat tuotteiden kemiallisiin koostumuksiin, tuotantomääriin ja tuotteiden laatuun. (Onay & Kockar 2003.) Pyrolyysiöljyn saanto riippuu myös raaka-aineesta. Puupohjaisilla raaka-aineilla saanto on noin 65–77 % ja maatalouden jätevirroilla 60–65 % (Bradley 2006, 6).

Pyrolyysissä pienet raaka-ainepartikkelit kuumennetaan nopeasti korkeaan lämpötilaan hapettomassa tilassa, jolloin raaka-ainepartikkelit kaasuuntuvat. Tämän jälkeen suurimmat hiiltojäännöspartikkelit ja hiekka erotetaan sykloneilla kuumasta kaasu-höyry-virrasta ennen pesureita, joissa nesteytyminen pyrolyysiöljyksi tapahtuu. Prosessissa syntyy tyypillisesti 65–72 % pyrolyysiöljyä, 15–20 % hiiltojäännöstä ja 12–18 % lauhtumattomia kaasuja. Pyrolyysiprosessin sivutuotteena ei synny jätettä, sillä sekä hiiltojäännös että sivutuotekaasu ovat arvokkaita tuotteita, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi pyrolyysiprosessin vaatiman lämmön tuotannossa. Bradleyn (2006) mukaan sivutuotekaasun kierrätyksellä on mahdollista kattaa jopa 75 % pyrolyysireaktion tarvitsemasta lämmöstä. (Bradley 2006, 6.)

Pyrolyysiöljyn valmistus voidaan yhdistää sähkön- ja lämmöntuotantoon integroimalla pyrolysaattori kattilaan. Tällöin pyrolyysiprosessin tarvitsema lämpö saadaan kattilasta.

2.4.2 Kattilaan integroitu pyrolysaattori

VTT:llä on kehitetty integroitu prosessi pyrolyysiöljyn tuotantoon (ITP). Leijupetiin integroidussa pyrolyysilaitteistossa sivutuotekaasu ja jäännöshiili käytetään prosessienergiana. Hyvän saannon ja laadukkaan tuotteen sekä prosessin nopean toimivuuden varmistamiseksi syötemateriaali kuivataan alle 10 %:n kosteuteen ja jauhetaan noin 2 mm palakokoon. (Bridgwater et al. 1999.) Kuvassa 2 on havainnollistettu leijukerroskattilaan integroitua pyrolyysilaitteistoa, joka perustuu nopeaan pyrolyysiin.



Kuva 2. Leijukerroskattilaan integroitu pyrolysaattori (muokattu lähteestä Solantausta 2010). 1. Raaka-aine, 2. Leijutushiekka, 3. Hiiltojännös, 4. Pyrolyysiöljy, 5. Sivutuotekaasu, 6. Kierrätetty sivutuotekaasu.

Ensimmäisessä vaiheessa pyrolyysiöljyn raaka-aine kuivataan alle 10 %:n kosteuteen, jonka jälkeen raaka-aine syötetään pyrolysaattoriin (1). Nopean pyrolyysin tarvitsema lämpö otetaan leijukerroskattilasta leijutushiekan välityksellä (2). Kaasuuntunut raaka-aine kulkee pesuriin, jossa siitä erottuu pyrolyysiöljy (4) ja sivutuotekaasu (5). Osa sivutuotekaasusta (6) kierrätetään takaisin pyrolysaattoriin ja osa poltetaan kattilassa. Kaasuuntumaton raaka-aine eli hiiltojännös (3) siirretään kattilaan poltettavaksi.

Integraation etuja ovat korkea kokonaishyötysuhde verrattuna pelkkään pyrolyysiin ja alhaisemmat investointikustannukset, koska ei tarvita erillistä kattilaa hiiltojäännöksen polttamiseen. Samalla voidaan hyödyntää laitosten yhteistä polttoaineen käsittelyä ja hankintaa. Tämän lisäksi käyttökustannukset alentuvat, koska yhdistetyllä laitoksella tarvitaan vähemmän henkilökuntaa. Suomeen on rakennettu maailman ensimmäisen ITP-konseptiin perustuvan koelaitteisto, jonka pyrolyysiöljyn tuotantokapasiteetti on noin 300 kg/h. (Oasmaa et al. 2010)

Pyrolysaattoriin yhdistettäviä leijukerroskattiloita on kahta päätyyppiä – kuplapeti (BFB) ja kiertopeti (CFB). Suomessa kuplapetikattilat ovat suosittuja biomassan ja turpeen poltossa pienessä kokoluokassa sekä teollisuudessa, jossa hyvä käytettävyys on tärkeää. Kiertopetikattilat ovat yleisempiä suurissa laitoksissa, joissa poltetaan hiiltä. Tyypillisesti leijupetikattiloiden polttoaineteho on alle 200 MW ja ne tuottavat sähköä ja lämpöä teollisuudelle tai kaukolämpöverkkoon. Kiertopetikattilat sietävät hyvin polttoaineen laatuvaihteluita eivätkä ne aseta tarvetta polttoaineen kuivaukselle tai jauhatukselle. (EU 2006, 289–290.) Muita leijupetikattiloiden etuja on monipuolinen polttoainevalikoima, halpa rikinpoisto sekä vähäiset typenoksidien ja palamattomien päästöt (Hyppänen & Raiko 1995, 417–418).

BFB-kattilat soveltuvat ennen kaikkea epähomogeenisten biopolttoaineiden, esimerkiksi puun polttoon. Leijutusmateriaalina käytetään tyypillisesti hiekkaa, tuhkaa, dolomiittia yms. Partikkelien kokojakauma on kuplapetikattiloissa tyypillisesti 0,5–1,5 mm ja leijutusnopeus on noin 1 m/s. CFB-kattila eroaa BFB-kattilasta kahdella tapaa. Petimateriaalin kokojakauma on pienempi (0,1–0,6 mm) ja leijutusnopeus suurempi (4–6 m/s). Nämä erot vaikuttavat leijutusolosuhteisiin siten, että osa leijutusmateriaalista kulkeutuu pois pedistä. Nämä savukaasun mukana kulkeutuneet partikkelit erotetaan savukaasusta syklonilla ja palautetaan takaisin petiin. (EU 2006, 289–290.) Itse pyrolysaattori on yleensä kupla- tai kiertopetireaktori, koska ne ovat helposti käytettäviä ja niitä löytyy valmiiksi useissa kokoluokissa. (Bridgwater et al. 1999.) Muita reaktorityyppejä ovat esimerkiksi ablatiivinen reaktori ja tyhjiöreaktori (Mohan et al. 2006).

2.4.3 Pyrolyysiöljyn ominaisuudet

Pyrolyysiöljyn ominaisuudet vaihtelevat syötemateriaalin ja sen ominaisuuksien sekä prosessiparametrien mukaan (Bridgwater et al. 1999). Taulukossa 1 on vertailtu metsätähteestä valmistetun pyrolyysiöljyn ja Neste Oil Oyj:n jalostaman raskaan polttoöljyn (Mastera LS180) tyypillisiä ominaisuuksia. Pyrolyysiöljyssä on raskasta polttoöljyä suurempi pitoisuus vettä ja tuhkaa. Tämän lisäksi pyrolyysiöljyn tiheys on raskasta polttoöljyä suurempi, lämpöarvo ja pH matalammat. Pyrolyysiöljyn suurimpia haasteita ovat alhainen lämpöarvo, korkea vesi- ja kiintoainepitoisuus sekä happamuus fossiilisiin polttoöljyihin nähden.

Taulukko 1. Pyrolyysiöljyn ja raskaan polttoöljyn ominaisuuksia (Oasmaa 2003, 18; Bridgwater et al. 1999 & Neste Oil Oyj 2006,13).

Ominaisuus	Pyrolyysiöljy	Raskaspolttoöljy
Vesipitoisuus [m-%]	24–32	0,15
Hiilipitoisuus [m-%]	44–47	88
Vetyttöisyys [m-%]	6–7	10
Happipitoisuus [m-%]	46–48	0,2
Tuhkapitoisuus [m-%]	0,06–0,2	0,02
Typipitoisuus [m-%]	0–0,4	0,4
Rikkipitoisuus [m-%]	-	0,95
Viskositeetti [cST]	10–30 (40 °C)	170 (50 °C)
Tiheys (15 °C) [kg/m ³]	1200–1220	1000
pH	2,9–3,3	-
Alempi lämpöarvo [MJ/kg]	14–16	40,4

Pyrolyysiöljyä voidaan kuljettaa, pumpata ja varastoida kuten fossiilisia öljyjä. Pyrolyysiöljyn happamuuden (PH 2,9–3,3) takia joudutaan säiliöt ja putkistot kuitenkin rakentamaan korroosiota kestävästä materiaaleista. (Bradley 2006, 6–7.) Olemassa olevissa kattiloissa pyrolyysiöljyn polttaminen onnistuu pienin muutoksin. Pyrolyysiöljy vaatii apupolttoaineen, koska se ei ole kovin helposti syttyvää suuren haihtumattomien komponenttien määrän vuoksi. (Czernik & Bridgwater 2004.) Pienemmän lämpöarvon takia pyrolyysiöljyä tarvitaan huomattavasti enemmän saman lämpömäärän tuottamiseen kuin fossiilista polttoöljyä.

Pyrolyysiöljy ei sisällä rikkiä, joten sen poltossa ei synny rikkidioksidipäästöjä kuten fossiilisilla polttoaineilla. Nestemäisten polttoaineiden palamista on helpompi hallita, jonka vuoksi pyrolyysiöljyn poltossa syntyy kiinteisiin polttoaineisiin nähden vähemmän päästöjä. Pyrolyysiöljylle tehdyissä palamiskokeissa on myös huomattu, että pyrolyysiöljyn päästöt ovat raskaan polttoöljyn päästöjä pienemmät muiden kuin hiukkaspäästöjen osalta. (Czernik & Bridgwater 2004)

2.4.4 Pyrolyysiöljyn ja sivutuotteiden käyttökohteet

Pyrolyysiöljyllä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita useissa sovelluksissa. Pyrolyysiöljyä voidaan käyttää energiantuotannossa korvaamaan lämmitysöljyä ja maakaasua, jolloin voidaan vapauttaa keskitisleitä liikenteen käyttöön. (Oasmaa et al. 2005.) Pyrolyysiöljyä voidaan käyttää suurissa dieselkoneissa ja emulgaattorin avulla pyrolyysiöljyä on mahdollista sekoittaa dieseliin, jolloin sitä voidaan käyttää myös liikenteen dieselmootoreissa vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. Pyrolyysiöljyn käyttö mikroturbiineissa ja muussa hajautetussa energiantuotannossa on myös eräs potentiaalinen sovelluskohde. (Bradley 2006, 44.) Tämän lisäksi pyrolyysiöljystä on mahdollista valmistaa kemikaaleja, kuten maku- ja tuoksuaineita elintarviketeollisuuteen ja polyfenoleita kemianteollisuuden hartsin valmistukseen (Bridgwater et al. 1999). Suomessa kiinnostava käyttökohde on raskaan polttoöljyn, tulevaisuudessa mahdollisesti myös kevyen polttoöljyn korvaaminen lämmöntuotannossa.

Sivutuotteena syntyvällä hiiltojäännöksellä voidaan korvata fossiilista hiiltä. Tämän lisäksi hiiltojäännöstä käytetään usein tuottamaan osa pyrolyysireaktion tarvitsemasta lämmöstä polttamalla hiiltojäännös kattilassa esimerkiksi turpeen, hiilen tai hakkeen sijasta. Lisäksi hiiltojäännöksestä on mahdollista puristaa brikettejä ja jatkojalostaa esimerkiksi puhdistusprosesseissa tarvittavaa aktiivihientä. (Onay & Kockar 2003; Bradley 2006, 29.) Saksassa on myös kehitetty konsepti, jossa pyrolyysiöljyn ja hiiltojäännöksen sekoituessa syntyy lietettä käytetään Fischer-Tropsch-laitoksessa liikenteen biopolttoaineen tuotannon raaka-aineena. (Oasmaa et al. 2010). Synteesikaasusta voidaan valmistaa synteettistä dieseliä, metanolia ja kemikaaleja. Jatkojalostuksella on kuitenkin korkea energiantarve ja kustannukset. Pyrolyysiöljy-hiiltojäännös -lietettä voidaan polttaa myös sellaisenaan energiaksi. (Onay & Kockar 2003; Bradley 2006; Czernik & Bridgwater 2004)

Sivutuotteena syntyvillä lauhtumattomilla kaasuilla voidaan tuottaa osa pyrolyysiprosessin tarvitsemasta lämmöstä. Osa kaasuista on mahdollista kierrättää takaisin prosessiin leijutuskasuksi. Kaasu voidaan myös ottaa talteen ja kuljettaa muualle jatkojalostettavaksi tai käytettäväksi sellaisenaan. Hiiltojäännöksestä ja hiekasta päätyy kaasun sekaan kiinteitä partikkeleja, jonka vuoksi kaasu täytyy puhdistaa, jos sitä ei polteta välittömästi. Prosessista poistuvaa tuhkaa voidaan myös hyödyntää eri yhteyksissä. Hyödyntämismahdollisuudet riippuvat kuitenkin tuhkan ominaisuuksista, koska esimerkiksi hyötykäytettävän tuhkan raskasmetallipitoisuuksille on määrätty raja-arvot (Evira 2009). Tuhka voi soveltua käytettäväksi esimerkiksi metsä- tai peltolannoitteena. Tuhkaa voidaan myös käyttää viherrakentamisessa ja maarakentamisessa esimerkiksi tie- ja katurakenteissa sekä meluvalleissa. Usein tuhka päätyy kuitenkin loppusijoitukseen kaatopaikalle. (Korpijärvi et al. 2009, 22)

2.5 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi (LCA) on menetelmä tuotteen elinkaareen liittyvien ympäristövaikutusten arviointiin. Tuotteen elinkaari sisältää kaikki vaiheet raaka-aineen hankinnasta tuotannon, käytön ja käytöstä poiston kautta jätteiden loppusijoitukseen, uudelleen käyttöön tai kierrätykseen. (SFS-EN ISO 14040:2006, 8.) Elinkaariarviointi sisältää neljä vaihetta, jotka ovat

- tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaihe
- inventaarioanalyysivaihe (LCI)
- vaikutusarviointivaihe (LCIA)
- tulkintavaihe

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaiheessa asetetaan elinkaariarvioinnin suorittamiselle tavoitteet ja tarkoitus sekä määritellään soveltamisala. Soveltamisalan määrittelyyn sisältyy mm. tutkittavan järjestelmän valinta, järjestelmän rajaus, toiminnallisen yksikön ja kohdentamisperiaatteen sekä vaikutusluokkien valinta. Inventaarioanalyysi- eli LCI-vaiheessa suoritetaan järjestelmän syöte- ja tuotostietojen inventaario, jolloin kerätään elinkaariarvioinnin suorittamisessa tarvittavat tiedot. Vaikutusarviointivaiheessa tuotetaan lisätietoa tuotejärjestelmän inventaarioanalyysin tulosten arvioinnin avuksi. Tulosten tulkinta on menettelyn viimeinen vaihe, jolloin inventaarioanalyysin, vaikutusarvioinnin tai

molempien tulokset yhdistetään ja niistä tehdään tarvittavia johtopäätöksiä. Jos elinkaariarvioinnin tavoitteet voidaan saavuttaa suorittamalla pelkästään inventaarioanalyysi ja tulkintavaihe, kutsutaan menetelmää yleensä elinkaari-inventaarioselvitykseksi (LCI-selvitys). LCI-selvitykset eroavat elinkaariarviointiselvityksistä siten, että niistä puuttuu vaikutusarviointivaihe. Elinkaari-inventaarioselvitys ei kuitenkaan ole sama asia kuin elinkaariarviointiselvityksen inventaarioanalyysivaihe. (SFS-EN ISO 14040:2006, 8.) Raportointistrategia on myös olennainen osa elinkaariarviointia. Tehokkaan raportin tulisi käsitellä tarkasteltavan selvityksen eri vaiheita. Raportissa esitetään elinkaariarvioinnin tulokset ja johtopäätökset kohdeyleisölle soveltuvassa muodossa sekä käsitellään selvityksessä käytettyjä tietoja, menetelmiä ja oletuksia sekä niihin liittyviä rajoituksia. (SFS-EN ISO 14040:2006, 38)

Elinkaariarviointien suorittaminen ei ole yksiselitteistä, koska haastetta aiheutuu monista tekijöistä kuten järjestelmärajoituksen ja vertailuketjun määrittelemisestä, sivutuotteille suoritettavasta päästöjen kohdentamisesta ja parametreihin liittyvien epävarmuuksien huomioimisesta. Edellä mainittujen lisäksi kriittinen vaihe on tulosten tulkinta, johon tulee kiinnittää erityistä huomiota, jotta välttyttäisiin vääriä johtopäätöksiltä. Biopolttoaineiden elinkaariarviointiin aiheutuu vielä lisähaastetta biomassan käyttöön ja ilmastonmuutoksen hillintään liittyvästä dynamiikasta sekä maankäytön moninaisista ja epävarmoista vaikutuksista. Lisähaasteen ratkaisemiseksi ei ole vielä onnistuttu kehittämään yhtä tieteellisesti perusteltua menetelmää. (Soimakallio et al. 2009; Cherubini et al. 2009)

2.5.1 Haitanjaollinen ja seurausvaikutuksellinen elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi voidaan suorittaa käyttäen eri lähestymistapoja. Antikainen (2010) jaottelee raportissaan elinkaariarvioinnissa käytetyt lähestymistavat kahteen päätyyppiin, haitanjaolliseen ja seurausvaikutukselliseen lähestymistapaan. Seurausvaikutuksellinen tarkastelu pyrkii kuvaamaan tietyn päätöksen seurauksia. Haitanjaollinen elinkaariarviointi keskittyy kuvaamaan niitä ympäristövaikutuksia, jotka johtuvat suoraan tutkittavaan elinkaareen liittyvistä virroista. Haitanjaollinen lähestymistapa kuvaa siis staattista tilaa. (Antikainen 2010, 32–33)

Suurin osa elinkaariarvioinneista on tehty haitanjaollista lähestymistapaa käyttäen. Haitanjaolisessa menetelmässä panokset ja tuotokset kohdennetaan eri tuotteille. Menetelmän kriittisiä kohtia ovat juuri kohdentamisperiaatteen valinta ja tarkastelurajausten asettaminen. Haitanjaollinen elinkaariarviointi huomioi yleensä vain ne virrat, jotka liittyvät suoraan tutkittavan tuotteen elinkaareen. Seurausvaikutuksellisella lähestymistavalla kuvataan kuinka tietyt ympäristölliset virrat muuttuvat tarkasteltavan päätöksen seurauksena. Tarkastelussa huomioidaan ne yksikköprosessit, joiden odotetaan muuttuvan tietyn päätöksen seurauksena tai tuotteen kysynnän muuttuessa. Seurausvaikutuksellinen elinkaariarviointi huomioi siis kysynnän ja tarjonnan välisen tasapainon ja analyysissä käytetään yleensä marginaalista tietoa. Marginaalisella tiedolla tarkoitetaan niin sanottua rajatuotantoa eli sitä tuotantoa johon muutos ensimmäisenä kohdistuu. Panoksien ja tuotoksien kohdentamista pyritään välttämään järjestelmän laajentamisella. Seurausvaikutusten arviointi ja huomioon ottaminen elinkaariarvioinnissa voi olla erittäin haastavaa, koska seurausvaikutukset voivat olla hyvin monimutkaisia ja ketjuuntuneita. Seurausvaikutuksellisessa elinkaariarvioinnissa ongelmaksi muodostuu usein juuri tiedon puute, jonka vuoksi joudutaan tekemään paljon oletuksia. (Finnveden et al. 2009; Antikainen 2010, 32–33)

Molemmat lähestymistavat voidaan sijoittaa historiaan, nykyhetkeen tai tulevaisuuteen. Näiden kahden lähestymistavan väliset erot näkyvät ennen kaikkea menetelmävalinnoissa, kuten valinnassa marginaalisen ja keskimääräisen tiedon välillä. (Antikainen 2010, 32–33.) Seurausvaikutuksellisessa menetelmässä käytetään marginaalista tietoa silloin, kun seurausvaikutusten tarkasteleminen on merkityksellistä. Marginaalisten vaikutusten epävarmuus kasvaa ajan myötä. Jos vaikutuksia tarkastellaan liian pitkälle tulevaisuuteen, voi epävarmuus olla suurempi kuin itse vaikutus. (Finnveden et al. 2009)

Lundie et al. (2007) mukaan seurausvaikutuksellista elinkaariarviointia tulisi käyttää silloin, kun elinkaariarviointiin liittyy päätöksentekoa. Jos ero haitanjaollisen ja seurausvaikutuksellisen menetelmän välillä on pieni tai seurausvaikutukselliseen menetelmään liittyvät epävarmuudet ovat suuremmat kuin sen käytöstä saatavat hyödyt, olisi käytettävä sitenkin haitanjaollista menetelmää. Toisaalta Ekvall et al. (2005) väittää, että molemmat menetelmät sopivat yhtä hyvin päätöksenteon tueksi.

3 MENETELMÄ JA PARAMETRIEN VALINTA

Kasvihuonekaasupäästöjen laskenta suoritetaan RES-direktiivin liitteessä V esitetyn biopolttoaineiden, bionesteiden ja niiden fossiilisten vertailukohtien kasvihuonekaasuvaikutuksen laskemista koskevan ohjeen mukaisesti. RES-direktiivin laskentamenetelmä (2009/28/EY, liite V) on sovellus elinkaariarvioinnista. Laskentamenetelmä noudattaa pääsääntöisesti haitanjaollista elinkaariarviointia. Bionesteen tuotannosta ja käytöstä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt lasketaan yhtälöllä 1 (2009/28/EY, liite V, C1).

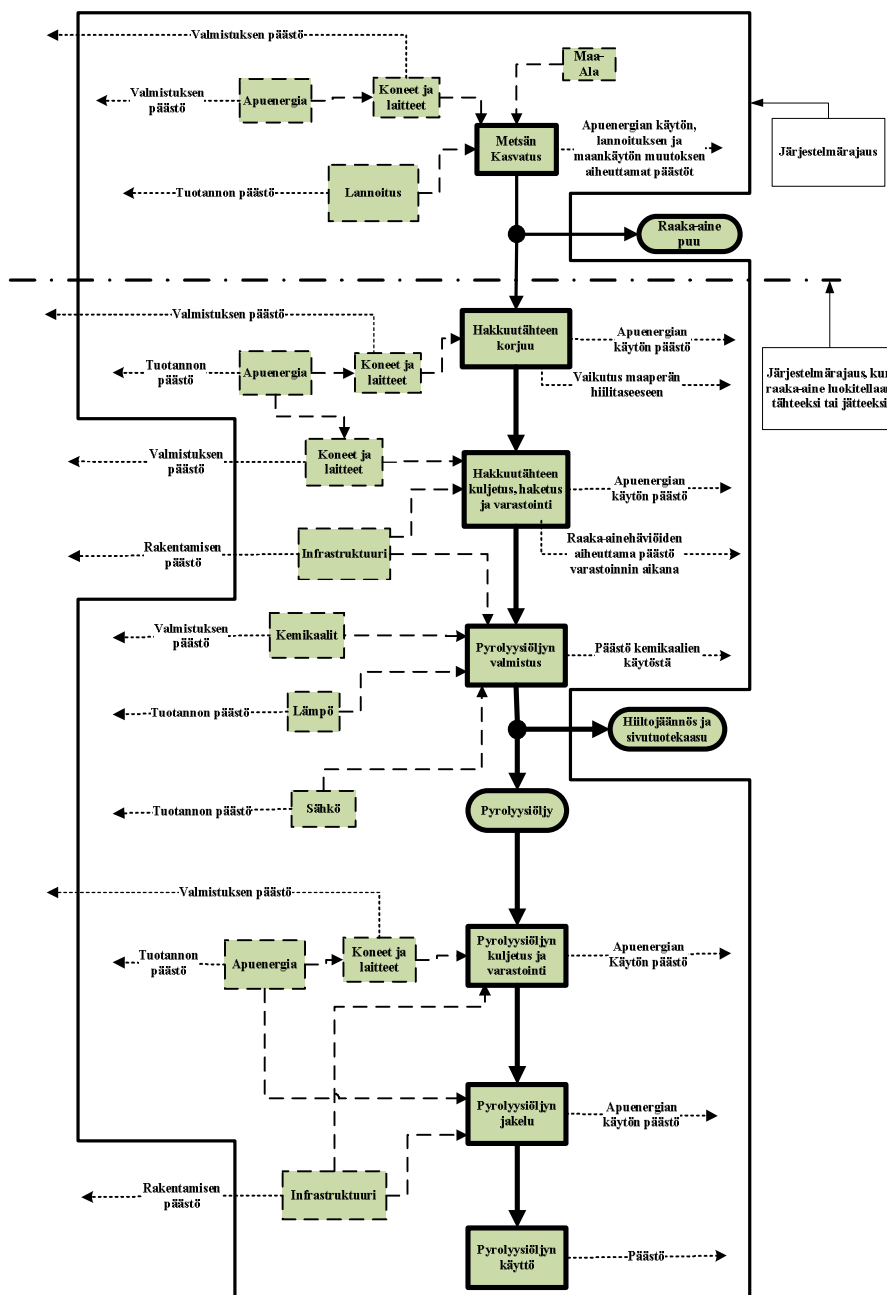
$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee}, \quad (1)$$

missä E = polttoaineen käytöstä aiheutuvat kokonaispäästöt
 e_{ec} = raaka-aineiden tuotannosta tai viljelystä aiheutuvat päästöt
 e_l = maankäytön muutoksista johtuvista hiilivarantojen muutoksista aiheutuvat annualisoidut päästöt
 e_p = jalostuksesta aiheutuvat päästöt
 e_{td} = kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuvat päästöt
 e_u = käytössä olevasta polttoaineesta aiheutuvat päästöt
 e_{sca} = paremmista maatalouskäytännöistä johtuvasta maaperän hiilikertymästä saatavat vähennykset päästöissä
 e_{ccs} = hiilidioksidin talteenotosta ja geologisesta varastoinnista saatavat vähennykset päästöissä
 e_{ccr} = hiilidioksidin talteenotosta ja korvaamisesta saatavat vähennykset päästöissä
 e_{ee} = sähkön ja lämmön yhteistuotannosta saatavasta ylimääräisestä sähköstä saatavat vähennykset päästöissä

3.1 Järjestelmärajaus

Järjestelmärajaus määrittelee mallinnettavaan järjestelmään sisältyvät yksikköprosessit, joiden päästöt huomioidaan elinkaaren päästöjä laskettaessa (SFS-EN ISO 14040:2006, 32). Järjestelmärajauksen muodostamiskriteerinä tässä työssä käytetään RES-direktiivin laskentamenetelmää. Yhtälön 1 mukaisesti järjestelmärajauksessa otetaan huomioon raaka-aineiden tuotannosta tai viljelystä, maankäytön muutoksista johtuvista hiilivarantojen muutoksista, jalostuksesta, kuljetuksista ja jakelusta sekä käytössä olevasta polttoaineesta aiheutuvat päästöt. Koneiden ja laitteiden valmistuksesta aiheutuvia päästöjä ei huomioida (2009/28/EY, liite V,C1).

RES-direktiivin laskentaohjeen tulkinta ei kuitenkaan ole yksiselitteistä. Direktiivin mukaan jätteiden, viljelykasvien tähteiden sekä muiden jalostustähteiden ei katsota aiheuttavan elinkaarenaikaisia kasvihuonekaasupäästöjä ennen kyseisten materiaalien keräämistä (2009/28/EY, liite V, C18). Direktiivi ei kuitenkaan määrittele tarkemmin mitkä raaka-aineet lasketaan tähteiksi tai jätteiksi. Tähteen ja jätteen määritelmää ovat pohtineet mm. Soimakallio et al. (2010). He eivät kuitenkaan päätyneet RES-direktiiviä tarkempaan luokitteluun. Koska tähteen ja jätteen määritelmää ei tunneta tarkasti, on järjestelmärajaus päätetty jakaa kahtia. Järjestelmärajaukset eroavat toisistaan sen osalta, ajatellaanko hakkuutähde direktiivin mukaiseksi tähteeksi tai jätteeksi vai ei. Ylemmässä järjestelmärajauksessa huomioidaan ennen hakkuutähteen keräämistä syntyneet kasvihuonekaasupäästöt ja alemmassa järjestelmärajauksessa hakkuutähteiden ajatellaan olevan direktiivin mukaista jätettä tai tähdettä, jolloin edellä mainittuja päästöjä ei huomioida. Direktiivin pohjalta ei voida päätellä, kumpaa järjestelmärajauksista tulisi käyttää. Kuvassa 3 on esitetty järjestelmärajaus molemmille edellä kuvatuille tilanteille.

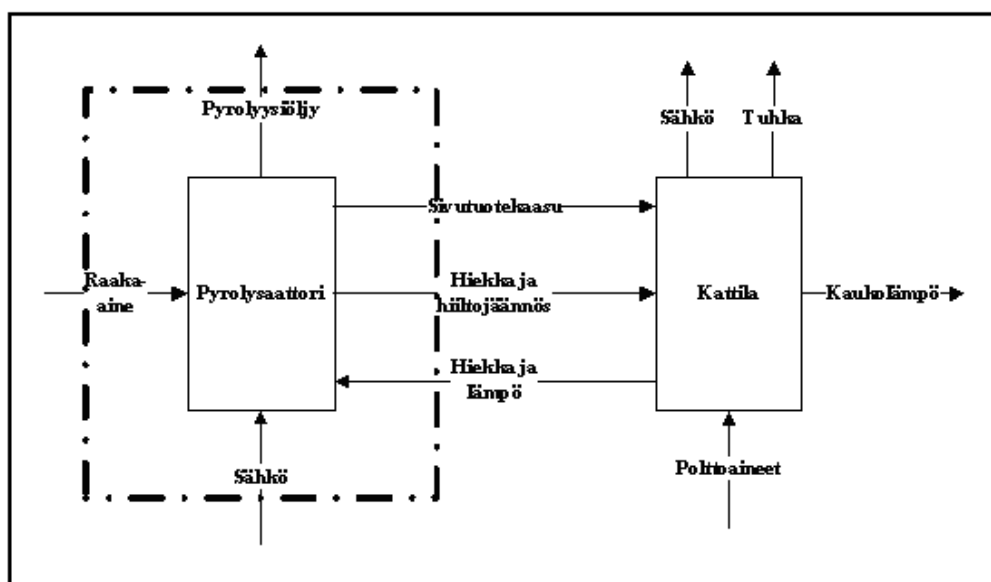


Kuva 3. RES-direktiivin mukainen järjestelmärajaus. Järjestelmärajauksessa musta pallo kuvaa sivutuotteille suoritettavaa päästöjen kohdentamista.

Järjestelmärajauksen ulkopuolelle jäävät koneiden ja laitteiden rakentamisesta aiheutuvat päästöt, koska RES-direktiivi ohjeistaa näin tekemään (2009/28/EY, liite V, C1). Jos hakkuutähdettä ei ajatella RES-direktiivin mukaiseksi tärteeksi tai jätteeksi, tulee huomioida hakkuutähteille kohdentuva osuus metsän kasvatuksen päästöistä. Molemmissa tapauksissa tulee huomioida raaka-aineen korjuusta sekä pyrolyysiöljyn valmistuksesta ja jakelusta aiheutuva päästö.

3.1.1 Tarkasteltavat tapaukset

Toinen laskennassa huomioonotettava direktiiviin liittyvä tulkintaongelma koskee jalostamon määritelmää. Direktiivin mukaan silloin kun kyseessä on jalostamossa tuotetut polttoaineet, analyysiyksikkö laskentaa suorittaessa on jalostamo (2009/28/EY, liite V, C18). Direktiivi ei kuitenkaan määrittele tarkemmin jalostamon käsitettä. Tässä työssä pyrolyysiöljy valmistetaan kattilaan integroidulla pyrolysaattorilla, joka esiteltiin kuvassa 2. Direktiivin pohjalta ei pystytä määrittelemään onko leijukerroskattilaan integroitu pyrolysaattori direktiivin tarkoittama jalostamo vai ei. Tästä syystä tarkastellaan kahta tapausta sen mukaan ajatellaanko kattila ja pyrolysaattori erillisiksi yksiköiksi (tapaus 1) vai yhdeksi yksiköksi (tapaus 2). Kuvassa 4 on esitetty taserajaus tapaukselle 1 ja kuvassa 5 tapaukselle 2.

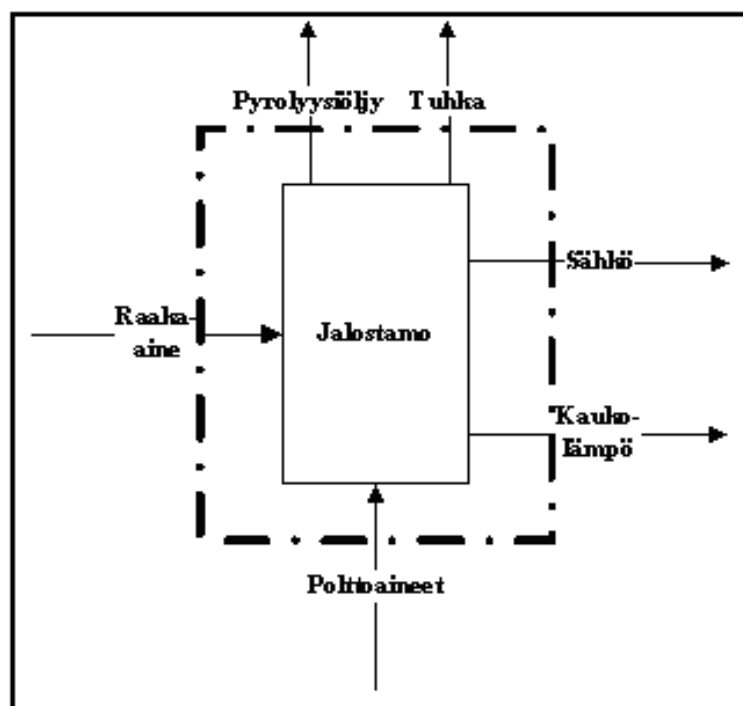


Kuva 4. Taserajaus tapauksessa 1, kun pyrolysaattori ja kattila oletetaan erillisiksi yksiköiksi.

Tapauksessa 1 taserajauksen sisään tulevat raaka-aineen sekä sähkön- ja lämmöntuotannon päästöt. Nämä päästöt kohdennetaan pyrolyysiöljylle, sivutuotekaasulle ja hiiltojäännökselle. Lämmöntuotannon päästöt koostuvat kattilan päästöistä, joista osa kohdentuu pyrolyysiprosessin tarvitsemalle lämmölle ja loput kohdentuu kattilan tuottamalle sähkölle ja kaukolämmölle. Osa sivutuotekaasun ja hiiltojäännöksen mukana kattilaan kohdentuvista päästöistä kohdentuu takaisin pyrolysaattoriin lämmön mukana. Näistä päästöistä osa kohdentuu taas takaisin kattilaan hiiltojäännöksen ja sivutuotekaasun mukana, jolloin päästöis-

tä muodostuu silmukka kattilan ja pyrolysaattorin välille. Tapausta 1 laskettaessa oletetaan pyrolysaattorin olevan jatkuvuustilassa, jolloin pyrolysaattoriin tulevat ja sieltä poistuvat virrat eivät muutu ajan suhteen. Iteroimalla voidaan laskea lämmöntuotannon päästö jatkuvuustilassa siten, että päästöjen kiertäminen pyrolysaattorin ja kattilan välillä tulee huomioiduksi.

Jos jostain syystä pyrolysaattorin ja kattilan aine- ja energiavirtoja ei voitaisikaan erottaa, silloin järjestelmää olisi tarkasteltava yhtenä yksikkönä. Tapaus 2 otettiin mukaan tarkasteluun, jotta voidaan havainnollistaa tällaista tilannetta ja sen vaikutuksia pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin. Tapauksessa 2 (kuva 5) taserajan sisään tulevat raaka-aineen tuotannon sekä kattilan polttoaineiden päästöt. Nämä päästöt kohdentuvat pyrolyysiöljylle, sähkölle ja kaukolämmölle. Tuhkalle ei kohdenneta päästöjä, koska sen energiasisältö oletetaan nolllaksi. Tuhkan sisältämän palamattoman polttoaineen osuus on yleensä niin pieni, että tuhkan energiasisältö on oletettavasti hyvin vähäinen verrattuna sähkön, lämmön ja pyrolyysiöljyn yhteenlaskettuun energiasisältöön.



Kuva 5. Taserajaus tapauksessa 2, kun pyrolysaattori ja kattila oletetaan yhdeksi yksiköksi.

3.1.2 Toiminnallinen yksikkö

Toiminnallinen yksikkö ilmaisee tuotteen suorituskykyä kuvaavat ominaisuudet määrällisessä muodossa. Toiminnallisen yksikön tarkoituksena on antaa vertailuyksikkö, johon syötteitä ja tuotoksia suhteutetaan. (SFS-EN ISO 14040:2006, 30.) Tässä työssä toiminnallisena yksikkönä on pyrolyysiöljyn tuottama energiamäärä [MJ]. Elinkaaren päästöt ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttigrammoina pyrolyysiöljyn tuottamaa [MJ] suuruista energiamäärää kohden $[gCO_{2ekv}/MJ_{pyro-oil}]$ (2009/28/EY, liite V, C2). Esimerkiksi hakkeen tuotannon päästöt ilmoitetaan kirjallisuudessa usein yksikössä $[gCO_{2ekv}/MJ_{hake}]$. Jotta elinkaaren kokonaispäästöt saadaan laskettua, muutetaan jokaisen yksittäisen päästökomponentin yksikkö toiminnalliseksi yksiköksi, jonka jälkeen suoritetaan päästöjen kohdentaminen. Tulostaulukoissa päästö ilmaistaan yksikössä $[gCO_{2ekv}/MJ_{lopputuote}]$, koska pyrolyysiöljyyn lisätään valmistuksen loppuvaiheessa etanolia, joka muuttaa lopputuotteen lämpöarvoa.

3.1.3 Päästöjen kohdentaminen

Kohdentamisella tarkoitetaan syöte- ja tuotosvirtojen kohdentamista eri tuotteille. RES-direktiivin mukaan kasvihuonekaasupäästöt kohdennetaan bionesteelle ja sen sivutuotteille suhteessa niiden energiasisältöön. Energiasisältö määritetään kaikille muille sivutuotteille paitsi sähkölle alemman lämpöarvon perusteella. (2009/28/EY, liite V, C17.) Biopolttoaineiden ja bionesteiden osalta tulee huomioida kaikki sivutuotteet pois lukien viljelykasvien tähteet, kuten olki, sokeriruokojätteet yms. Sivutuotteeksi lasketaan myös sähkö, joka ei kuulu liitteen V kohdan C16 soveltamisalaan eli sähkö, joka ei ole sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksessa viljelykasvien tähteistä tuotettua ylimääräistä sähköä. Jos sivutuotteella on negatiivinen energiasisältö, katsotaan energiasisältö laskennassa nollassi. (2009/28/EY, liite V, C16 & C18)

RES-direktiivi määrää siis kohdentamaan päästöt suhteessa energiasisältöön. Kattilassa syntyvällä lämmöllä ei kuitenkaan ole alempaa lämpöarvoa. Direktiivissä jää epäselväksi tuleeko lämmön osalta poiketa direktiivin kohdentamisperiaatteesta vai pitääkö kohdentaminen lämmölle jättää suorittamatta. Komission tiedonannossa RES-direktiivin kestävyysjärjestelmän täytäntöönpanosta ja biopolttoaineiden laskentasäännöistä todetaan vain, että kohdentamista ei voida suorittaa lämmölle alemman lämpöarvon perusteella (2010/C160/02, liite II). Koska kattilasta saatava lämpö hyödynnetään pyrolyysiprosessissa

sekä kaukolämpönä ja voimalaitoksen tuottama sähkö syötetään valtakunnan verkkoon, on tässä työssä päätetty kohdentaa kattilan päästöt lämmölle ja sähkölle niiden energiasisältöjen suhteessa.

3.1.4 GWP-kertoimet

GWP-kerroin (Global Warming Potential) kuvaa kasvihuonekaasun kykyä lämmittää ilmastoa suhteessa referenssikaasuun valitulla tarkasteluajanjaksolla. GWP-kerroin ilmoittaa kasvihuonekaasun sitoman lämpömäärän massayksikössä yhtä referenssikaasun massayksikön sitomaa lämpömäärää kohden tietyllä ajanjaksolla. Yleensä referenssikaasuna käytetään hiilidioksidia. (IPCC 1996, 22–23.) Kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa tulee huomioida hiilidioksidi- (CO_2), metaani- (CH_4) ja typpioksiduulipäästöt (N_2O). GWP-kertoimina käytetään RES-direktiivin laskentaohjeessa esitetyjä kertoimia, jotka ovat samat kuin IPCC:n kolmannesta arviointiraportissa esitetyt arvot (taulukko 2) (2009/28/EY, liite V, C5). GWP-kertoimia käytetään tässä työssä muunnettaessa metaani- ja typpioksiduulipäästöt vastaamaan hiilidioksidipäästöjä.

Taulukko 2. GWP-kertoimet (2009/28/EY, liite V, C5).

Kasvihuonekaasu	GWP-kerroin
CO_2	1
CH_4	23
N_2O	296

3.1.5 Päästöjen laskenta ja herkkyystarkastelu

Kasvihuonekaasupäästöjen laskenta perustuu RES-direktiivin laskentamenetelmään. Laskennassa tarvittavat arvot pyrolyysiketjun eri vaiheiden päästöille kootaan kirjallisuudesta. Valitut päästöarvot muutetaan yksikköön [$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}_{\text{pyro-oil}}$], jonka jälkeen päästöt kohdennetaan pää- ja sivutuotteille. Näin voidaan laskea pyrolyysiöljyn kokonaispäästöt ja päästövähennyksen suuruus, kun tunnetaan vertailuketjun kokonaispäästö. Tapausten 1 ja 2 elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen laskenta suoritetaan ensin näillä kirjallisuudesta valituilla oletusarvoilla. Koska kaikkien muuttujien vaikutusta päästövähennyksen määrään on liian monimutkaista ratkaista analyttisesti ja jotta yksittäisen parametrin valintaan liittyvä epävarmuus voitaisiin minimoida, määrätään tärkeimmille parametreille epävarmuusvälit

ja tiheysfunktiot, joiden pohjalta suoritetaan todennäköisyyspohjainen herkkyystarkastelu käyttäen Crystal Ball 2000.2 -ohjelmistoa, jossa herkkyystarkastelu perustuu Monte Carlo -menetelmään (Crystal Ball 2000, 11).

Monte Carlo -menetelmä on numeerinen menetelmä, joka käyttää mallin ratkaisussa satunnaislukuja. Prosessi on iteratiivinen ja jatkuu kunnes määritetyt kriteerit, kuten iterointikierrosten lukumäärä, ovat täyttyneet. (Crystal Ball 2000, 25.) Ensimmäisessä vaiheessa määritetään muuttujat, joiden herkkyksiä halutaan tarkastella. Tämän jälkeen muuttujille määrätään epävarmuusvälit, joiden pohjalta muodostetaan tiheysfunktiot kullekin muuttujalle. Simuloinnin aikana ohjelma valitsee sattumanvaraisesti jakauman lukuja ja luo näiden pohjalta mallin tuloksista.

Herkkyystarkastelua varten tapauksen 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) laskentaa joudutaan hieman yksinkertaistamaan, koska herkkyystarkastelussa käytetty ohjelmisto ei pysty yhtä aikaisesti suorittamaan iterointia ja muuttujien variointia. Yksinkertaistetussa mallissa ei huomioida päästöistä muodostuvaa silmukkaa, vaan lämmöntuotannon päästöt koostuvat ainoastaan kattilan polttoaineiden aiheuttamista päästöistä. Lisäksi työssä tehdään herkkyystarkastelut tilanteille, jossa kattilassa poltetaan ainoastaan haketta sekä tilanteelle, jossa kattilan polttoaineena on ainoastaan haketta eikä etanolia lisätä lopputuotteeseen. Kullekin parametreille valitut oletusarvot ja epävarmuusvälit sekä tiheysfunktiot esitetään kunkin päästökomponentin esittelyn yhteydessä seuraavissa kappaleissa.

3.2 Prosessiarvot

Pyrolyysiöljyn raaka-aineena käytetään hakkuutähteistä valmistettua haketta, joka kerätään päätehakkuualoilta. Hakkeen oletetaan koostuvan sekä kuusen että männyn hakkuutähteistä. Pyrolysaattoriin kytketty kattila tuottaa pyrolyysiprosessin tarvitseman lämmön sekä kaukolämpöä yhteiskunnalle ja sähköä valtakunnan verkkoon. Pyrolyysin tarvitsema lämpö otetaan kattilasta leijutushiekan välityksellä ja sivutuotekaasu sekä hiiltojäännös poltetaan kattilassa. Kattilan pääpolttoaineina käytetään hakkuutähdehaketta ja jyrshinturvetta, joiden keskinäistä suhdetta kattilassa varioidaan. Laskennassa oletetaan kattilan käyvän täydellä teholla normaalioloissa eikä käynnistyspolttoaineiden tai häiriötilanteiden aiheuttamia päästöjä huomioida laskettaessa pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöjä.

Taulukossa 3 on esitetty laitoksen prosessiarvot, jotka perustuvat koelaitoksella tehtyihin tutkimuksiin. Lisäksi tiedetään, että leijutushiekka luovuttaa pyrolysaattoriin 5,3 MW lämpöä ja pyrolyysiöljyn jalostusprosessi kuluttaa 1,35 MW sähköä. Häviöitä syntyy noin 2,5 MW.

Taulukko 3. Laskennassa käytettävät alkuarvot (Solantausta 2010).

Lähtötiedot	Massavirta [kg/s]	Lämpöarvo [MJ/kg]	Kosteuspitoisuus [%]
Pyrolyysiöljy	1,66	14,6	
Raaka-aine (kosteaa)	4,80	8,0	50
Raaka-aine (kuivattu)	2,58	16,7	8
Hiiltojäännös	0,67	31,3	
Kaasu	0,41	4,8	

3.3 Raaka-aineiden tuotannosta aiheutuvat päästöt

Raaka-aineiden tuotannosta tai viljelystä aiheutuviin päästöihin tulee RES-direktiivin mukaan sisällyttää tuotanto- tai viljelyprosessista, raaka-aineiden korjuusta, jätteistä, vuodoista ja käytettävistä kemikaaleista tai tuotteiden tuotannosta aiheutuvat päästöt (2009/28/EY, liite V, C6). Direktiivi ei kuitenkaan määrittele tarkemmin millä menetelmällä raaka-aineen tuotannosta aiheutuvat päästöt tulisi laskea ja miten pitkälle esimerkiksi raaka-aineen korjuuketjun energia- ja raaka-ainepanoksia tulisi jäljittää. Tässä työssä raaka-aineen tuotannosta ja viljelystä aiheutuviin päästöihin on oletettu sisältyvän metsän kasvatuksesta hakkuutähteille energiaperusteisesti kohdentuvat päästöt, jotka koostuvat metsän kasvattamiseen ja istuttamiseen, metsänhoitoon sekä päätehakkuuseen liittyvistä päästöistä. Lisäksi huomioidaan hakkuutähteiden metsäkuljetuksesta, haketuksesta, kaukokuljetuksesta ja hakkuupalstan lannoituksesta sekä maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt. Raaka-aineen kuivaus tapahtuu kattilasta tulevien savukaasujen hukkalämmöllä, jolloin kuivauksesta ei synny kasvihuonekaasupäästöjä, joita tarvitsisi laskennassa huomioida.

3.3.1 Metsän kasvatuus

Metsän kasvatuksen päästöt koostuvat taimien kasvattamiseen ja istuttamiseen, metsänhoitoon ja päätehakkuuseen liittyvistä vaiheista. Kasvatuus ja istutus -vaihe sisältää taimien kuljetuksen ja maan muokkauksen. Metsänhoito vaiheeseen kuuluu mm. lannoituksen, torjunta-aineiden ja metsän harvennuksen päästöt. Metsän kasvatuksen päästö kilogrammaa kuivattua kokopuuta kohden on noin 8,87 gCO_{2ekv}/kg (VTT 1998). Tämä päästö kohdennetaan hakkeen ja kokopuun välille energiaperusteisesti. Päästön kohdentamista varten tarvitaan hakkeen kuiva-aineen lämpöarvo, joka voidaan laskea käyttäen yhtälöä (2), kun tiedetään hakkeen saapumistilainen lämpöarvo (16,7 MJ/kg). Yhtälö (2) on johdettu saapumistilaisen polttoaineen tehollisen lämpöarvon yhtälöstä (Alakangas 2000, 29).

$$Q_{net,d} = \frac{(Q_{net,ar} + 0,02441 \cdot M_{ar}) \cdot 100}{100 - M_{ar}} \quad (2)$$

missä $Q_{net,d}$ = kuiva-aineen lämpöarvo [MJ/kg]

$Q_{net,ar}$ = saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

M_{ar} = kosteus saapumistilassa [%]

Hakkuutähdehakkeen kuiva-aineen lämpöarvoksi saadaan yhtälöstä (2) 18,4 MJ/kg. Kuivan kokopuun lämpöarvo on Alakankaan (2000) mukaan 19,55 MJ/kg. Hakkuutähteiden talteenottoasteena käytetään 30 %. Kohdentamisprosentin laskemiseksi tarvitaan vielä tietää kuinka paljon hakkuutähdettä syntyy kokopuuta kohden. Koska pyrolyysiöljyn valmistamiseen käytettävät hakkuutähteet voivat olla peräisin sekä mänty- että kuusimetsästä, käytetään keskimääräistä arvoa päätehakkuilla syntyvän hakkuutähteen määrälle. Lehtonen et al. (2004) esittävät artikkelissaan yhtälön biomassan kasvukertoimelle (3). Kasvukertoimen avulla voidaan laskea kuinka paljon kutakin biomassaositetta syntyy kokopuuta kohden. Artikkelissa on esitetty laskennassa tarvittavat parametrit sekä männyn että kuusen eri ositteille, joita ovat runkopuu, neulaset, oksat, kuori, kanto ja juuret. Laskentaan tarvittavat arvot on koottu artikkelista taulukkoon 4.

$$B_i = a_i + b_i e^{-0,01t}, \quad (3)$$

missä B_i = Biomassa ositteen kasvukerroin

a_i = Ositekohtainen parametri

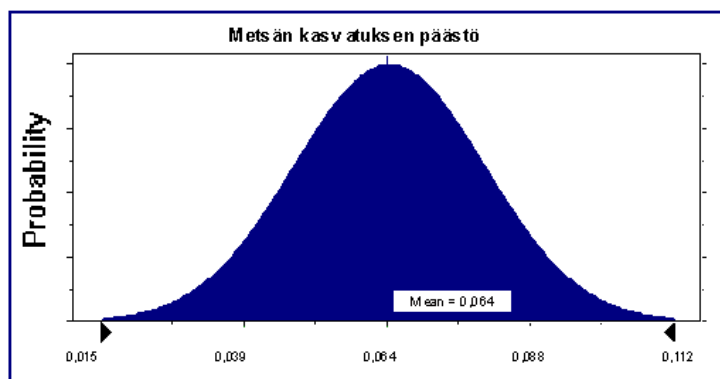
b_i = Ositekohtainen parametri

t = Puuston ikä

Taulukko 4. Parametrit a_i ja b_i mänylle ja kuuselle kasvukertoimen laskemiseksi (Lehtonen et al. 2004).

Osite i	Mänty		Kuusi	
	a_i	b_i	a_i	b_i
Runkopuu	0,419	-0,080	0,4	-0,0798
Neulas	0,018	0,050	0,0388	0,0499
Oksat	0,071	0,021	0,0905	0,0212
Oksat, kuolleet	0,010	0,006	0,0088	0,0059
Kuori	0,025	0,022	0,0353	0,0221
Kanto	0,047	-0,004	0,0488	-0,0039
Juuret, >5cm	0,084	-0,037	0,1024	-0,0365
Juuret, <5cm	0,027	0,027	0,0201	0,0269

Sijoittamalla taulukon 4 arvot yhtälöön (3) saadaan laskettua, että oksista ja neulasista koostuvaa hakkuutähdettä syntyy noin 20 % kokopuun massasta, kun oletetaan puuston iäksi 100 vuotta. Hakkuutähteen määrän ja lämpöarvojen perusteella saadaan nyt laskettua, että metsänkasvatuksen päästöistä noin 13,2 % kohdentuu hakkeelle. Hakkeelle kohdentuva päästö on näin ollen 0,064 gCO₂/MJ_{hake}. Herkkyystarkastelua varten metsän kasvatuksen päästöille määrätään ±50 % epävarmuus, koska metsänkasvatuksen päästöistä on julkaistu niukasti arvioita ja päästöt saattavat vaihdella metsiköstä riippuen suhteellisen paljonkin. Metsän kasvatuksen päästön oletetaan olevan normaalijakautunut (kuva 6).



Kuva 6. Normaalijakauma metsän kasvatuksen päästöille.

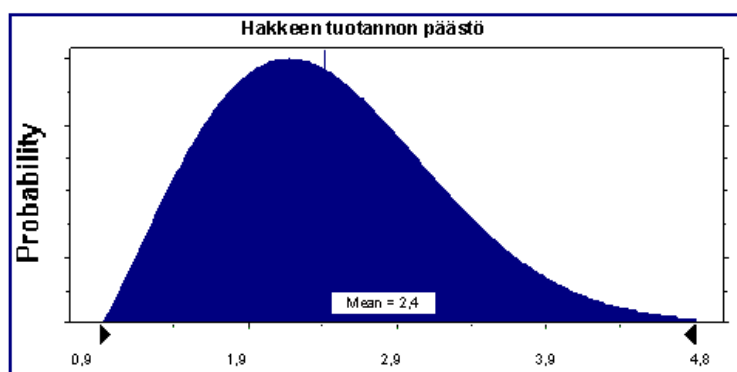
3.3.2 Hakkeen tuotanto

Hakkeen tuotannossa syntyvät päästöt ovat pitkälti riippuvaisia ketjun energiankulutuksesta eivätkä eri ketjujen energiankulutukset merkittävästi eroa toisistaan (Wihersaari & Palosuo 2000, 44; Mäkinen et al. 2006, 74). Näin ollen erot eri hakkeen tuotantoketjujen välillä ovat pieniä. Tässä työssä hakkuutähteen tuotantoketjuksi on valittu risutukkimenetelmä. Risutukkiketjun kasvihuonekaasupäästöt koostuvat hakkuutähteen paalauksesta, metsä- ja kaukokuljetuksista, koneiden siirroista ja haketuksesta. Mäkinen et al. (2006) on arvioinut risutukkiketjusta aiheutuvan päästön olevan noin $2,092 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}_{\text{hake}}$. Päästön laskemisessa oli käytetty vanhempia, IPCC:n toisessa arviointiraportissa esitettyjä GWP-kertoimia, jotka ovat 100 vuoden tarkasteluajanjaksolla metaanille 21 ja typpioksiduulille 310 (IPCC 1996, 22). Hakkeen toimituskosteutena oli 45 %. Kun edellä mainittu päästö muutetaan vastaamaan tässä työssä käytettäviä GWP-kertoimia (typpioksiduulille 296 ja metaanille 23) ja hakkeen toimituskosteutta (50 %), on päästö noin $2,313 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}_{\text{hake}}$.

Metsätähteet kerätään joko tuoreina (vihreinä) tai vasta niiden kuivuttua (ruskeina). Tuoreena kerättävästä hakkuutähteestä saadaan korkeampi talteenotto prosentti. Koska neulaset ja oksat sisältävät yli puolet puiden typestä, voi metsätähteen korjuu hidastaa metsän kasvua. (Wihersaari & Palosuo 2000, 11.) Metsätähteen korjuun vaikutus ympäristöön riippuu pitkälti metsätähteen korjuussa käytetyistä menetelmistä ja siitä millaiselta alueelta tähteet korjataan. Jättämällä osa hakkuutähteistä korjaamatta saavutetaan hyötyjä ja samalla vältetään tähteen korjuusta aiheutuvia haittoja. Hakkuualalle jätetyt tähteet ylläpitävät maaperän hiilivarastoa sekä hajotustoimintaa ja samalla oksat sekä neulaset, jotka ovat puun ravinteikkaimpia osia, ylläpitävät ravinnetasapainoa ja vähentävät lannoituksen tar-

vetta. Kuusivaltaisilla korjuualoilla suositellaan tähteiden korjuuta ruskeana, jolloin suurin osa neulasista varisee metsään tähteiden korjuun yhteydessä. Kuivattamisen ansiosta myös metsähakkeen laatu paranee. Silloin kun korjataan vihreää haketta, suositellaan jättää korjaamatta noin 30 %. (Äijälä et al. 2010, 19.) Kompensaatiolannoitus on kuitenkin usein edellytys pitkän aikavälin kestäväälle metsätähteiden hyödyntämiselle, jotta säilytetään ravinnetasapaino ja metsämaan hedelmällisyys. Kompensaatiolannoitus koostuu yleensä puutuhkan levityksestä ja sitä täydentävästä typpilannoituksesta. Puun tuhka sisältää kaikki tärkeät ravinteet typpeä lukuun ottamatta ja sillä on luonnollisesti alhainen myrkkymetallipitoisuus. (Börjesson 2000)

Koska kaikilla hakkuuaukoilla ei kompensaatiolannoitukselle ole tarvetta, on tässä työssä kompensaatiolannoituksesta aiheutuva päästö valittu osaksi hakkeen tuotannon päästöjen epävarmuutta. Herkkyystarkastelussa hakkeen tuotannon päästöjen vaihteluväliksi asetetaan 1,2–4,0 gCO_{2ekv}/MJ_{hake} (Wihersaari 2005b). Vaihteluvälin alaraja kuvaa tilannetta, jossa typen kompensaatiolannoitusta ei ole tarpeen suorittaa ja yläraja tilannetta, jossa suoritetaan täysi kompensaatio. Täydellisestä typen kompensaatiolannoituksesta aiheutuva päästö on noin 1,9 gCO_{2ekv}/MJ_{hake} (Wihersaari 2005b, 43). Liittämällä typen kompensaatiolannoituksesta aiheutuva päästö osaksi hakkeen tuotannon päästöjen epävarmuutta, ei oteta kantaa siihen milloin kompensaatiolannoitus on tarpeen, mutta kuitenkin lannoituksesta mahdollisesti aiheutuva päästö tulee huomioiduksi. Herkkyystarkastelussa hakkeen tuotannon päästöjen oletetaan olevan Weibull-jakautuneita (kuva 7).



Kuva 7. Weibull-jakauma hakkeen tuotannon päästöille.

3.3.3 Hakkeen kuivaus

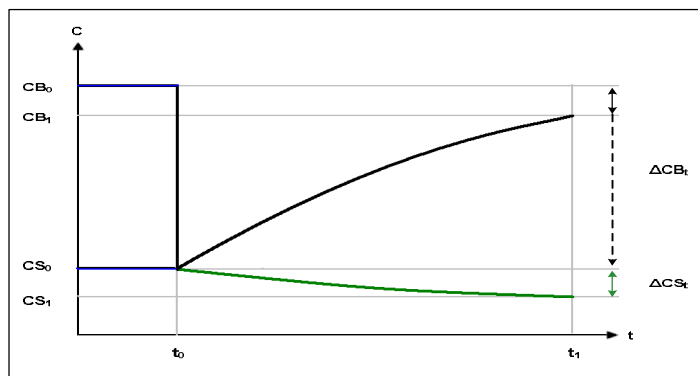
Hakkuutähteen kuivauksessa voidaan käyttää savukaasu-, höyry- tai ilmakuivausta (Fagernäs et al. 2004, 160). Kuivurit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin sen mukaan kuinka kuivauksen tarvitsema lämpö tuotetaan. Suorissa kuivureissa kuivattava aine on suorassa kosketuksessa väliaineen, kuten kuuman ilman, höyryn tai savukaasun kanssa. Epäsuorassa kuivauksessa lämpö siirretään lämmönsiirtimen välityksellä väliaineesta kuivattavaan materiaaliin. (Amos 1998, 6–7.) Kuivauksessa voidaan käyttää esimerkiksi kiekko-, viira- tai rumpukuivureita. Nykyään yleisimpiä biomassan kuivaukseen käytettäviä kuivureita ovat ilmakehän paineessa toimivat savukaasukuivurit. Niissä kuivauslämpötila on suhteellisen korkea, jonka vuoksi vapautuu orgaanisia komponentteja, jotka kulkeutuvat savukaasun mukana ilmakehään. Biomassaa kuivatessa orgaanisia yhdisteitä vapautuu haihtumisen, höyrytislauksen ja termisen hajoamisen seurauksena. Orgaaniset päästöt voidaan jakaa haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin (VOC) ja kondensoituviin yhdisteisiin. Sen lisäksi syntyy hiukkaspäästöjä. Noin 150 °C:ssa puumateriaalit alkavat tuhoutua kun alkoholit, hapot ja aldehydit vapautuvat. Puun kuivaus on kuitenkin mahdollista toteuttaa ilman haitallisia määriä orgaanisia päästöjä. (Fagernäs et al. 2010)

Fagernäs et al. (2010) käsittelevät artikkelissaan biomassan kuivausta. Esimerkkinä oli pienen kokoluokan pyrolyysiprosessi, jossa raaka-aineena käytettiin haketta ja elefanttiheinää (*miscanthus*). Artikkelissa päädyttiin valitsemaan raaka-aineen kuivaukseen suora rumpukuivain, joka toimii kattilan tuottamalla 200 °C savukaasuilla. Suora rumpukuivain on yleisin biomassan kuivaukseen käytettävä kuivuri nykyisillä laitoksilla. Kuivuri koostuu suuresta pyörivästä sylinteristä, jonka läpi biomassa liikkuu. Rummun halkaisija voi vaihdella 1–6 metriin. Kuivattava biomassa syötetään rumpuun ylemmästä päästä, jonka jälkeen materiaali kulkee rummun läpi poistuen toisesta päästä. Väliaineena voidaan käyttää savukaasuja ja kuumennettua ilmaa, joka virtaa vasta- tai myötävirtaan biomassan kulkusuuntaan nähden. Kuivattaessa haketta savukaasun sisääntulolämpötila on yleensä 250–400 °C:sta. (Fagernäs et al. 2010.) Rumpukuivurit eivät ole herkkiä partikkelikokojakaumalle ja ylläpitokustannukset ovat kohtuulliset. Materiaalin kosteuden kontrollointi on kuitenkin hankalaa, koska viipymäaika kuivurissa on suhteellisen pitkä. Rumpukuivurit ovat myös tilaa vieviä ja paloriski on olemassa. (Amos 1998, 17)

Pyrolyysiä varten hake tulee kuivata noin 8 % kosteuteen. Tämä aiheuttaa haastetta raaka-aineen kuivaukselle, koska metsätähdehakkeen kosteus ennen kuivasta on suuri, noin 50 %. Kuivurin valintaan vaikuttaa taloudellisuuden lisäksi kuivurin energiatehokkuus, päästöt, kuivaimen suorituskyky ja lämpöintegraatio (Fagnäs et al. 2010). Tässä työssä kuivaimeksi valitaan suorarumpukuivain, jossa raaka-aineen kuivaus tapahtuu kattilan savukaasuista saatavan hukkalämmön avulla. Laskennassa oletetaan, että valitun savukaasukuivurin teho riittää kuivaamaan raaka-aineen. Koska tässä työssä tietoa raaka-aineen kuivauksesta tarvitaan ainoastaan päästöjen kohdentamista varten, ei savukaasukuivurin taloudellisuuteen tai toteuttamisen realistisuuteen oteta kantaa. Kun raaka-aine kuivataan kattilan savukaasujen hukkalämmöllä, ei raaka-aineen kuivauksesta synny kasvihuonekaasupäästöjä, jotka tulisi huomioida pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöjä laskettaessa.

3.3.4 Maaperän hiilitaseen muutos

Metsätähteiden korjuun seurauksena aiheutuva maaperän hiilitaseen muutos voidaan olettaa kuuluvan RES-direktiivissä raaka-aineiden hankkimiseen liittyviin päästöihin (2009/28/EY, liite V, C6). RES-direktiivissä ei kuitenkaan määritetä tarkemmin, miten biogeenisten hiilivarastojen muutoksesta aiheutuvat päästöt tulisi huomioida. Hakkuutähteiden korjuun seurauksena maaperän hiilitase vähenee verrattuna tilanteeseen, jossa metsätähteet jätettäisiin palstalle. Hiilidioksidi vapautuu poltettaessa nopeammin kuin se olisi vapautunut hakkuutähteiden hajotessa maaperässä. Näin ollen palstalla, jossa hakkuutähteet hajoavat hitaasti on maaperässä enemmän hiiltä kuin palstalla, josta hakkuutähteet korjataan pois. Hakkuutähteiden polton ja metsässä hajoamisen nopeuseron aiheuttama hiilidioksidin lisäys ilmakehässä ajatellaan päästökseksi. (Wihersaari & Palosuo 2000, 27–28; Kujanpää et al. 2010.) Kuvassa 8 on havainnollistettu muutosta maaperän (ΔCS_t) ja metsäbiomassan (ΔCB_t) hiilitaseissa ajan funktiona. Siniset viivat kuvaavat maaperän ja metsäbiomassan hiilitaseita ajanhetkellä nolla eli silloin kun metsää ei ole vielä korjattu. Vihreä käyrä näyttää kuinka maaperän hiilitase pienenee metsän korjuun seurauksena ja musta käyrä näyttää kuinka hetkellä t_0 tehdyn hakkuun seurauksena metsäbiomassan hiilimäärä vähenee ensin jyrkästi, jonka jälkeen uuden metsän kasvun myötä hiilimäärä lähtee kasvuun. Kuvasta nähdään, että metsäbiomassan hiilimäärä ei kuitenkaan saavuta lähtötasoa (CB_0), vaikka metsä kasvaakin takaisin. Tämä johtuu siitä, että maaperän hiilitase on vähentynyt.



Kuva 8. Maaperän (ΔCS_t) ja metsäbiomassan (ΔCB_t) hiilitaseiden muutos ajan funktiona (muokattu lähteestä Joanneum Research 2010, 20). CB_0 = metsäbiomassan hiilimäärä lähtötilanteessa, CB_t = metsäbiomassan hiilimäärä metsän kasvun jälkeen hetkellä t_t , CS_0 = maaperän hiilitase lähtötilanteessa ja CS_t = maaperän hiilitase ajan t_t kuluttua.

Maaperän hiilitaseen vähenemisestä on tehty useita tutkimuksia. Eron ilmakehän hiilimäärissä hakkuutähteiden polton ja maatumisen välillä on huomattu riippuvan pitkälti hiilen hajotusfunktion muodosta ja valitusta tarkasteluajanjaksosta. Tarkasteluajan pidentyessä hiilimäärien ero lähestyy nollaa. Maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö on eri suuri eri tarkasteluajanjaksoilla. (Wihersaari & Palosuo 2000, 27–28; Repo et al. 2010; Kujanpää et al. 2010.) Heti metsätähteen korjuun jälkeen ilmenee merkittävä vähenemä maaperän hiilivarastossa. Korjaamatta jääneet metsätähteet alkaisivat joka tapauksessa hajota, mutta tutkimuksissa on huomattu, että osa hakkuutähteestä jää aina hajoamatta. (Kujanpää et al. 2010; Wihersaari & Palosuo 2000.) Maaperän hiilitasapainoa tutkittaessa valitulla tarkasteluajanjaksolla on suuri merkitys. Tarkasteltaessa lyhyttä aikaväliä päästökerroin on korkea, koska vertailutilanteessa (tähteet jätetty hakkuupalstalle) lähes kaikki hiili olisi vielä varastoituneena maaperään. 100 vuoden aikana 95 % tähteistä hajoaisi joka tapauksessa, mutta jäljelle jäävä 5 % ei hajoa vielä 100 vuoden aikana ja pysyy siis maaperässä pidempään. Talousmetsien kiertoaika Suomessa on noin 80–100 vuotta. Suomen metsien kiertoajan aikana hiilimäärien erot eivät siis tasoitu, joten pidemmälläkin aikavälillä tarkasteltuna tähteiden korjuu aiheuttaa päästöjä referenssitilaan verrattuna. (Kujanpää et al. 2010.) Joanneum Research (2010, 26) mukaan kuluu noin 300 vuotta ennen kuin maaperän hiilimäärä saavuttaa taas tasapainon.

Kujanpää et al. (2010) mukaan 5 vuoden tarkasteluajanjaksolla maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö on $94 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{kostea_tähde}}$, 50 vuoden jaksolla $27 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{kostea_tähde}}$ ja 100 vuoden jaksolla $17 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{kostea_tähde}}$. Wihersaari & Palosuo (2000) laskivat, että kuusikon hakkuualalla päästö olisi noin 11–13 $\text{gCO}_2/\text{MJ}_{\text{pa}}$ 100 vuoden ajanjaksolla. Tämä päästö on 3–5 kertaa suurempi kuin hakkutähteiden korjuuketjun päästöt. (Wihersaari & Palosuo 2000, 27–28.) Repo et al. (2010) tutkimuksessa tähteiden hajoamisnopeus oli ilmoitettu eri paksuisille oksille. Artikkelissa oli esitetty halkaisijaltaan 1–5 cm kuusen oksille ja 10–35 cm kannoille hajoamiskäyrät. Taulukkoon 5 on laskettu artikkelissa esitettyjen käyrien avulla hajoamatta olevien oksien sisältämän hiilen suhteelliset osuudet ajan funktiona.

Taulukko 5. Hajoamatta olevan puun suhteellinen osuus halkaisijaltaan 1, 2 ja 5 cm oksissa 20 ja 100 vuoden päästä puiden kaatamisesta (Repo et al. 2010).

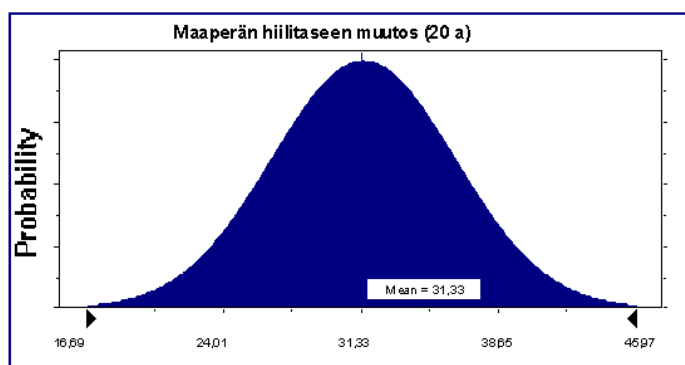
Oksan paksuus [cm]	Hajoamatta 20 vuoden päästä [%]	Hajoamatta 100 vuoden päästä [%]
1	20	2
2	29	6
5	40	16

Tässä työssä maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä tarkastellaan kahdella ajanjaksolla, jotka ovat 20 ja 100 vuotta. Lisäksi tarkastellaan tilannetta, jossa maaperän hiilitaseen muutoksesta johtuvia päästöjä ei huomioida lainkaan. Näistä muodostuu alatapaukset a, b ja c. Kirjaimet viittaavat maaperän hiilitaseen tarkasteluajanjaksoon. Tapauksessa a ei ole lainkaan huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä. Tapauksessa b maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä tarkastellaan 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa c 20 vuoden ajanjaksolla. Maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö laskettiin siten, että taulukossa 5 esitettyjen hajoamatta olevan puun suhteellisilla osuuksilla kerrottiin puun palamisessa syntyvän hiilidioksidin päästökerroin, joka on $109,6 \text{ g/MJ}$ (Tilastokeskus 2010a). Taulukossa 6 on esitetty maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt sekä niiden vaihteluvälit 20 ja 100 vuoden ajanjaksoilla.

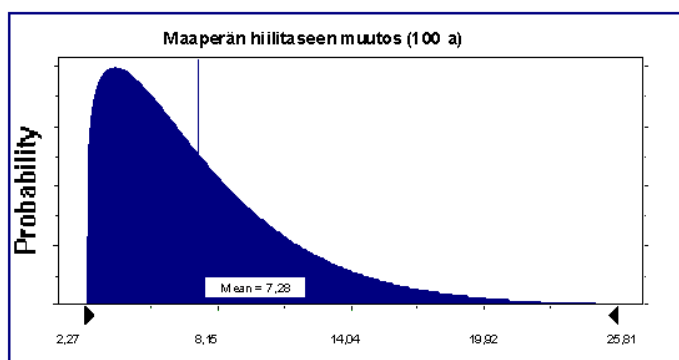
Taulukko 6. Maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvan päästön vaihteluväli 20 ja 100 vuoden tarkastelu-ajanjaksolla.

Maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö	20 a [g/MJ _{hake}]	100 a [g/MJ _{hake}]
Alaraja	21,77	2,52
Oletusarvo	31,33	6,20
Yläraja	44,19	18,01

Oletusarvoa laskettaessa käytettiin arvoja kahden senttimetrin paksuiselle oksalle. Vaihteluvälin alarajaa laskettaessa käytettiin yhden senttimetrin paksuista oksaa ja ylärajaa laskettaessa viiden senttimetrin paksuista oksaa. Maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvalla päästöllä 20 vuoden ajanjaksolla valitaan normaalijakauma (kuva 9) ja 100 vuoden ajanjaksolla Weibull-jakauma (kuva 10).



Kuva 9. Normaalijakauma maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuville päästöille 20 vuoden ajanjaksolla.



Kuva 10. Weibull-jakauma maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuville päästöille 100 vuoden ajanjaksolla.

3.4 Jalostuksesta aiheutuvat päästöt

Jalostuksesta aiheutuviksi päästöiksi lasketaan itse jalostuksesta, jätteistä, vuodoista sekä jalostuksessa käytettävien kemikaalien ja tuotteiden tuotannosta aiheutuvat päästöt (2009/28/EY, liite V, C11). Pyrolyysiöljyn valmistus kuluttaa sähköä ja lämpöä. Lisäksi valmiiseen tuotteeseen voidaan lisätä etanolia parantamaan pyrolyysiöljyn stabiilisuutta ja minimoidaan viskositeetin kasvua.

Pyrolyysireaktion tarvitsema lämpö saadaan kattilasta leijutushiekan mukana. Lämmöntuotannosta aiheutuvat päästöt koostuvat kattilaan syötettävien polttoaineiden eli hakkuutähdehakeen ja jyrshinturpeen päästöistä tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen). Tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) kattilan ja pyrolysaattorin välisiä virtoja ei käsitellä erikseen, vaan prosessin tarvitsema lämpö tulee huomioduksi jalostamoon tulevia päästöjä laskettaessa. Käynnistyspolttimien tai häiriötilanteiden aiheuttamia päästöjä ei huomioida. Kattilan oletetaan siis toimivan täydellä teholla normaaliolosuhteissa.

3.4.1 Kattilan valinta

Kasvihuonekaasupäästöjen laskentaa varten tarvitaan kattilan sähkö- ja lämpöteho. Liitteessä I on laskettu kuinka suuri kattila tarvitaan, jotta raaka-aine voidaan kuivata kattilan savukaasuilla. Kattilaan syötettävää polttoainetta ei kuivata, vaan ainoastaan pyrolyysiöljyn raaka-aine. Kattilassa poltetaan hakkuutähdehakea ja jyrshinturvetta vaihtelevin suhtein. Kattilan mitoitus suoritettiin niin, että kattilan käydessä täydellä teholla kaikilla mahdollisilla polttoainesuhteilla savukaasuja syntyy riittävän paljon raaka-aineen kuivaamiseksi. Silloin kun kattilassa poltetaan pelkkää jyrshinturvetta, syntyy savukaasuja vähemmän kuin poltettaessa pelkkää hakea. Tämä johtuu siitä, että jyrshinturpeella on parempi lämpöarvo, jonka vuoksi sitä tarvitaan vähemmän kuin hakea saman polttoainetehon aikaansaamiseksi. Polttoainetehoksi saatiin liitteen I laskuissa 96 MW, sähkötehoksi 27 MW ja lämpötehoksi 54 MW.

Leijukerrokattilan tyyppiksi valittiin kuplaleijupeti. Kattilatyyppejä tarvitaan laskettaessa palamisen typpioksiduuli- ja metaanipäästöt. Kattilan valinta perustuu polttoainetehoon ja käytettäviin polttoaineisiin. BFB-kattila soveltuu CFB-kattilaa paremmin märille polttoai-

neille, kuten hakkeelle ja turpeelle. Lisäksi se on yleisempi pienessä kokoluokassa sen yksinkertaisuudesta johtuvan halvemman hinnan vuoksi. (Hyppänen & Raiko 1995, 418.) Pyrolysaattorin sivutuotteina syntyvän kaasun ja hiiltojäännöksen polttamisessa syntyy enemmän energiaa kuin leijutushiekan mukana siirtyy pyrolysaattoriin. Kattilan tuottama sähkö- ja lämpöteho halutaan pitää laskennan yksinkertaistamiseksi vakiona, joten turpeen ja hakkeen syöttöä kattilaan vähennetään saman verran kuin hiiltojäännös ja sivutuotekaasu tuottavat kattilaan ylimääräistä energiaa. Turpeen ja hakkeen syöttöä vähennetään kumpakin yhtä paljon.

3.4.2 Sähköntuotanto

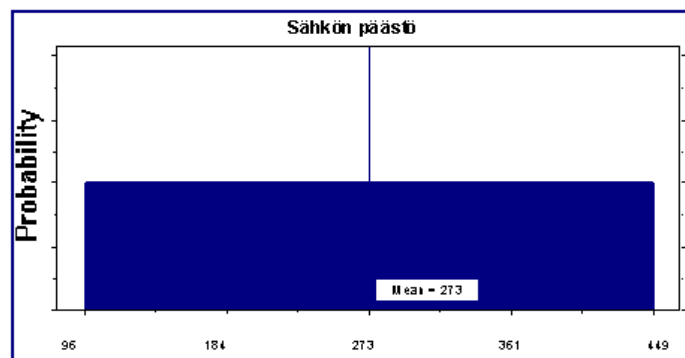
RES-direktiivin mukaan muualla kuin polttoaineen tuotantolaitoksessa tuotetun sähkön kasvihuonekaasupäästötason oletetaan olevan yhtä suuri kuin sähkön tuotannosta ja jakelusta aiheutuvat keskimääräiset päästöt tietyllä alueella. Laskennassa voi käyttää yksittäisen sähköntuotantolaitoksen keskiarvoa kyseisessä laitoksessa tuotetun sähkön päästöille, jos kyseistä laitosta ei ole liitetty sähköverkkoon. (2009/28/EY, liite V, C11.) Sähkön ja lämmön yhteistuotannosta saatavasta ylimääräisestä sähköstä saadaan päästövähennys, jos kyseessä on ylimääräinen sähkö, joka on tuotettu viljelykasvien tähteestä. Tätä ylimääräistä sähköä laskettaessa sähkön ja lämmön tuotantoyksikön kokona pidetään pienintä mahdollista kokoa, jolla voidaan tuottaa polttoaineen tuottamisessa tarvittava lämpö. Ylimääräiseen sähköön liittyvän kasvihuonekaasupäästövähennyksen katsotaan olevan yhtä suuri kuin se kasvihuonekaasujen määrä, joka aiheutuisi kun sama määrä sähköä tuotettaisiin voimalassa, joka käyttää samaa polttoainetta kuin yhteistuotantolaitos. (2009/28/EY, liite V, C16)

Tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) käytetään tietyn alueen keskimääräistä päästöä sähköntuotannon päästöille, koska kyseessä on muualla kuin polttoaineen tuotantolaitoksessa tuotettu sähkö. RES-direktiivi ei kuitenkaan määrittele mitä aluetta tulisi käyttää. Yhtä perusteltua voisi olla käyttää markkina-alueena niin Suomea, Pohjoismaita kuin Eurooppaakin. Tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) prosessin tarvitsema energia tulee pyrolysaattoriin kytketystä voimalaitoksesta. Tällöin ei voida soveltaa direktiivin liitteen V kohtaa C11, koska kyseessä ei ole muualla tuotettu sähkö. Toisaalta direktiivin liitteen V kohtaa C16 ei voida soveltaa, sillä kyseessä ei ole viljelykasvien tähteistä tuotet-

tu sähkö. Koska tapauksessa 2 pyrolysaattorin ja kattilan energia- ja ainevirtoja ei eroteta, vähennetään pyrolysaattorin kuluttama sähkö verkkoon syötettävästä sähkötehosta. Tapauksessa 2 sähköstä aiheutuvat päästöt tulevat siis huomioiduksi siinä, että verkkoon syötettävän sähkön määrä pienenee, jolloin osa tuotetun sähkön päästöistä kohdentuu pyrolyysiöljylle.

Sähköntuotannon keskimääräisen päästön määrittäminen on hankalaa, sillä sähköä tuotetaan käyttämällä laajaa kirjoa erilaisia polttoaineita ja tuotantotekniikkoja. Tämän lisäksi eri maiden sähköverkot ovat yhteydessä toisiinsa, jolloin sähkön tuotantoalueen määrittäminen monimutkaistuu entisestään. Koska pyrolyysiöljyn tuotannon oletetaan tapahtuvan Suomessa, katsotaan perustelluksi käyttää oletusarvona Suomen keskimääräistä CO₂-päästökerrointa, joka on Soimakallion & Saikun (2010) mukaan vuosien 2000–2007 keskiarvona 221 gCO₂/kWh. Päästökerroin on laskettu IEA:n (International Energy Agency) tuottamien energia- ja CO₂-tietokantojen pohjalta kohdentamalla päästöt sähkölle ja lämmölle energiaperusteisesti.

Herkkyystarkastelua varten päästökertoimen ylärajaksi valitaan EU-27 alueen maiden sähköntuotantoprofiilien pohjalta laskettu päästökerroin, joka on 449 gCO₂/kWh (Soimakallio & Saikku 2010). Päästöjen alarajana herkkyystarkastelussa käytetään vastaavalla tavalla määritettyä pohjoismaisten sähkömarkkinoiden päästökerrointa, joka on 96 gCO₂/kWh (Soimakallio & Saikku 2010). Pohjoismaisten sähkömarkkinoiden alueeseen kuuluu Norja, Tanska, Ruotsi ja Suomi. Herkkyystarkastelua varten sähkön päästökertoimelle määrätään tasajakauma (kuva 11), koska alaraja, oletusarvo ja yläraja eivät kuvaa saman päästökertoimen vaihteluväliä, vaan kolmen eri alueen päästöjä. Tasajakaumaa käyttämällä ei oteta kantaa siihen, mikä markkina-alueista olisi sopivin sähköntuotannon päästökertoimen määrittelyyn, vaan herkkyystarkastelu huomioi sekä alueen valintaan liittyvän epävarmuuden että yksittäistä aluetta kuvaamaan valitun parametrin herkkyden.



Kuva 11. Tasajakauma sähkön tuotannon päästökertoimelle.

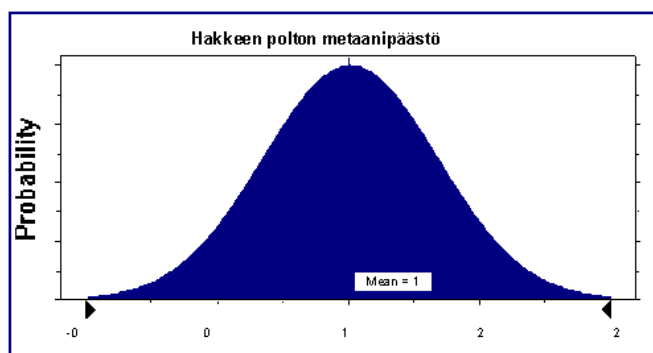
3.4.3 Hakkeen polttaminen

Kattilassa poltettavan hakkeen päästöt koostuvat hakkuutähteelle kohdentuvista metsän kasvatuksen päästöistä, hakkeen tuotannon päästöistä, maaperän hiilivaraston muutoksesta aiheutuvasta päästöstä sekä hakkeen poltossa syntyvistä metaani- ja typpioksiduulipäästöistä. Hiilidioksidipäästöjä ei tarvitse huomioida hakkeen osalta, koska hake on uusiutuvaa metsäbiomassaa.

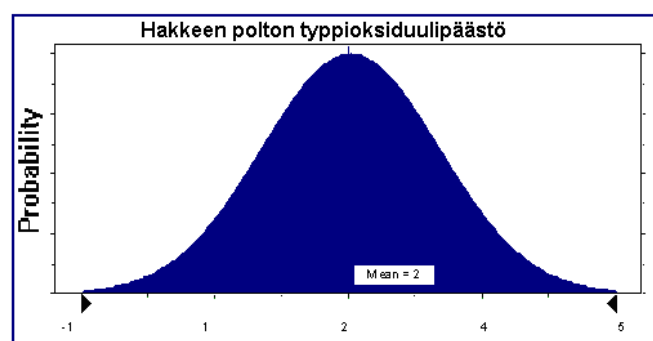
N_2O - ja CH_4 -päästöt riippuvat voimakkaasti tulipesän olosuhteista, jolloin päästökertoimet riippuvat niin polttoaineesta, polttotekniikasta kuin kattilan kuormituksestakin. Kuormitus vaikuttaa päästöihin muuttuvan lämpötilan ja ilmakertoimen kautta. (Tsupari et al. 2006, 12.) IPCC:n mukaan CH_4 päästöjen epävarmuudet ovat 50–150 % ja N_2O :lle suuruusluokasta riippuen 0,1–10 kertaa suuremmat verrattuna päästön keskiarvoon (IPCC 2000, 41). Epävarmuudet liittyvät kaasujen syntymekanismeihin. Metaanipäästöt syntyvät epätäydellisen palamisen seurauksena, jolloin niitä esiintyy harvemmin suurissa kattiloissa. N_2O -päästöt syntyvät matalissa lämpötiloissa ja päästö riippuu käytetystä polttoaineesta sekä useista muista tekijöistä kuten yli-ilman määrästä, typen määrästä polttoaineessa sekä typen ja hapen keskinäisestä suhteesta polttoaineessa. (Tsupari et al. 2007)

Hakkeen poltossa syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa käytetyt päästökertoimet perustuvat suomalaisissa leijukerroskattiloissa tehtyihin päästömittauksiin eri osakuormilla ja polttoainesuhteilla. Käyttöön valittiin 80 % osakuormalle annetut päästökertoimet, jotka perustuvat biomassan ja turpeen polttoon BFB-kattilassa. Vaihteluväli N_2O -päästökertoimelle on 0–4,3 mg/MJ_{pa} (Tsupari et al. 2007). Oletusarvoksi valitaan vaihteluvälin puoliväli eli 2,15 mg/MJ_{pa} . Päästökertoimen alaraja voidaan saavuttaa kun kattilassa

poljetaan biomassaa. Yläraja kuvaa tilannetta, jossa kattilassa poljetaan pääasiassa turvetta. CH₄-päästökertoimen vaihteluväli on 0,05–1,8 mg/MJ_{pa} (Tsupari et al. 2007). Oletusarvoksi valitaan metaanipäästöjen osalta myös vaihteluvälin puoliväli eli 0,925 mg/MJ_{pa}, koska oletusarvoisesti kattilan polttoainetehosta hake muodostaa 50 % ja turve loput. Molemmille päästöille määrätään herkkyytstarkastelua varten normaalijakaumat, jotka on esitetty kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Normaalijakauma hakkeen poltossa syntyville metaanipäästöille.



Kuva 13. Normaalijakauma hakkeen poltossa syntyville typpioksiduulipäästöille.

3.4.4 Turpeen tuotanto ja poltto

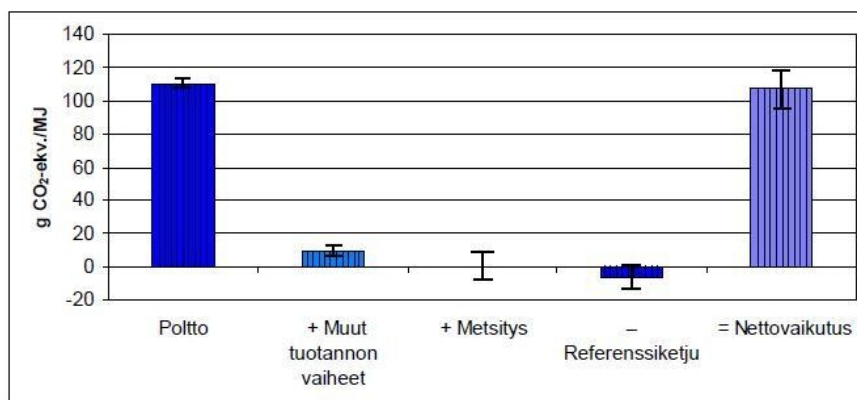
Turpeen elinkaaren päästöjen arvioiminen on monimutkaista. Suomessa turve luokitellaan hitaasti uusiutuvaksi biomassapolttoaineeksi (TEM 2010b). Suomen kasvihuonekaasuintentaarissa turve luokitellaan kuitenkin fossiiliseksi polttoaineeksi IPCC:n ohjeiden mukaisesti (IPCC 2006). Turpeen päästöissä huomioidaan turpeen tuotannon, polton ja turpeen tuotantoalueen jälleenkäsittelyn päästöt. Suurin osa turpeen tuotantoalueista Suomessa on metsätaloukskäyttöön kuivattua suomaata. Turpeen tuotanto ja poltto sisältävät päästöt työkoneista, kuljetuksista, tuotantoalueelta, varastokasoista ja poltosta (Kirkinen et al.

2007). Turpeen tuotantoalueet ovat sekä päästöjen lähteitä että nieluja. Esimerkiksi metsäojitettu suo on hiilidioksidin lähde. Lisäksi turpeen varastokasoista vapautuu hiilidioksidia turpeen hajoamisen seurauksena. Työkoneista ja kuljetuksista syntyy myös hiilidioksidi päästöjä, mutta turpeen poltto aiheuttaa kuitenkin suurimman osan, noin 90 % päästöistä. Poltossa vapautuu hiilidioksidia, typpioksiduulia ja pieniä määriä metaania. Jälleenkäsittelymenetelmänä käytettävä metsitys sitoo hiiltä kasvavaan puumassaan, mutta samalla jäljellä oleva turve vapauttaa hajotessaan hiilidioksidia ilmakehään. (Kirkinen et al. 2007)

Elinkaariarvioinnissa turpeen referenssitilan päästö vähennetään muista turpeen päästöistä, jotta saadaan selvitettyä nettokasvihuonekaasuvaikutus. Luonnontilaisen suon hajoamista ja siitä aiheutuvia päästöjä ei kuitenkaan tunneta tarkasti, jonka vuoksi referenssitilan päästöjen määrittäminen on hankalaa. Yleensä tutkimuksissa käytetään keskimääräistä arvoa metsäojitetun suon päästöille. Erot eri soiden välillä voivat kuitenkin olla merkittäviä, jonka vuoksi päästöt saattavat todellisuudessa erota käytetystä keskiarvosta. Referenssitilan päästöillä saattaa siten olla oletettua suurempi vaikutus ketjun kokonaispäästöihin. (Savolainen 2010.) Suomen ympäristökeskuksen vetämässä projektissa vertailtiin Suomessa ja Ruotsissa tehtyjen turpeen elinkaariarviointien tuloksia. Tutkimuksessa arvioitiin mm. Kirkinen et al. (2007) tekemää turpeen elinkaariarviointia, johon tässä työssä käytettävä päästöarvo perustuu. Vertailuraportissa laskettu turpeen elinkaaren päästö vastasi Kirkinen et al. (2007) saamia tuloksia metsäojitettu suo-metsitys -ketjussa. (Seppälä et al. 2010, 48–50). Myös Suomalainen Tiedeakatemia otti kantaa turpeen energiakäytöstä aiheutuviin päästöihin. Seppälän et al. (2010) tulokset olivat samassa linjassa Suomalaisen Tiedeakatemian kannanoton kanssa (Vesala et al. 2010, 34).

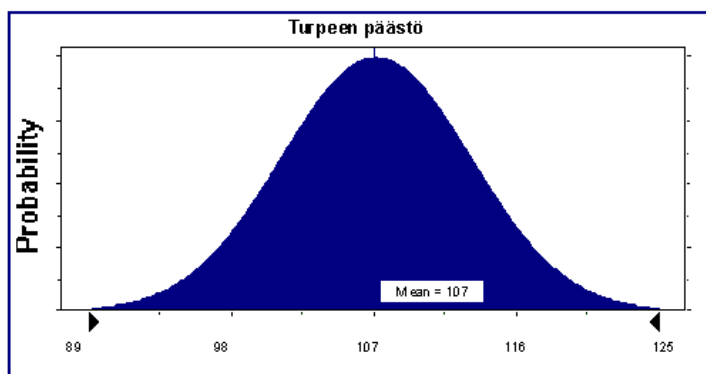
Kirkinen et al. (2007) esittivät tutkimuksensa tulokset käyttämällä dynaamista indikaattoria. Tämän vuoksi tässä työssä käytetään Mäkisen et al. (2006) esittämiä lukuarvoja, jotka on johdettu vuonna 2006 julkaistavaksi hyväksytyn Kirkinen et al. (2007) artikkelin luvuista. Turpeen tuotantoketjulle metsäojitettu suo jälleenkäsittelynä metsittäminen kasvihuonevaikutukset on esitetty CO₂-ekvivalenttina turpeen energiasisältöä kohden. Päästöjen tarkastelu on tehty kumulatiivisesti 100 vuoden ajanjaksolle. Kuvassa 14 näkyy kunkin turpeen tuotantoketjun vaiheen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalentteina turpeen energiasisältöä kohden. Nettovaikutus voidaan laskea vähentämällä polton, muiden tuotantovaiheiden ja metsityksen päästöistä/nielusta vertailutilan päästöt. Pystyvi-

voilla kuvataan kuhunkin tuotantovaiheeseen liittyviä epävarmuuksia. Kuvasta nähdään, että metsityksen sitoma hiili on likimain sama kuin jäännösturpeen hajoamisesta vapautuva hiili. (Mäkinen et al. 2006, 109–100)



Kuva 14. Turpeen netto kasvihuonekaasuvaikutus (Muokattu lähteestä Mäkinen et al. 2006, 100).

Kuvasta 14 nähdään, että turpeen energiakäytön nettokasvihuonekaasuvaikutus on noin 107 ± 12 gCO_{2ekv}/MJ. Tätä arvoa käytetään tässä työssä laskettaessa kattilassa poltettavan turpeen kasvihuonekaasupäästöjä. Herkkyystarkastelua varten päästökertoimelle määrättiin normaalijakauma (kuva 15).



Kuva 15. Normaalijakauma turpeen päästökertoimelle.

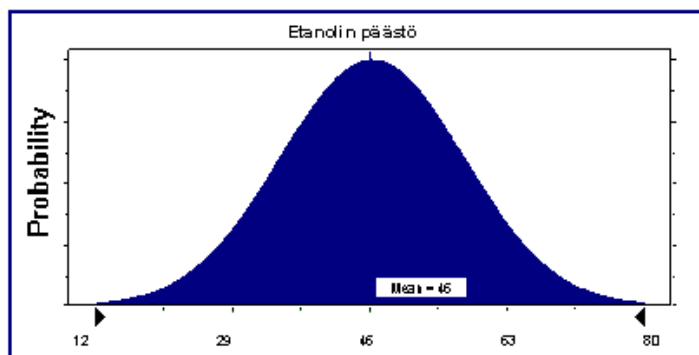
3.4.5 Etanolin lisääminen

Kevyillä poolisilla liuottimilla voidaan parantaa pyrolyysiöljyn stabiilisuutta, homogeenisuutta ja minimoida viskositeetin kasvua. Viskositeetin ja ikääntymisnopeuden pienemisen lisäksi pyrolyysiöljyn happamuus pienenee sekä haihtuvuus ja lämpöarvo paranevat. Liuottimina voidaan käyttää esimerkiksi etanolia, metanolia tai isopropanolia. Niiden käyttöä liuottimina puoltaa yksinkertaisuus, pienet kustannukset ja hyödylliset vaikutukset. Tutkimusten mukaan alle viiden prosentin pitoisuuksilla ikääntymistä saadaan estettyä noin kuukaudella. (Oasmaa et al. 2004)

Tässä työssä pyrolyysiöljyyn on päätetty oletusarvoisesti lisätä 2,5 m-% etanolia tuotteen ominaisuuksien parantamiseksi. Käytettävä etanoli voitaisiin valmistaa esimerkiksi vehnästä, ohrasta, sokeriruo'osta, sokerijuurikkaasta tai maissista. Etanolin päästökertoimeksi tässä työssä valitaan RES-direktiivin oletusarvo vehnästä valmistetulle etanolille, jonka valmistuksessa käytetään energiana maakaasua tavanomaisessa kattilassa. Tämä päästökero on $55 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}_{\text{etanoli}}$ (2009/28/EY, liite V, D).

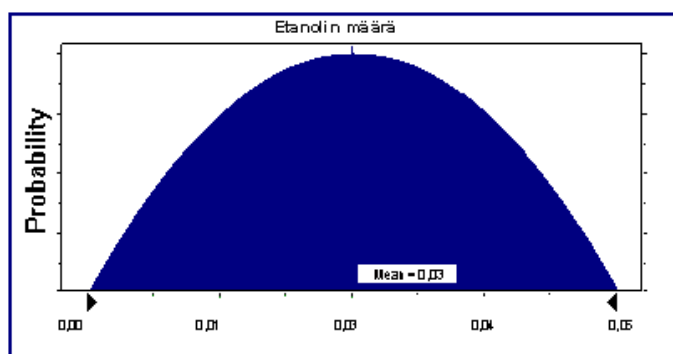
Suomen oloissa etanolin päästö on hieman suurempi kuin RES-direktiivissä annetut oletusarvot, koska saanto on Suomessa heikompi ja peltojen typpilannoitustarve suurempi. Näin ollen etanolin päästön ylärajana käytetään perinteiseen suomalaiseen kyntöviljelyketjuun (ketju A) perustuvaa päästöarvoa, jossa ei ole huomioitu korvaushyötyjä, joita saataisiin kun soijarehua korvataan tuotannon sivutuotteena syntyvällä valkuaisrehulla. Erot eri viljelyketjujen välillä ovat kuitenkin pieniä. Ketjun A päästö ilman korvaushyötyjä on $112 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{etanoli}}$ (Mäkinen et al. 2006). Ketjun päästöt koostuvat maaperän kynnöstä, kalkituksesta, kylvöstä, rikkakasvien torjunnasta, puinnista, kuivatuksesta, kuljetuksista, varastoinnista, etanolin prosessoinnista ja jakelusta aiheutuvista päästöistä. Ketjun A päästöjen laskennassa oli käytetty vanhempia GWP-kertoimia, jonka vuoksi päästö muutetaan vastaamaan tässä työssä käytettäviä GWP-kertoimia ja päästöt kohdennetaan etanolin ja sivutuotteena syntyvän valkuaisrehun eli rankin välillä energiaperusteisesti. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (2010) selvityksen mukaan 60,8 % viljelyn päästöistä kohdentuu etanolille (Sinkko et al. 2010, 15). Etanolin päästö on näin laskettuna noin $68 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{etanoli}}$. Laskettaessa etanolin päästöjä lopputuotetta kohden käytetään etanolin lämpöarvona 27 MJ/kg (2009/28/EY, liite III). Herkkyystarkastelussa etanolipäästöjen alaraja-

na käytetään sokeriruo'osta valmistettua etanolia, jonka oletuspäästö on RES-direktiivin mukaan $24 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$ (2009/28/EY, liite V, D). Etanolipäästön vaihteluvälin oletetaan olevan normaalijakautunut (kuva 16), koska valitut arvot eivät taipuneet Weibull-jakaumaan. Tämän vuoksi oletusarvoa muutetaan herkkyystarkastelussa 55:stä 46:een $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}_{\text{etanol}}$. Oletusarvon muuttaminen ei vaikuta merkittävästi herkkyystarkastelun tuloksiin.



Kuva 16. Normaalijakauma etanolin päästökertoimelle.

Myös etanolin määrän vaihtelu huomioidaan herkkyystarkastelussa. Vaihteluvälin alarajaksi määrätään 0 m-% ja ylärajaksi 5 m-%. Etanolin määrän oletetaan olevan beta-jakautunut (kuva 17) tällä vaihteluvälillä. Laskettaessa päästöjä lopputuotetta eli pyrolyysiöljyn ja etanolin seosta kohden, huomioidaan etanolin korottava vaikutus lopputuotteen lämpöarvoon.



Kuva 17. Beta-jakauma etanolin määrän vaihtelulle.

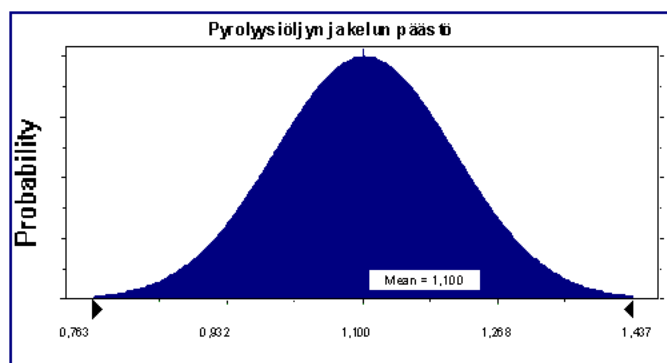
3.5 Kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuvat päästöt

Tässä työssä pyrolyysiöljyn kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuvat päästöt on arvioitu samaksi kuin fossiilisilla polttoaineilla, koska ei ollut perusteita olettaa, että kuljetuksesta aiheutuisi fossiilisten polttoaineiden kuljetuksesta poikkeavia päästöjä. Edwards et al. (2007, liite 1) raportoi dieselöljyn kuljetuksen, varastoinnin ja jakelun päästöt. Nämä arvot on esitetty taulukossa 7. Dieselin kuljetus varastoihin voi tapahtua junalla, laivalla tai putkistokuljetuksena. Päästö on laskettu käyttäen edellä mainittujen kuljetusmuotojen keskinäisenä suhteena 1/3. Varastoinnin päästöt koostuvat pääasiassa kulutetusta sähköenergiasta, jota tarvitaan polttoaineen pumppaamisessa. Jakeluvaiheen päästöt koostuvat säiliöautojen energiantarpeesta ja jakeluaseman toimintaan tarvittavan energian tuotannosta. Infrastruktuurin päästöjä ei ole huomioitu. (Edwards et al. 2007, liite 1)

Taulukko 7. Laskennassa käytetyt arvot pyrolyysiöljyn kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuville päästöille (Edwards et al. 2007, liite 1).

Vaihe	CO ₂ -päästö [g/MJ _{pa}]	CH ₄ -päästö [g/MJ _{pa}]	N ₂ O-päästö [g/MJ _{pa}]	Yhteensä [CO ₂ ekv/MJ _{pa}]
Kuljetus	0,230	0,000	0,000	0,240
varastointi	0,100	0,000	0,000	0,110
Jakelu ja annostelu	0,720	0,001	0,000	0,750
Yhteensä	1,050	0,001	0,000	1,100

Pyrolyysiöljyn jakelun päästöjen vaihteluväliksi asetetaan $\pm 20\%$, koska todellista vaihteluväliä ei tunneta. Jakelun päästöjen oletetaan olevan normaalijakautuneita tällä vaihteluvälillä (kuva 18).



Kuva 18. Normaalijakauma pyrolyysiöljyn jakelun päästöille.

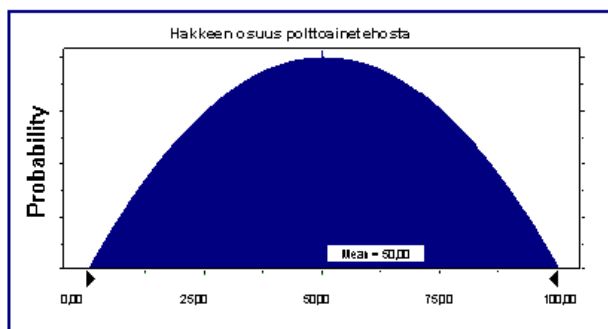
3.6 Muut parametrit

RES-direktiivin tulkintaohjeessa maankäytön muutoksella viitataan luokkamuutokseen jostain IPCC:n kuudesta maankäyttökategoriasta (metsämaa, ruohomaa, viljelymaa, kosteikko, asutus ja muu maa) tai seitsemänneistä kategoriasta, joka sisältää monivuotiset viljelykasvit ja viljelyplantaasit (2010/335/EU). Maankäytön muutoksella ei siis tarkoiteta muutosta maanhoito- tai maanmuokkaustavoissa. Tällöin biomassan tuotannosta tai korjuusta aiheutuvia muutoksia hiilivarannoissa ei tulisi laskea RES-direktiivissä annetulla kaavalla (2009/28/EY, liite V, C7). Koska tähteiden korjuun jälkeen hakkuuaukolle kasvaa uusi metsä vanhan tilalle, ei tilannetta ajatella maankäytön muutokseksi. Näin ollen maankäytön muutoksista johtuvia päästöjä ei katsota tässä tapauksessa syntyvän.

Pyrolyysiöljyn valmistuksen yhteydessä ei oteta talteen hiilidioksidia, jolloin ei saada hiilidioksidin talteenotosta seuraavaa päästövähennystä. Näin ollen tekijät e_{ccs} ja e_{ccr} yhtälössä (1) ovat nollia. Myös tekijä e_{sca} yhtälössä (1) on nolla, koska hakkuutähteistä valmistetun pyrolyysiöljyn tapauksessa ei synny paremmista maatalouskäytännöistä johtuvia maaperän hiilikertymiä.

Sähkön ja lämmön yhteistuotannosta saatavasta ylimääräisestä sähköstä ei saada vähennyksiä päästöissä, jos sähköä ei tuoteta viljelykasvien tähteistä (2009/28/EY, liite V, C16). Tässä tapauksessa ei ole kyseessä viljelykasvien tähteistä tuotettu sähkö, joten myös termi e_{ee} yhtälössä (1) on nolla. Käytössä olevasta polttoaineesta aiheutuvat päästöt katsotaan biopolttoaineiden ja bionesteiden osalta nollassa (2009/28/EY, liite V, C13). Tällöin yhtälön (1) termi e_u on myös nolla.

Herkkyystarkasteluun otetaan mukaan hakkeen osuus polttoainetehosta. Hakkeella ja turpeella on hyvin erilaiset päästöt, jonka vuoksi niiden suhteen muuttaminen vaikuttaa kattilan päästöihin. Oletusarvoisesti hake muodostaa 50 % polttoainetehosta ja turve loput. Herkkyystarkastelussa hakkeen osuus polttoainetehosta vaihtelee välillä 0–100 %. Osuuden oletetaan olevan beta-jakautunut (kuva 19).



Kuva 19. Beta-jakauma hakkeen osuudelle polttoainetehosta.

3.7 Päästövähennys

Fossiilisten polttoaineiden korvaamisesta biopolttoaineilla ja bionesteillä saatava suhteellinen päästövähennys lasketaan yhtälöllä (4) (2009/28/EY, liite V, C4).

$$\text{Päästövähennys} = \frac{E_F - E_B}{E_F}, \quad (4)$$

missä E_F = biopolttoaineesta tai bionesteestä aiheutuva kokonaispäästö

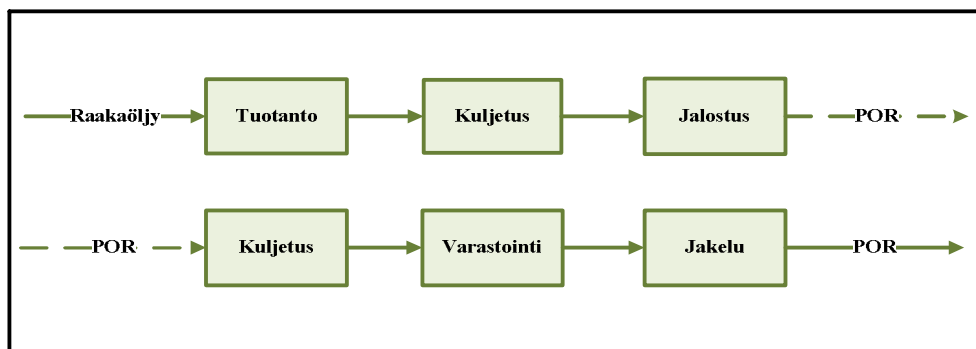
E_B = fossiilisesta vertailukohdasta aiheutuva kokonaispäästö

3.7.1 Fossiilisesta vertailukohdasta aiheutuva kokonaispäästö

Fossiiliseksi vertailukohdaksi valittiin raskaan polttoöljyn käyttö lämpökattilassa. RES-direktiivin mukaan lämmöntuotannossa käytettävän bionesteen fossiilisen vertailukohdan kokonaispäästönä tulee käyttää 77 gCO_{2ekv}/MJ riippumatta siitä, mistä fossiilisesta vertailukohdasta on kysymys (2009/28/EY, liite V, C19). Herkkyystarkastelua varten määritettiin myös raskaan polttoöljyn todellinen päästö.

Raskaan polttoöljyn tuotannosta aiheutuva päästö on 6,65 gCO₂/MJ (Edwards et al. 2007). Päästö koostuu raakaöljyn tuotannosta, kuljetuksesta jalostamolle, jalostuksesta raskaaksi polttoöljyksi sekä valmiin tuotteen varastoinnista, jakelusta ja kuljetuksista. Eurooppalaisissa jalostamoissa raakaöljyn energiasisällöstä noin 6 % kuluu jalostusprosessin energiana (Edwards et al. 2007, 15–16). Jalostamoissa tuotetaan useita lopputuotteita. Ensin raakaöljystä erottuu bensiini ja sitä kevyemmät jakeet, näiden jälkeen keskitisleet kuten diesel ja kevyt polttoöljy. Lopuksi erotetaan raskaammat jakeet, kuten raskas polttoöljy ja bitumi.

(Neste Oil Oyj 2006, 8.) Jalostusprosessin monimutkaisuuden ja useiden lopputuotteiden takia jalostusprosessin päästöjen kohdentaminen on haastavaa. Raskaan polttoöljyn tuotantoketju on esitetty kuvassa 20.

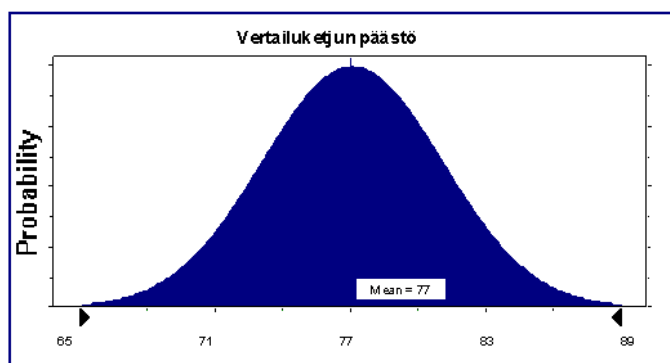


Kuva 20. Raskaan polttoöljyn tuotantoketju raakaöljystä valmiiksi tuotteeksi (muokattu lähteestä Edwards et al. 2007, 15).

Raskaan polttoöljyn kokonaispäästö saadaan kun raakaöljyn jalostuksen päästöön lisätään poltosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Hiilidioksidipäästöjen arviointi on helppoa, koska päästö ei riipu polttotekniikasta. Hiilidioksidipäästöt pystytään arvioimaan varsin tarkasti poltetun polttoainemäärän ja polttoainekohtaisen päästökertoimen avulla, koska lähes kaikki polttoaineen sisältämä hiili hapettuu poltossa. (Tsupari et al. 2007.) IPCC on arvioinut, että kaupallisilla polttoaineilla päästökertoimeen sisältyy alle 5 % epävarmuus (IPCC 2000, 15). Hiilidioksidipäästöjä laskettaessa käytetään Tilastokeskuksen polttoaineluokituksessa annettua CO₂ -oletuspäästökertointa raskaalle polttoöljylle, joka on 78,7 g/MJ (Tilastokeskus 2010a). Päästökerroin on sama riippumatta raskaan polttoöljyn rikkipitoisuudesta. Tilastokeskuksen polttoaineluokitusta käytetään yleisesti kasvihuonekaasuinventarioiden laadinnassa ja päästökauppaan liittyvissä päästöjen tarkkailuissa. (Tilastokeskus 2010a.) Polttoaineen palamisessa hapettumatta jäävä hiili huomioidaan käyttämällä polttoainekohtaista hapettumiskerrointa. Raskaan polttoöljyn hapetuskerroimenä tässä työssä käytetään kansallisessa inventaarioraportissa käytettyä hapetuskerrointa, joka on raskaalle polttoöljylle 0,995 (Tilastokeskus 2010b, 69). Hiilidioksidipäästöjen laskenta noudattaa siten Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2003/87/EY esitettyä laskentatapaa, jonka mukaan päästöt lasketaan kertomalla toimintatiedot päästökertoimella ja hapettumiskertoimella. Raskaan polttoöljyn poltossa vapautuu hiilidioksidin lisäksi metaania ja typpioksiduulia. RES-direktiivissä vertailuketjun kokonaispäästöjä laskettaessa on jätetty huo-

mioimatta CH₄- ja N₂O-päästöt, koska käytössä olevan biopolttoaineenkin kasvihuonekaasupäästöt oletetaan nolaksi. Koska todisteita siitä, että pyrolyysiöljyn päästöt poikkeaisivat CH₄- ja N₂O-päästöjen osalta merkittävästi raskaan polttoöljyn päästöistä ei ole, jätetään sekä biopolttoaineen että vertailuketjun osalta metaani- ja typpioksiduulipäästöt huomioimatta.

Päästövähennystä laskettaessa fossiilisen vertailukohdan kokonaispäästön oletusarvona käytetään RES-direktiivin arvoa. Herkkyystarkastelussa ylärajana on Edwards et al. (2007) laskema raskaan polttoöljyn tuotannon päästö, johon on lisätty poltosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Tämä päästö on yhteensä noin 85 gCO_{2ekv}/MJ. Vertailuketjun alarajana käytetään 69 gCO_{2ekv}/MJ, joka on kymmenen prosenttia oletusarvoa pienempi. Tämä arvo on valittu käytettäväksi herkkyystarkastelussa, koska päästöjen todellista vaihteluväliä ei tunneta. Vertailuketjun päästön oletetaan olevan normaalijakautunut (kuva 21).



Kuva 21. Normaalijakauma vertailuketjun päästöille.

4 TULOKSET

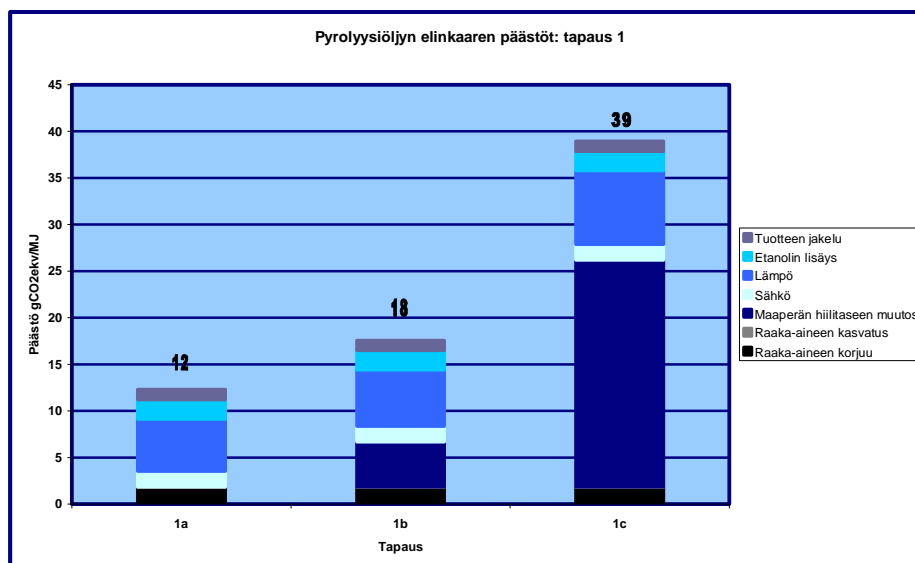
Ensimmäisenä esitetään oletusarvoilla lasketut pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt tapauksille 1 ja 2. Näiden oletusarvojen pohjalta on myös laskettu päästövähennys käyttäen vertailuketjun kokonaispäästönä RES-direktiivin oletusarvoa $77 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$. Tulosten yhteydessä kirjaimet a, b ja c viittaavat maaperän hiilitaseen tarkasteluajanjaksoon. Tapauksessa a ei ole lainkaan huomioitu maaperän hiilitaseen muutosta. Tapauksessa b maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvaa päästöä on tarkasteltu 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa c 20 vuoden ajanjaksolla. Oletusarvoilla laskettujen tulosten jälkeen esitellään herkkyystarkastelun tulokset.

Tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) pyrolyysiöljylle kohdentuu noin 51 % päästöistä. Loput päästöistä kohdentuvat hiiltojäännöksen ja sivutuotekaasun mukana kattilaan. Kattilan päästöistä noin 6 % kohdentuu lämmön mukana pyrolysaattorille. Tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) pyrolyysiöljylle kohdentuu noin 23 % päästöistä, loput kohdentuvat sähkölle ja lämmölle. Liitteessä II on esitetty iteroinnin tuloksena saatu päästötase pyrolysaattorille ja kattilalle tapauksissa 1 a, b ja c. Liitteeseen III on taulukoitu oletusarvoilla lasketut tulokset molemmille tapauksille.

4.1 Oletusarvoilla saadut tulokset

4.1.1 Tapaus 1: Pyrolysaattori ja kattila erillisinä yksiköinä tarkasteltuna

Tapauksessa 1 pyrolysaattori ja kattila oletettiin erillisiksi yksiköiksi. Tapauksessa 1a ei huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä, tapauksessa 1b päästöt huomioitiin 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa 1c 20 vuoden ajanjaksolla. Pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt ovat tapauksessa 1c huomattavasti tapauksia 1a ja 1b suuremmat (kuva 22). Suuri ero päästöjen välillä johtuu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvien päästöjen laskennassa käytettävästä ajanjaksosta. Tapauksessa 1c tarkasteluajanjaksona oli 20 vuotta, jolloin päästöt ovat suuremmat kuin tarkasteltaessa samoja päästöjä 100 vuoden ajanjaksolla tapauksessa 1b. Jos maaperän hiilitaseen muutoksesta johtuvia päästöjä ei huomioida ollenkaan, ovat päästöt alhaisemmat, mutta ero tapauksien 1a ja 1b välillä on kuitenkin pieni.

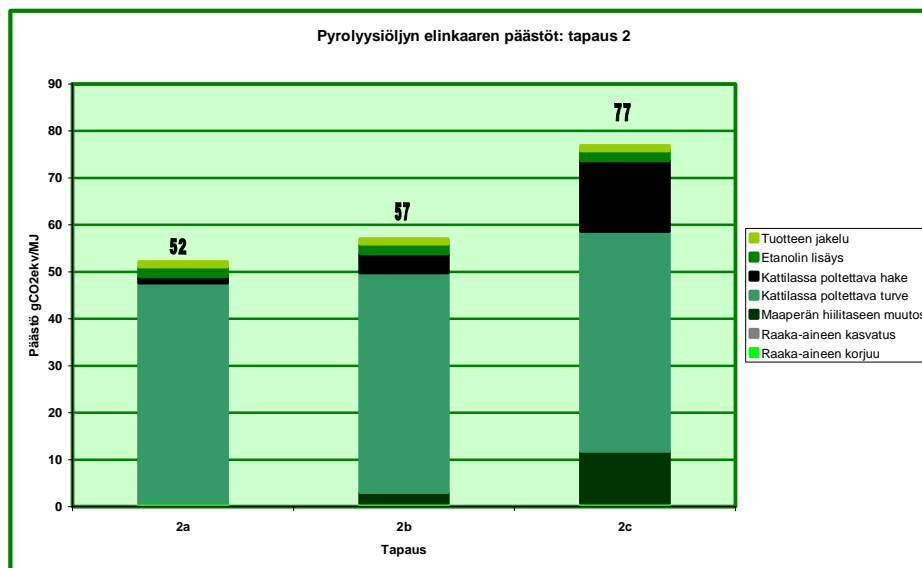


Kuva 22. Pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt oletusarvoilla laskettuna tapaukselle 1: Pyrolysaattori ja kattila erikseen. Tapauksessa a ei ole huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä, tapauksessa b hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt on huomioitu 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa c 20 vuoden ajanjaksolla.

Raaka-aineen kasvatuksen päästöt eli metsän kasvatuksesta hakkuutähteelle kohdentuvien päästöjen osuus on niin pieni, ettei se erotu kuvan 22 palkeista lainkaan. Sähköllä, tuotteen jakelulla ja raaka-aineen korjuulla ei näyttäisi olevan suurta vaikutusta päästöihin. Hallitsevat tekijät ovat maaperän hiilitaseen muutoksen ja prosessin tarvitseman lämmön tuotannon päästöt. Kuvassa 22 näkyvä maaperän hiilitaseen muutos aiheutuu raaka-aineen korjuusta. Kattilassa poltettavan hakkeen korjuun aiheuttama maaperän hiilitaseen muutos on huomioitu osana lämmön päästöjä.

4.1.2 Tapaus 2: Pyrolysaattori ja kattila yhtenä yksikkönä tarkasteltuna

Tapauksessa 2 pyrolysaattori ja kattila oletettiin yhdeksi yksiköksi. Kuten tapauksessa 1a, maaperän hiilitaseen muutos jätettiin tapauksessa 2a huomioimatta. Tapauksessa 2b päästöä tarkasteltiin 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa 2c 20 vuoden ajanjaksolla. Kuvassa 23 on esitetty elinkaaren päästöt tapaukselle 2.

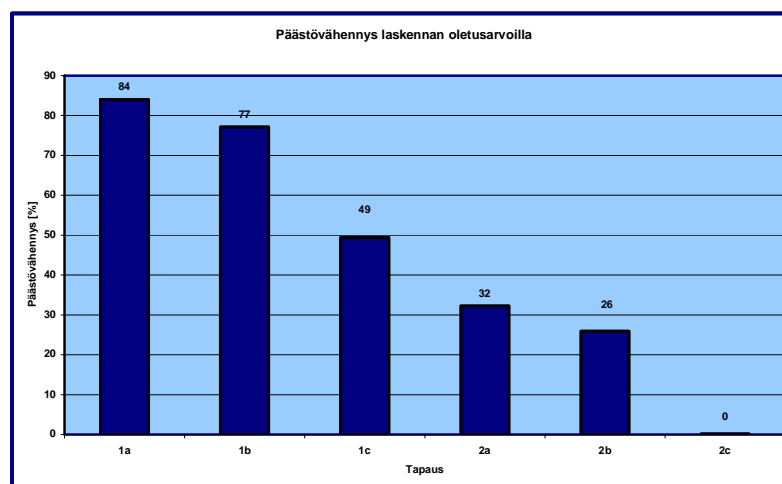


Kuva 23. Pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt oletusarvoilla laskettuna tapaukselle 2: Pyrolysaattori ja kattila yhdessä. Tapauksessa a ei ole huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä, tapauksessa b hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt on huomioitu 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa c 20 vuoden ajanjaksolla.

Tapauksessa 2 päästöt ovat huomattavasti tapaukselta 1 suuremmat. Näin siksi, että suurempi osuus kattilassa poltettavan turpeen päästöistä kohdentuu pyrolyysiöljylle kuin tapauksessa 1. Tämä johtuu siitä, että pyrolysaattori ja kattila ajatellaan yhdeksi yksiköksi, jolloin kattilan ja pyrolysaattorin välisiä virtoja ei eroteta. Tapauksessa 1 kattilan päästöistä kohdentui noin 6 % lämmön mukana pyrolyysiöljylle, hiiltojäännökselle ja sivutuotekaasulle, kun taas tapauksessa 2 kaikki kattilan päästöt kohdentuvat pyrolyysiöljylle, kaukolämmölle ja sähkölle. Suurin osa pyrolyysiöljyn päästöistä koostuu tapauksessa 2 kattilassa poltettavan turpeen päästöistä. Muiden tekijöiden merkitys on pieni suhteessa turpeen aiheuttamiin päästöihin. Raaka-aineen korjuun, metsän kasvatuksen ja maaperän hiilitaseen muutoksen aiheuttamat päästöt ovat noin puolet pienemmät kuin tapauksessa 1. Tämä johtuu siitä, että pienempi osuus raaka-aineen päästöistä kohdentuu pyrolyysiöljylle silloin, kun kattila ja pyrolysaattori oletetaan yhdeksi yksiköksi. Kuvassa 23 näkyvä maaperän hiilitaseen muutos aiheutuu raaka-aineen korjuusta. Kattilassa poltettavan hakkeen aiheuttama maaperän hiilitaseen muutos on huomioitu osana kattilassa poltettavan hakkeen päästöjä.

4.1.3 Päästövähennys

Kuvassa 24 on esitetty päästövähennys tapauksille 1 ja 2, kun vertailuketjun päästönä käytetään RES-direktiivin oletusarvoa $77 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$.



Kuva 24. Oletusarvoilla laskettu päästövähennys tapauksille 1 (pyrolysaattori ja kattila erillään) ja 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä). Tapauksissa a ei ole huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä, tapauksissa b hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt on huomioitu 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksissa c 20 vuoden ajanjaksolla.

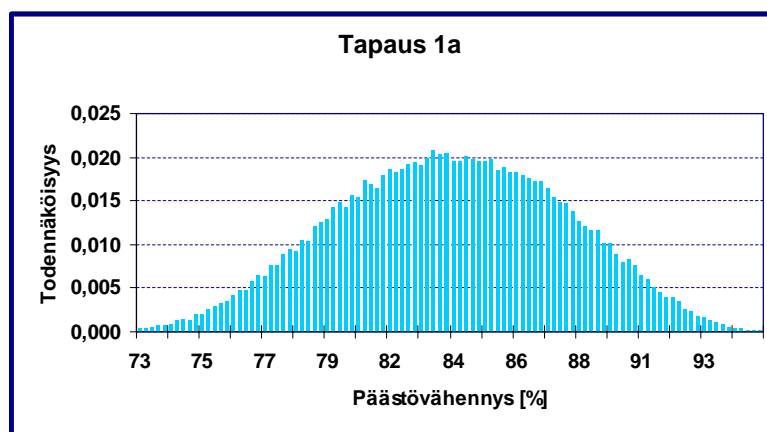
Tapauksessa 1 saavutetaan kaikissa alatapauksissa a, b ja c yli 35 % päästövähennys, mutta tapauksessa 2 ei tähän RES-direktiivin minimivaatimukseen päästä ollenkaan. Ero päästövähennysten suuruudessa johtuu siitä tarkastellaanko pyrolysaattoria ja kattilaa erillisinä yksiköinä (tapaus 1) vai kokonaisuutena (tapaus 2). Jos hakkeen osuutta kattilassa nostetaan, pienenevät elinkaaren päästöt sitä mukaa kun hakkeen osuus kasvaa. Jos kattilan polttoaineena käytettäisiin pelkkää haketta, päästäisiin tapauksessa 2 lähes samansuuruisiin päästöihin kuin tapauksessa 1. Taserajauksen asettamisella on suuri merkitys tuloksiin ainoastaan silloin, kun kattilassa poltetaan fossiilisia polttoaineita. Jos maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä tarkastellaan 20 vuoden ajanjaksolla, ovat tapauksen 2 päästöt yhtä suuret kuin fossiilisen vertailukohtaan. Vuodesta 2018 eteenpäin vaadittavan 60 % päästövähennyksen saavuttaminen ei näytä todennäköiseltä tapauksessa 1 silloin, kun maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt huomioidaan 20 vuoden ajanjaksolla. Tapauksissa 1 a ja b päästövähennys ylittää 60 %.

4.2 Herkkyystarkastelun tulokset

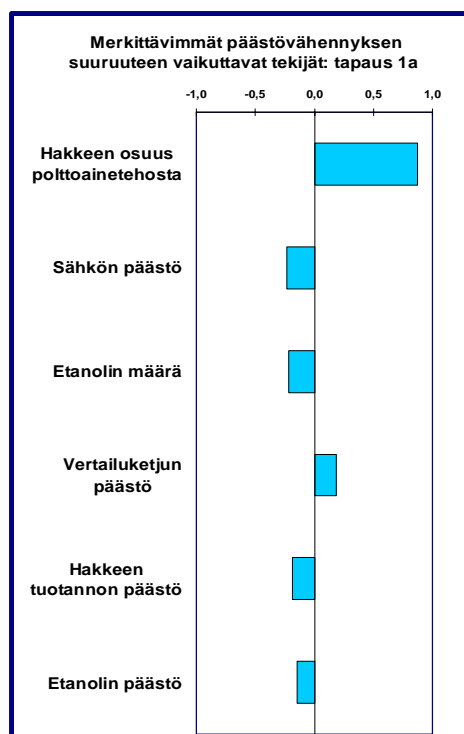
Herkkyystarkastelun tuloksissa esitetään todennäköisyysjakauma päästövähennyksen suuruudelle sekä järjestyskorrelaatio (rank correlation), jossa on esitetty kuusi merkittävintä päästövähennyksen suuruuteen vaikuttavaa parametria. Mitä suurempi positiivinen korrelaatio parametrilla on, sitä enemmän päästövähennys kasvaa parametrin arvon kasvaessa. Vastaavasti mitä suurempi negatiivinen korrelaatio, sitä enemmän parametrin arvon kasvaminen pienentää päästövähennystä.

4.2.1 Tapaus 1: Pyrolysaattori ja kattila erillisinä yksiköinä tarkasteltuna

Tapauksessa 1a (kuva 25) päästövähennys on erittäin todennäköisesti yli RES-direktiivin vaatiman 35 %. Myös vuodesta 2018 eteenpäin vaadittavan 60 % päästövähennyksen saavuttaminen on erittäin todennäköistä, kun pyrolyysiöljyllä korvataan raskasta polttoöljyä lämmöntuotannossa. Järjestyskorrelaation kuvaajasta (kuva 26) nähdään, että suurin vaikutus päästövähennyksen suuruuteen on hakkeen osuudella. Mitä enemmän haketta on kattilan polttoaineena, sitä suurempi päästövähennys saavutetaan. Kattilan polttoaine onkin merkittävin yksittäinen päästövähennyksen suuruuteen vaikuttava tekijä tapauksessa 1a. Muiden parametrien vaikutus lopputulokseen on kattilan polttoaineeseen verrattuna merkityksetön.

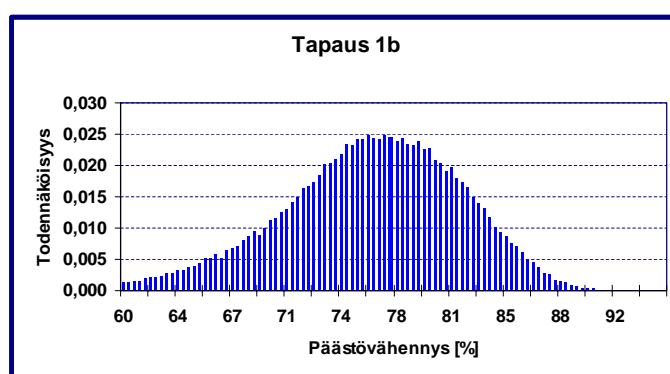


Kuva 25. Todennäköisyysjakauma päästövähennykselle tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä ei huomioida.

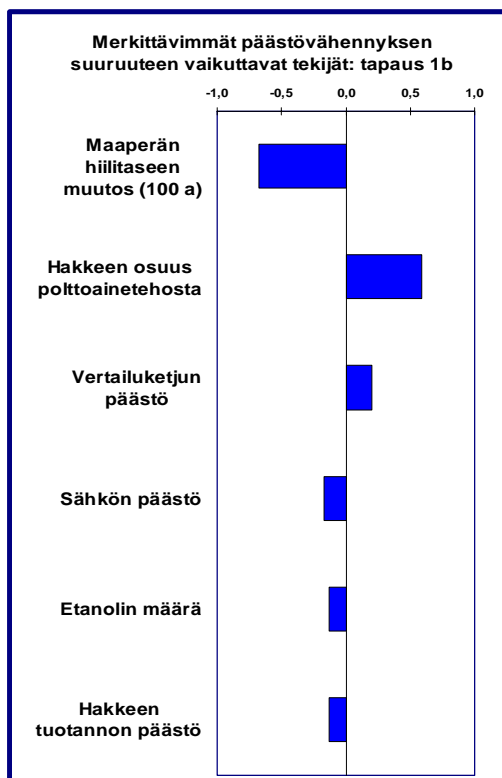


Kuva 26. Merkittävimmät päästövähennyksen suuruuteen vaikuttavat tekijät tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä ei huomioida.

Kuvassa 27 on esitetty päästövähennysjakauma tapaukselle 1 silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 100 vuoden ajanjaksolla. Tapauksessa 1b 60 % päästövähennysvaatimuksen saavuttaminen näyttää olevan hyvin mahdollista. Kuten myös tapauksessa 1a, kuvasta 28 nähdään, että kattilaan syötetyllä polttoaineella on suuri vaikutus päästövähennyksen määrään. Merkittävin tekijä tapauksessa 1b on kuitenkin maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö. Muiden parametrien kuten etanolin päästön vaikutus on pieni maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvaan päästöön verrattuna.

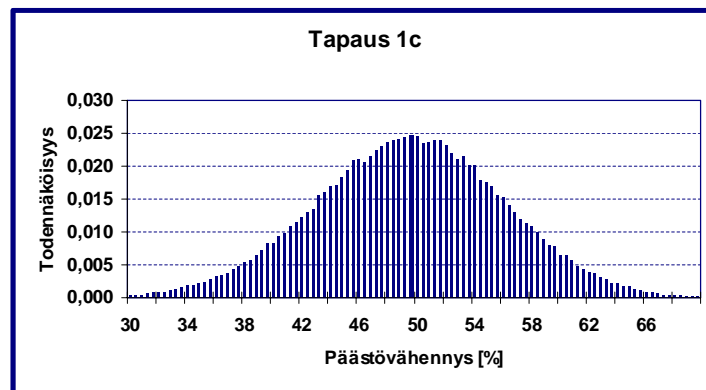


Kuva 27. Todennäköisyysjakauma päästövähennykselle tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 100 vuoden ajanjaksolla.

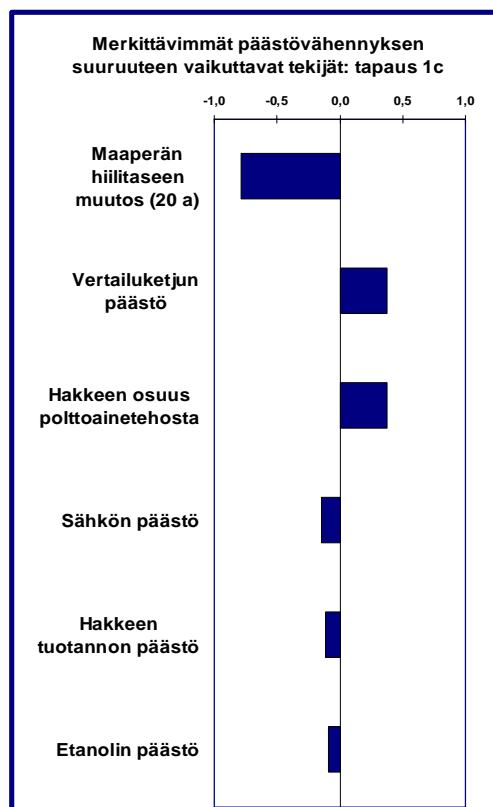


Kuva 28. Merkittävimmät päästövähennyksen suuruuteen vaikuttavat tekijät tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 100 vuoden ajanjaksolla.

Kuvassa 29 on esitetty todennäköisyysjakauma tapauksen 1c päästövähennykselle. 35 % päästövähennyksen saavuttaminen on mahdollista, mutta RES-direktiivin vuonna 2018 vaatiman 60 % päästövähennyksen saavuttaminen ei näytä kovin todennäköiseltä. Tapauksessa 1c saavutettavat päästövähennykset ovat vaatimattomampia kuin tapauksessa 1b. Suurin syy päästövähennyksen pienenemiselle on maaperän hiilitaseen tarkasteluajanjakson muuttaminen 100 vuodesta 20 vuoteen. Järjestyskorrelaatiosta (kuva 30) nähdään, että juuri maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö on merkittävin päästövähennyksen suuruuteen vaikuttava tekijä tapauksessa 1c. Myös kattilaan syötetyn hakkeen osuudella kattilan polttoainetehosta ja vertailuketjun päästöarvolla on selvästi vaikutusta päästövähennyksen suuruuteen. Muiden parametrien vaikutus on näihin kolmeen tekijään nähden huomattavasti pienempi.



Kuva 29. Todennäköisyysjakauma päästövähennykselle tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 20 vuoden ajanjaksolla.

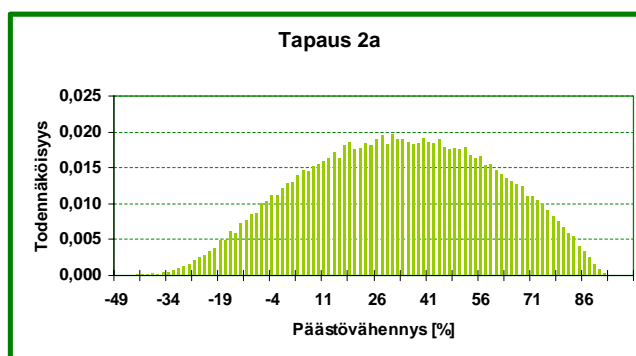


Kuva 30. Merkittävimmät päästövähennyksen suuruuteen vaikuttavat tekijät tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 20 vuoden ajanjaksolla.

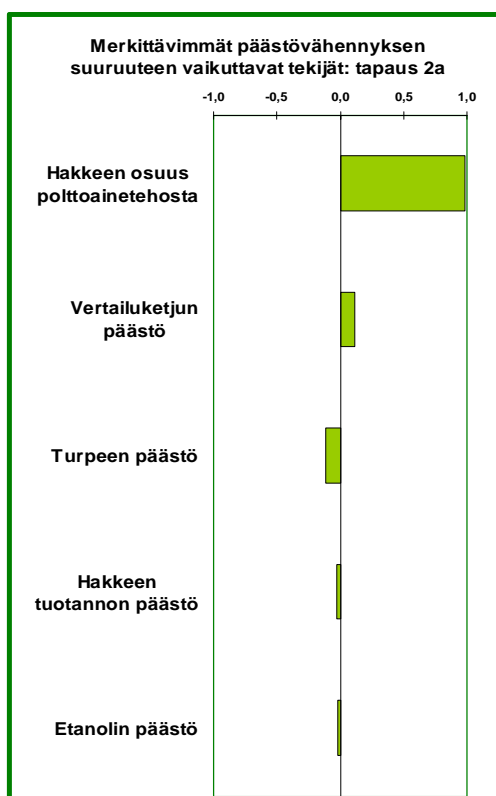
4.2.2 Tapaus 2: Pyrolysaattori ja kattila yhtenä yksikkönä tarkasteltuna

Tapauksessa 2a (kuva 31) päästövähennys on huomattavasti pienempi kuin tapauksessa 1a, vaikka kummassakaan tapauksessa maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä ei ole huomioitu. RES-direktiivin päästövähennystavoitteiden saavuttaminen voi olla mah-

dollista, mutta samalla on mahdollisuus, että pyrolyysiöljyn päästöt ovatkin fossiilista vertailukohtaa suuremmat. Kuten järjestyskorrelaatiosta (kuva 32) nähdään, on muilla parametreilla kuin kattilaan syötettävän hakkeen osuudella hyvin pieni vaikutus päästövähennyksen suuruuteen. Silloin kun pyrolysaattori ja kattila oletetaan kokonaisuudeksi, on kattilaan syötettävä polttoaine merkittävin päästövähennyksen suuruuteen vaikuttava tekijä.

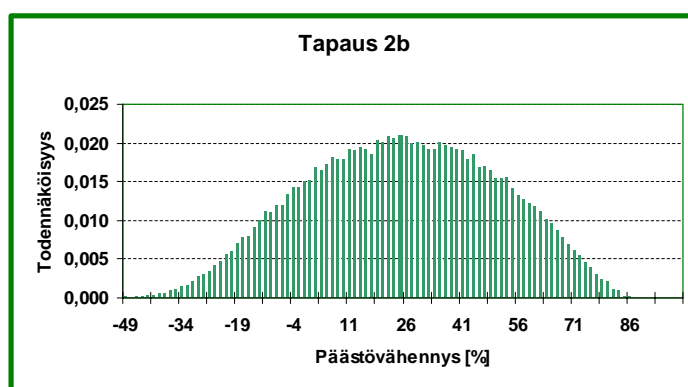


Kuva 31. Todennäköisyysjakauma päästövähennykselle tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä ei huomioida.

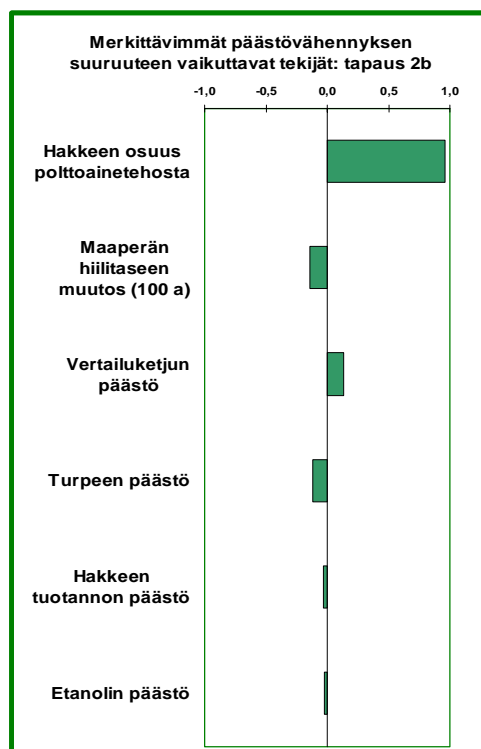


Kuva 32. Merkittävimmät päästövähennyksen suuruuteen vaikuttavat tekijät tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä ei huomioida.

Tapauksessa 2b maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö huomioitiin 100 vuoden tarkasteluajanjaksolla (kuva 33). 35 % päästövähennyksen saavuttaminen on huomattavasti epätodennäköisempää kuin tapauksessa 1b. Tapauksessa 2b on mahdollista, että pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt ovat fossiilista vertailukohtaa suuremmat. Kuvasta 34 nähdään, että myös tapauksessa 2b suurin päästövähennyksen vaikuttava tekijä on kattilan polttoaine. Tämän jälkeen maaperän hiilitaseen muutoksella, vertailuketjun päästöllä ja turpeen päästöllä on keskenään lähes yhtä suuri vaikutus päästövähennyksen suuruuteen.

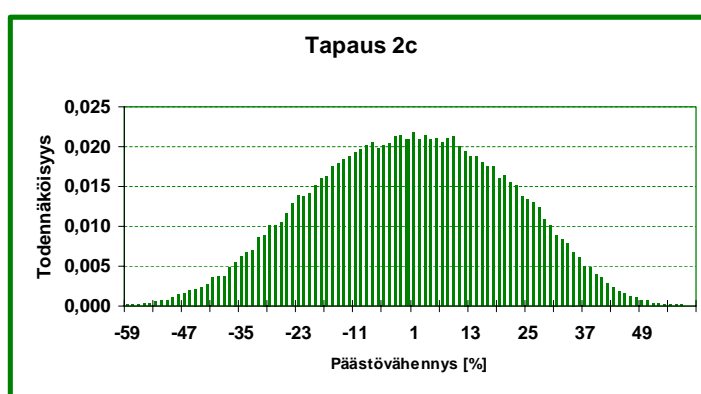


Kuva 33. Todennäköisyysjakauma päästövähennykselle tapauksessa 2 silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 100 vuoden ajanjaksolla.

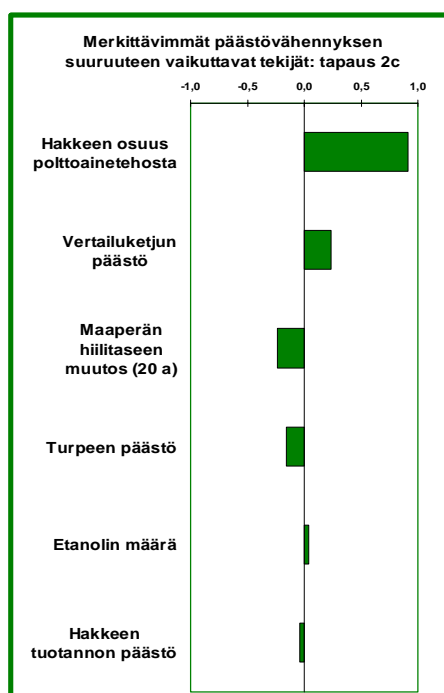


Kuva 34. Merkittävimmät päästövähennyksen suuruuteen vaikuttavat tekijät tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 100 vuoden ajanjaksolla.

Kun huomioon otetaan maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö 20 vuoden ajanjaksolla, pienenee tapauksessa 2 saavutettava päästövähennys entisestään (kuva 35). 35 % päästövähennysvaatimuksen saavuttaminen on jo hyvinkin epätodennäköistä. Tapauksessa 2c päästöt voivat olla huomattavasti fossiilista vertailukohtaa suuremmat. Päästövähennyksen suuruuteen vaikuttaa ennen kaikkea kattilassa poltettavan hakkeen osuus polttoainetehosta (kuva 36). Maaperän hiilitaseen muutoksesta johtuvan päästön huomioiminen 20 vuoden ajanjaksolla 100 vuoden sijasta pienentää päästövähennystä entisestään verrattuna tapaukseen 2b.



Kuva 35. Todennäköisyysjakauma päästövähennykselle tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 20 vuoden ajanjaksolla.



Kuva 36. Merkittävimmät päästövähennyksen suuruuteen vaikuttavat tekijät tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) silloin, kun maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan 20 vuoden ajanjaksolla.

Taulukkoon 8 on laskettu herkkyytarkastelun tulosten perusteella todennäköisyydet saavuttaa RES-direktiivissä annetut kasvihuonekaasujen päästövähennysvaatimukset kaikissa tarkastelluissa tapauksissa. Jokaisen tapauksen kohdalla annettu prosenttiluku kuvaa todennäköisyyttä, jolla päästövähennys on vähintään ensimmäisessä sarakkeessa annetun päästövähennysvaatimuksen suuruinen. Vuodesta 2017 alkaen päästövähennys tulee olla 50 % ja vuonna 2017 tai sen jälkeen käytössä olevissa laitoksissa vuodesta 2018 eteenpäin 60 % (2009/28/EY, artikla 17(1,2)).

Taulukko 8. Todennäköisyys saavuttaa RES-direktiivin päästövähennysvaatimukset tapauksissa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) ja 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä). Tapauksessa a ei ole huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä, tapauksessa b maaperän hiilitaseen muutos on huomioitu 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa c 20 vuoden ajanjaksolla.

RES	1a [%]	1b [%]	1c [%]	2a [%]	2b [%]	2c [%]
35 %	100	100	99	48	38	4
50 %	100	100	51	30	19	0
60 %	100	98	6	18	10	0

Kun kattila ja pyrolysaattori oletetaan erillisiksi yksiköiksi, on päästövähennysvaatimusten saavuttaminen huomattavasti todennäköisempää kuin tapauksessa 2, jossa kattila ja pyrolysaattori oletetaan yhdeksi yksiköksi. Taulukosta 8 nähdään myös, että maaperän hiilitaseen muutoksen tarkasteleminen lyhyemmällä ajanjaksolla pienentää mahdollisuuksia saavuttaa vaaditut päästövähennykset. Taulukossa 9 on esitetty vastaavat luvut tilanteelle, jossa kattilassa poltetaan ainoastaan haketta ja tilanteelle, jossa kattilan polttoaineena on ainoastaan hake eikä etanolia lisätä laisinkaan lopputuotteeseen. Jälkimmäiset luvut on esitetty su- luissa.

Taulukko 9. Todennäköisyys saavuttaa RES-direktiivin päästövähennysvaatimukset tapauksille 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) ja 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) silloin kun kattilassa poltetaan pelkästään haketta. Suluissa olevat arvot kuvaavat tilannetta, jossa kattilassa poltetaan pelkästään haketta eikä pyrolyysiöljyyn lisätä etanolia. Tapauksessa a ei ole huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä, tapauksessa b maaperän hiilitaseen muutos on huomioitu 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa c 20 vuoden ajanjaksolla.

RES	1a [%]	1b [%]	1c [%]	2a [%]	2b [%]	2c [%]
35 %	100 (100)	100 (100)	100 (100)	100 (100)	100 (100)	79 (78)
50 %	100 (100)	100 (100)	76 (78)	100 (100)	100 (100)	16 (17)
60 %	100 (100)	100 (100)	19 (23)	100 (100)	100 (100)	1 (1)

Pelkän hakkeen polttaminen kattilassa kasvattaa päästövähennystä verrattuna tilanteeseen, jossa kattilassa poltetaan myös fossiilista polttoainetta. Jos etanolia ei lisätä, kasva päästövähennys muutaman prosenttiyksikön tapauksessa 1. Tapauksessa 2 vaikutus ei ole niin selvä. Tapauksessa 2c näyttäisi, että etanolin lisäämättä jättäminen jopa kasvattaa päästöjä. Näin ei kuitenkaan ole, vaan ainoastaan valitun esitystarkkuuden puitteissa arvo pyöristyy pienemmäksi. Vaikka kattilassa ei polteta fossiilisia polttoaineita, on tapauksessa 2c todennäköisyydet päästövähennystavoitteiden saavuttamiselle pienemmät kuin tapauksessa 1c. Suuri ero todennäköisyyksissä johtuu siitä, että tarkasteltaessa maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä 20 vuoden ajanjaksolla, on hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö niin suuri, että pyrolysaattorin ja kattilan tarkastelutavan aiheutuva ero tuloksiin ei enää kompensoidu kuten tapauksissa a ja b. Maaperän hiilitaseen muutos kasvattaa siis päästöjä tapauksessa 2c verrattuna tapaukseen 1c samalla tavalla kuin fossiilisten polttoaineiden käyttö aiheuttaa eron tapauksien 1 ja 2 tulosten välille.

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Yleistä elinkaariarviointien epävarmuuksista

Elinkaariarvioinnissa käsitellään potentiaalisia ympäristövaikutuksia, eikä siitä saatuja tuloksia voida pitää ennusteina todellisista tai tarkoista ympäristövaikutuksista. Syynä tähän on se, että potentiaaliset ympäristövaikutukset on suhteutettu vertailuyksikköön ja laskennassa on käytetty tietoja eri paikoista ja ajoilta. Näistä syistä johtuen epävarmuus on luontaista elinkaariarvioinnille. (SFS-EN ISO 14040:2006, 25.) Epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä on useita ja ne voidaan jakaa esimerkiksi menetelmä- ja parametripävarmuuksiin. Menetelmään liittyvät epävarmuudet toistuvat eri elinkaarianalyyseissä. Osa menetelmäepävarmuuksista on ominaisia nykyisen kaltaiselle LCA:lle eikä niiden välttämiseksi ole kehitetty ratkaisua. Ross et al. (2002) mukaan epävarmuutta aiheutuu mm. valituista menetelmistä, kuten tarkastelurajauksen asettelusta, kohdentamisperiaatteen ja vertailutilanteen valinnasta sekä yksittäisistä parametripävarmuuksista. Yleistä elinkaarianalyyseille on lähtötietojen huono laatu, epäsopivat tai läpinäkymättömät oletukset, tapauskohtaisen tiedon puute ja herkkyysanalyysin puuttuminen. (Ross et al. 2002.) Elinkaariarviointien luotettavuuden ja vertailtavuuden takia on erityisen tärkeää, että selvitykset on raportoitu läpinäkyvästi eli tieto on esitetty avoimesti, perusteellisesti ja ymmärrettävästi (SFS-EN ISO 14044, 50).

5.2 Laskennassa tehdyt oletukset

Laskennassa tehtyjen oletusten ja valintojen vaikutusta elinkaariarvioinnin tuloksiin arvioidaan seuraavissa kappaleissa. Parametrien valintaan ja niille käytettyihin arvoihin liittyvät epävarmuudet tulevat huomioiduksi jo herkkyystarkastelussa, mutta tässä osiossa niitä käsitellään kuitenkin RES-direktiivin näkökulmasta. Direktiivi ei nimittäin määrittele tarkasti mitkä parametrit laskennassa tulee huomioida ja kuinka parametrit tulisi määrittää.

5.2.1 GWP-kertoimet

Vaikka GWP-kertoimet ilmoitetaan tyypillisesti yksittäisinä lukuina, on niillä kuitenkin noin ± 35 % epävarmuus, joka ei sisällä referenssikaasuun liittyviä epävarmuuksia. GWP-kertoimia on päivitetty sitä mukaa kun tieto kasvihuonekaasujen ominaislämmitysvaikutuksista, eliniästä ilmakehässä ja hiilen kierrosta on tarkentunut (IPCC 1996, 22–23). Siitä huolimatta kertoimiin sisältyvä epävarmuus on suuri. Lähes poikkeuksetta elinkaariarvioinneissa on jätetty huomioimatta GWP-kertoimiin liittyvät epävarmuudet, näin tehtiin myös tässä työssä. Pyrolyysiöljyn elinkaaren aikana syntyvien metaani- ja typpioksiduulipäästöjen määrät ovat kuitenkin niin vähäiset, ettei epävarmuuden huomiotta jättämisellä kuitenkaan ole muihin epävarmuuksiin nähden merkittävää vaikutusta lopputuloksiin.

5.2.2 Tarkasteluajanjakson valinta

RES-direktiivin laskentaohjeessa hiilidioksidiekvivalentin laskemiseen tarvittavat GWP-kertoimet on annettu 100 vuoden tarkasteluajanjaksolle. Tätä tarkasteluajanjaksoa käytetään esimerkiksi raportoitaessa kasvihuonekaasupäästöjä YK:n ilmastosopimukselle (UNFCCC 2006, 7–8). Tarkasteluajanjakson valinta on suoraan yhteydessä siihen, millä ajanjaksolla kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutusta halutaan tarkastella. Kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutuksen suuruuteen valitulla ajanjaksolla vaikuttaa kaasujen ominaislämmityskapasiteetti ja niiden elinikä ilmakehässä. Metaani on lyhytikäinen (noin 12a) ja typpioksiduuli huomattavasti pitkäikäisempi (noin 114a) (Ilmatieteenlaitos 2010). Pidempää tarkasteluajanjaksoa käytettäessä lyhyemmän aikavälin lämmitysvaikutukset eivät kuvaudu oikein. Etenkin suhteellisen hitaasti tapahtuvien maaperän hiilitaseen muutoksien aiheuttamien päästöjen tarkastelussa ajanjaksolla on huomattava merkitys. Kuten tuloksista nähdään, kasvaa päästövähennys huomattavasti kun tarkasteluajanjakso muutetaan 100 vuodesta 20 vuoteen. Yhtenäisyyden vuoksi maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä voisi olla soveltuva tarkastella samalla ajanjaksolla kuin muitakin kasvihuonekaasupäästöjä. Toisaalta seuraavien 20 vuoden aikana tarvitaan jo merkittäviä päästövähennyksiä, jotta maapallon keskilämpötilan nousu saataisiin rajoitettua kahteen asteeseen. Tämä vuorostaan puoltaa lyhyemmän tarkasteluajanjakson käyttöä määritettäessä maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä. RES-direktiivissä on käytetty 20 vuoden ajanjaksoa maankäytön muutoksista johtuvien hiilidioksidipäästöjen arvioimiseksi, joten

vastaava ajanjakso voisi olla yhdenmukaista valita myös biomassan korjuusta aiheutuville maaperän hiilivaraston muutoksille.

5.2.3 Hakkeen varastointi

Hakkeen varastoinnista aiheutuvat päästöt jätettiin huomioimatta, koska hakkeen varastointitarvetta ja -aikaa ei tunneta eikä varastoinnista aiheutuvien päästöjen suuruudesta ole saatavilla monipuolista tietoa. Wihersaari (2005a) toteaa artikkelissaan, että varastoinnista aiheutuvien päästöjen arvioiminen on hankalaa, koska varastointiolosuhteet ja päästöihin vaikuttavat parametrit vaihtelevat suuresti. Hän arvioi kuuden kuukauden varastoinnin aikana aiheutuvan $16\text{--}32 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}_{\text{hake}}$ kasvihuonekaasupäästöjä. Tämä määrä on noin 7-14 kertaa suurempi verrattuna hakkeen tuotannosta aiheutuviin päästöihin. Jos varastoinnista aiheutuvat päästöt huomioitaisiin, kasvaisivat pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt huomattavasti. Jotta varastoinnin päästöjen vaikutus elinkaaren päästöihin voitaisiin määrittää luotettavasti, tarvittaisiin lisätietoa niin hakkeen varastoinnin päästöistä kuin myös varastointitarpeesta ja -olosuhteista. Toisaalta samat päästöt olisivat todennäköisesti syntyneet myös silloin, kun hakkuutähteet olisi jätetty palstalle. Jos hakkuutähteiden korjuun referenssitilana pidetään tähteiden jättämistä palstalle, kuten tässä työssä, ei ole järkevää huomioida sellaisia päästöjä, jotka olisivat syntyneet joka tapauksessa korjattiin tähteet tai ei.

5.2.4 Kattilaan liittyvät valinnat

Kattilan metaani- ja typpioksiduulipäästöille käytettiin yhteistä päästökerrointa, vaikka kattilassa poltetaan 2 eri polttoainetta. Puun osuuden kasvattaminen saattaa pienentää N_2O -päästöjä, koska turpeen tiedetään aiheuttavan enemmän typpioksiduulipäästöjä kuin hake. Yhteisen päästökertoimen käyttäminen ei kuitenkaan aiheuta merkittävää virhettä tuloksiin, koska hakkeen ja turpeen suhteiden vaihtelu ei muuta päästökerrointa merkittävästi.

Laskennassa ei huomioitu kattilan häiriötilanteita eikä käynnistyspolttimien käytöstä aiheutuvia päästöjä. Jos nämä päästöt huomioitaisiin, kohdentuisivat päästöt sivutuotteille samassa suhteessa kuin normaalitilanteessakin. Kattilan käynnistyspolttoaineena olisi luultavasti polttoöljy tai maakaasu, joiden päästöt ovat suuruudeltaan turpeen ja hakkeen päästöjen välissä. Herkkyystarkastelu huomioi tilanteen, jossa joudutaan käyttämään ylimääräisiä

polttoaineita. Käynnistyspolttoaineista aiheutuvat päästöt sisältyvät siis kattilan päästöjen vaihteluväliin. Koska käynnistyspolttimista ja häiriötilanteista aiheutuvia ylimääräisiä kasvihuonekaasupäästöjä syntyy normaaliajon päästöihin nähden vähän, ei niiden erikseen huomioimisella olisi merkittävää vaikutusta pyrolyysiöljyn keskimääräiseen päästöön.

Herkkyystarkastelun suorittamista varten tapauksen 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) laskentaa jouduttiin yksinkertaistamaan. Laskennassa jätettiin herkkyystarkastelussa huomiotta päästöjen kiertämisestä syntyvä silmukka. Liitteessä III esitetyistä tuloksista kuitenkin nähdään, että laskennan yksinkertaistamisella ei ole suurta merkitystä pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin.

Lisäksi laskennassa oletettiin, että pyrolysaattorin yhdistäminen kattilaan ei muuta kattilan sähkö- ja lämpötehoa. Oletukseen päädyttiin koska tämän elinkaariarvioinnin puitteissa ei ollut mahdollisuutta mallintaa kattilaa, jotta todelliset vaikutukset kattilan tehoihin olisi saatu selvitettyä. Koska kattilaan siirtyi pyrolysaattorista enemmän energiaa kuin kattilasta pyrolysaattoriin, päädyttiin kattilan pääpolttoaineiden eli hakkeen ja turpeen syöttöä vähentämään sen verran kuin kaasun ja hiiltojäännös tuottavat ylimääräistä energiaa. Kuumaa hiiltojäännöstä ei ehkä ole tasapuolista arvottaa samalla tavalla kuin kattilan pääpolttoaineita, koska kuuma hiiltojäännös tuottaa kattilassa enemmän höyryä energiayksikköä kohden kuin kattilan pääpolttoaineet. Tässä työssä laaditun kasvihuonekaasupäästölaskennan puitteissa tehty oletus on kuitenkin riittävä, koska tietoa kattilan sähkö- ja lämpötehoista tarvitaan ainoastaan päästöjen kohdentamiseen. Kuuma hiiltojäännös ei todennäköisesti lisää höyryntuotantoa niin paljon, että sillä olisi merkittävää vaikutusta kattilan sähkö- ja lämpötehoon ja sitä kautta pyrolyysiöljyn elinkaaren kasvihuonekaasupäästöihin.

5.2.5 Raaka-aineen kuivaus

Raaka-aineen kuivaus valittiin suoritettavaksi kattilan savukaasujen hukkalämmöllä. Tällöin raaka-aineen kuivauksesta ei ajatella syntyvän kasvihuonekaasupäästöjä, koska savukaasujen lämpö jäisi muutoin hyödyntämättä. Kattilan päästöjen kohdentaminen savukaasuille ja sitä kautta kuivaukselle ei ole järkevä vaihtoehto, koska savukaasu jäisi vertailutilanteessa hyödyntämättä, jolloin osa kattilan päästöistä kohdentuisi jätevirralle. Jos savukaasulle olisi joku tapaus jossa jotain muuta käyttöä, voisi päästöjen kohdentaminen olla tarkoituksenmukaista.

Työssä laskettiin, että polttoaineteholtaan 96 MW kattila riittää tuottamaan raaka-aineen kuivaukseen tarvittavan määrän savukaasuja. Jos kattila olisi liian pienitehoinen riittävän savukaasumäärän tuottamiseen, olisi kattilatehon nousun vaikutus pyrolyysiöljyn kasvihuonekaasupäästöihin kuitenkin pieni. Esimerkiksi polttoainetehon kaksinkertaistaminen nostaa pyrolyysiöljyn päästöjä tapauksesta (1 tai 2) riippuen vain noin 2–11 %. Näin suuri virhemarginaali polttoainetehon laskennassa ei edes ole realistinen, joten todennäköisesti polttoainetehon muutos aiheuttaisi muihin epävarmuuksiin nähden kohtalaisen pienen muutoksen pyrolyysiöljyn päästöihin.

Kriittisempi tekijä laskennassa onkin oletus siitä, että raaka-aineen kuivaus voidaan suorittaa hyödyntämällä pelkästään kattilan savukaasujen hukkalämpöä. Jos kuivaus suoritettaisiin vaihtoehtoisella tavalla kuten höyry- tai ilmakeivauksella, pitäisi kuivauksesta syntyvät päästöt myös huomioida. Kuivauksesta aiheutuvien päästöjen määrää pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin on hankala arvioida, koska tietoa siitä miten paljon höyry- tai ilma-kuivaus muuttaisi kattilan virtoja, ei ole saatavilla. Tämän vuoksi päästöjä joudutaan arvioimaan referenssitutkimusten avulla.

Faix et al. (2010) metsätähteistä valmistetulle pyrolyysiöljylle suorittaman elinkaariarvioinnin tulosten mukaan vain 4 % prosessin tarvitsemasta energiasta kului raaka-aineen kuivaukseen. Tutkittavassa järjestelmässä raaka-aineen kuivaus suoritettiin kahdella pyrolyysiöljyä polttavalla CHP-dieselmoottorilla sekä polttamalla pyrolyysin sivutuotteena syntyvät kaasut. Kuivauksen energiantarpeen osuus kaikesta prosessin käyttämästä energiasta ei näyttäisi olevan kovin merkittävä. Koska isossa voimalaitoksessa energiantuotanto on tehokkaampaa ja kokonaishyötysuhde parempi kuin pienen kokoluokan dieselmoottorissa, ei raaka-aineen kuivaukseen tarvittava energiapanos luultavasti ole tässä työssä ainaakaan suurempi kuin dieselmoottorilla. Kuivauksen osuus prosessin käyttämästä energiasta ei kuitenkaan ole samaa suuruusluokkaa, koska Faix et al. (2010) tutkimassa järjestelmässä oli savukaasun puhdistimia ja osa hiiltojäännöksestä kaasutettiin. Kaasuttimen ja savukaasupuhdistimien energiankulutus muodosti huomattavan osan koko prosessin energiankulutuksesta.

Vepsäläinen (2008) tutki diplomityössään pyrolysaattorin ja sen raaka-aineen kuivauksen vaikutuksia voimalaitoksen toimintaan. Työssä luotiin malli, jolla voitiin tarkastella pyrolyysiprosessin aiheuttamia muutoksia voimalaitoksen energiataseeseen. Vepsäläisen tekemistä esimerkkilaskelmista selvisi, että pyrolyysiprosessi vähensi voimalaitoksen sähkönsä ja lämmöntuotantoa ja nosti polttoaineen tarvetta silloin, kun raaka-aineen kuivaus suoritettiin höyryllä. Esimerkkilaskelmissa 35 MW pyrolysaattori vähensi 95 MW kattilan sähköntuotantoa 2,75 GWh ja kaukolämmöntuotantoa 2,41 GWh 8000 h vuosiajolla. (Vepsäläinen 2008, 57–58 & 72)

Höyrykuivauksen päästöiksi voidaan ajatella ne päästöt, jotka aiheutuvat sen sähkö- ja lämpömäärän tuottamisesta, joka väheni raaka-aineen kuivauksen takia. Tätä oletusta ei kuitenkaan ole järkevä soveltaa silloin, kun yhdistettyä pyrolysaattori-kattila-prosessia varten rakennetaan uusi kattila. Oletus toimii ainoastaan silloin, kun voidaan ajatella referenssitilaksi kattila ennen pyrolysaattorin yhdistämistä, koska vähentyvä sähkö- ja lämpömäärä joudutaan todennäköisesti kuitenkin tuottamaan lisäämällä kattilaan syötettävää polttoainetta tai tuottamaan vastaavasti jossain muussa laitoksessa. Päästö voitaisiin laskea esimerkiksi käyttämällä kattilakohtaisia päästötietoja tai keskimääräisiä sähkö- ja lämmöntuotannon päästökertoimia. Vepsäläisen (2008) diplomityössään esimerkkinä käyttämä pyrolysaattori ja kattila vastaavat tehoiltaan suurin piirtein tässä työssä käytettyä laitteistoa. Jos oletetaan, että yhdistettyä pyrolysaattori-kattila-laitosta käytettäisiin 6000 h vuodessa ja sähköntuotannon päästökertoimena käytetään 221 g/kWh ja kaukolämmön yhteistuotannon päästökertoimena 220 g/kWh (Suomi et al. 2004), lisääntyisi pyrolyysiöljyn päästö tässä tapauksessa noin 0,6 gCO_{2ekv}/MJ. Tällöin esimerkiksi tapauksessa 1 päästövähennys laskisi vain noin prosenttiyksikön. Tämän pohjalta voidaan sanoa, että savukaasukuivauksen vaihtaminen höyrykuivaukseen ei näyttäisi lisäävän merkittävästi pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöjä muihin parametreihin nähden. Asian selvittäminen vaatii kuitenkin tarkempia tapauskohtaisia laskelmia pyrolysaattorin vaikutuksesta kattilan toimintaa.

5.3 RES-direktiivin laskentamenetelmän soveltuvuus pyrolyysiöljyn ilmastovaikutusten arviointiin

Kun pyrolyysiöljyn ilmastovaikutuksia arvioidaan RES-direktiivin laskentaohjeen mukaisesti, kohdataan laskennassa tilanteita, joihin direktiivissä ei anneta yksiselitteistä vastausta. Laskentamenetelmä jättää myös auki sellaisia asioita, jotka liittyvät kiinteästi pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin. Liika tulkinnanvaraisuus voi pahimmillaan johtaa siihen, että päästövähennyksiä laskettaessa toimija pyrkii tietoisilla valinnoilla mahdollisimman itselleen edulliseen lopputulokseen. Tällä saattaa olla ilmaston kannalta epäedullisia seurausvaikutuksia, joita direktiivi ei huomioi. Direktiivin soveltuvuus pyrolyysiöljyn elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen arviointiin voidaan siis kyseenalaistaa. Menetelmä vaikuttaa lähtökohtaisesti soveltuvalta, koska se määrää huomioimaan tärkeimmät pyrolyysiöljyn valmistukseen liittyvät vaiheet. Kun laskentamenetelmää aletaan soveltaa käytännössä, huomataan että moni laskennan kannalta olennainen tieto on kuitenkin jätetty selittämättä. Tarkkojen ohjeiden puuttuminen ja liiallinen tulkinnanvaraisuus antaa mahdollisuuden useille erilaisille tulkinnoille. Samaa ohjetta voidaan tulkita hyvin eri tavoin ja saada toisistaan poikkeavia tuloksia, jotka silti ovat kaikki direktiivin puitteissa laskettuja. Tämän vuoksi olisi tärkeää, että direktiivin epäselviä kohtia tarkennettaisiin ja sovittaisiin yhtenäisen tapa tulkita direktiiviä.

5.3.1 Järjestelmärajaus

Laskentaohje antaa järjestelmärajauksen määrittämiseen selkeän kehyksen, mutta jättää myös paljon tulkinnanvaraa. Epäselvää on esimerkiksi se, tulisiko metsän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä huomioida. RES-direktiivissä maankäytön muutoksista aiheutuille hiilivarantojen muutoksille on määritelty laskentakaava (2009/28/EY, liite V, C7). Kuten aiemmin menetelmä-osiossa jo todettiin, ei maankäytön muutoksella IPCC:n mukaan tarkoiteta muutosta maanhoito- tai maanmuokkaustavoissa, vaan luokkamuutosta jostain IPCC:n kuudesta maankäyttökategoriasta tai seitsemänneistä kategoriasta, joka sisältää monivuotiset viljelykasvit ja viljelyplantaasit. Tällöin direktiivissä annettulla kaavalla ei tulisi laskea biomassan tuotannosta tai korjuusta aiheutuvia muutoksia elävän tai kuolleen orgaanisen aineksen hiilivarannoissa. Hakkuutähteiden osalta maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvien päästöjen huomioimisella on suuri merkitys raaka-aineen tuotan-

non kokonaispäästöihin. Esimerkiksi Guinee et al. (2009) huomasivat myös, että biogeenisellä hiilellä on merkittävä vaikutus elinkaarianalyysin tuloksiin. He ehdottavat, että elinkaarianalyysimenetelmään tulisi lisätä ohjeet biogeenisen hiilitaseen muutosten huomioimiseen. Vastaavasti RES-direktiivissä tulisi olla myös tarkennus siitä, miten ja milloin maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt tulee huomioida. Jos hakkutähteen päästöissä huomioidaan ainoastaan fossiiliset päästöt, eikä maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä huomioida, jää merkittävä osa tuotantoketjun päästöistä huomiomatta. Tämän vuoksi tässä työssä päädyttiin huomioimaan nämä päästöt, vaikka RES-direktiivin pohjalta olikin epäselvää miten ja milloin päästöt tulisi huomioida.

Toinen järjestelmärajaukseen liittyvä epäselvyys on se, miten tarkastelurajaus tulisi asettaa apupolttoaineiden ja kemikaalien kohdalla. Apupolttoaineiden päästöjen määrittäminen johtaa useissa tapauksissa päättymättömään ketjuun. Esimerkiksi dieselöljyn tuotannossa tarvitaan dieselöljyä, jonka tuotannossa tarvitaan edelleen dieselöljyä jne. Tämän vuoksi RES-direktiivissä olisi hyvä olla kriteerit apuenergia- ja kemikaaliketjujen rajauksille, jolloin menetelmää soveltavan toimijan olisi helpompi määrittellä mitkä tekijät kuuluvat rajauksen sisäpuolelle. Tällöin ei enää olisi epäselvää kuinka pitkälle päästötekijöitä tulisi jäljittää. Sama ongelma koskee myös etanolia, jota lisätään pyrolyysiöljyyn. Direktiivi ei määrittele tulisiko apuenergiana tai kemikaalina käytettävän biopolttoaineen päästöt määrittää myös RES-direktiivin laskentamenetelmän mukaan vai jollain muulla tavalla. Loogisinta olisi käyttää RES-direktiivin menetelmää, josta pitäisikin olla maininta laskentaohjeessa. Vastaavanlaisiin johtopäätöksiin päätyivät myös Soimakallio et al. (2010, 78–79) RES-direktiivin laskentaohjeen soveltamista käsittelevässään raportissaan. Tässä työssä johdonmukaisinta olisi ollut määrittää bioetanolin päästöt RES-direktiivin laskentaohjeen mukaan, mutta etanolin vaikutus pyrolyysiöljyn kokonaispäästöihin on sen verran pieni, että laskennasta aiheutuvan lisätyön ja todennäköisesti vain pienen päästöarvon tarkennuksen jälkeen, ei tämän yksittäisen parametrin kohdalla nähty syytä määrittää päästöä muita parametreja yksityiskohtaisemmin. Jos etanolin päästö olisi laskettu alusta alkaen itse, olisi johdonmukaisuuden vuoksi myös muut merkittävimmät parametrit tulleet määrittää itse.

RES-direktiivissä tarkastelurajan ulkopuolelle rajautuu myös mahdolliset seurausvaikutukset, jotka voivat olla merkittäviä. Silloin kun pyrolysaattori kytketään kattilaan, vähenevät kattilan päästöt noin 5 % verrattuna tilanteeseen, jossa kattila toimii ilman pyrolysaattoria. Päästöjen vähentyminen johtuu siitä, että osa kattilassa poltettavasta turpeesta ja hakkeesta korvataan pyrolyysin sivutuotteina syntyvillä hiiltojäännöksellä ja kaasulla. Kattilan päästöjen vähentymistä ei tässä työssä kuitenkaan laskettu pyrolyysiöljyn eduksi, koska RES-direktiivin laskentamenetelmää tulkittaessa seurausvaikutukset jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Jos integroinnista aiheutuva kattilan päästöjen väheneminen voitaisiin laskea pyrolyysiöljyn eduksi, pienenesi tapauksessa 1 leijutushiekan mukana pyrolyysiöljylle siirtyvän lämmön päästöt. Samalla pyrolyysiöljyn kokonaispäästöt pienenisivät, koska lämmöntuotannon päästöjen osuus pyrolyysiöljyn elinkaaren kokonaispäästöistä on merkittävä. Oletusarvoilla laskettuna tapauksessa 1 pyrolyysiöljyn kokonaispäästö pienenesi alataapauksesta riippuen noin 1–23 %. Tapauksessa 2 hyödyn kohdentaminen pyrolyysiöljylle ei ole mahdollista, koska taserajaus on asetettu niin, ettei kattilan ja pyrolysaattorin välisiä aine- ja energiavirtoja huomioida erikseen. Jos integroinnin aiheuttama muutos kattilan päästöihin voitaisiin huomioida laskennassa, tulisi analogisesti huomioida myös muut seurausvaikutukset kuten raaka-aineen, apuhyödykkeiden ja sähkön hankinnasta mahdollisesti aiheutuvat kilpailuvaikutukset. Esimerkiksi raaka-aineen ohjaaminen biopolttoaineiden ja -nesteiden tuotantoon voi vähentää saman raaka-aineen käyttöä toisessa yhteydessä. Jos biopolttoainetuotantoon ohjautuva raaka-aine joudutaan muualla korvaamaan esimerkiksi fossiilisella polttoaineella tai turpeella, eivät kokonaispäästöt välttämättä todellisuudessa vähene. Direktiivissä ei kuitenkaan kehoiteta huomioimaan näitä epäsuoria vaikutuksia. Esimerkiksi hakkuutähteiden kohdalla on mahdollista, että ne tähteet, jotka muuten olisi käytetty esimerkiksi lämmöntuotantoon olemassa olevissa lämpökeskuksissa, ohjautuvat jatkossa biopolttoaineiden ja -nesteiden tuotantoon, jos niistä saatava hinta ja valtion tuet ovat riittävän suuria. Tällöin lämmöntuotannossa voidaan joutua käyttämään tähteiden sijaan enemmän fossiilisia polttoaineita tai turvetta. Koska epäsuoria vaikutuksia ei huomioida, on mahdollista, että RES-direktiivin kestävyyskriteeristö ei tuekaan ilmastoystävällisimpiä biopolttoaineita, vaan saattaa jopa tukea järjestelmiä, jotka edistävät ilmastonmuutosta.

Sivutuotteiden korvaushyötyjenkään huomioiminen ei ole RES-direktiivin laskentaohjetta noudatettaessa mahdollista. Biopolttoaineiden ja -nesteiden valmistuksessa voi nimittäin syntyä sellaisia sivutuotteita, joilla on mahdollista korvata toisia tuotteita muualla. Esimerkiksi sivutuotteena syntyvällä lämmöllä, voidaan korvata parhaimmassa tapauksessa fossiililla polttoaineilla tuotettua lämpöä. RES-direktiivi kuitenkin rajaa mahdolliset korvaushyödyt tutkittavan järjestelmärajan ulkopuolelle. Koponen (2009) ja Koponen et al. (2010) tutkivat korvaushyötyjen huomioimisen vaikutusta jäte-etanolin päästökertoimeen. Tutkimuksissa huomattiin, että sivutuotteista saatujen korvaushyötyjen merkitys oli tulosten kannalta ratkaiseva. Suhteellinen päästövähennys nousi sitä suuremmaksi, mitä enemmän korvaushyötyjä sivutuotteista saatiin. Kasviuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta tämä kannustaa tuottamaan paljon sivutuotteita silloin, kun sivutuotteista saatavat korvaushyödyt ovat suuremmat kuin etanolista saatava päästövähennys. Korvaushyötyjen huomioiminen ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Ongelmaa aiheutuu siitä, kuinka määritetään kutakin sivutuotetta vastaava tuote ja siitä saatavan korvaushyödyn suuruus. Korvaushyötyjen huomioiminen voi myös vääristää päätuotteen laskennallista kasviuonekaasupäästöä, koska ei voida todentaa, että korvaushyöty olisi todellisuudessa tapahtunut, jolloin päätuote on saattanut hyötyä ansiottomasti korvaushyödyn tuomasta päästövähennyksestä.

RES-direktiivi rajaa myös koneiden ja laitteiden valmistamisesta aiheutuvat päästöt järjestelmän ulkopuolelle. Yleisesti elinkaariarvioinneissa infrastruktuurin rakentamiseen tarvittavien materiaali- ja energiatarpeiden arviointiin ja näistä aiheutuviin kasviuonekaasupäästöihin ei ole kiinnitetty kovin suurta huomiota. Yhtenä syynä voidaan pitää luotettavan ja laaja-alaisen tiedon puutetta, jolloin infrastruktuurista aiheutuvien päästöjen määrän luotettava arviointi ei ole mahdollista. Leijukerroskattilaan integroitavan pyrolysaattorin rakentamisesta aiheutuvista päästöistä ei ole saatavilla tietoa eikä materiaalien ja energian tarvetta tunneta, jotta rakentamisen päästöjä voitaisiin laskea itse tiedon pohjalta. Perinteisten voimalaitosten päästöistä on kuitenkin tehty elinkaariarviointeja, joita voidaan hyödyntää arvioitaessa infrastruktuurin päästöjen vaikutusta. Esimerkiksi Hondo (2004) tarkasteli voimalaitosten rakentamisesta aiheutuvia päästöjä. Tarkastelussa oli mukana niin fossiililla polttoaineilla kuin myös uusiutuvalla energialla toimivia voimalaitoksia. Tarkastelussa huomioitiin hiilidioksidi- ja metaanipäästöt fossiilisten polttoaineiden poltosta sekä laitoksen rakentamisesta, käytöstä, huollosta ja purkamisesta. Voimalaitoksen rakentamisesta aiheutuneet kasviuonekaasupäästöt olivat 0,3–82,8 % kokonaispäästöistä riippuen voima-

laitoksesta ja käytettävästä polttoaineesta. Esimerkiksi hiilivoimalaitoksen elinkaaren päästöistä vain 0,4 % aiheutui voimalaitoksen rakentamisesta ja purkamisesta. Tutkimuksen tuloksia ei voida suoraan rinnastaa Suomeen, sillä tarkastellut voimalaitokset sijaitsivat Japanissa, jossa energiantuotantoteknologioiden ominaispiirteet ovat erilaiset kuin Suomessa. Tutkimuksen tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, ettei pyrolysaattorin ja kattilan rakentamisesta aiheutuvien päästöjen huomiotta jättämisellä ole suurta vaikutusta elinkaariarvioinnin tuloksiin. Muut laskennan epävarmuudet ja parametriherkkyydet ovat paljon merkittävämpiä kuin rakentamisen päästöjen vaikutus pyrolyysiöljyn kasvihuonekaasupäästöihin.

Euroopan standardoimisliitossa on valmisteilla standardi: Sustainably produced biomass for energy applications – Principles, criteria, indicators and verifiers for biofuels and bio-liquids. Direktiivin 4 osan kommentointivaiheessa olevassa työversiossa (prEN 16214–2:2010) on käsitelty päästöjen laskentaa varten asetettavia järjestelmärajoja. Standardiehdotuksen mukaan systeimirajausta tulisi laajentaa siten, että kahden prosessin välillä kulkeva energia- ja materiaalivirroista koostuva silmukka jää kokonaan taserajan sisäpuolelle. Tällainen järjestelmärajaus on idealtaan samanlainen kuin tämän työn tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä). Vaikka tulosten pohjalta näyttääkin siltä, ettei kattilaa ja pyrolysaattoria kannattaisi ajatella yhtenä kokonaisuutena, koska tällöin pyrolyysiöljyn päästöt kasvavat verrattuna tilanteeseen 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen), ehdottaa tämä standardiluonnos niin kuitenkin tekemään. Näin ollen tapauksen 2 järjestelmärajojen käyttäminen saattaakin olla perusteltua. Standardiehdotus on sovellus RES-direktiivin laskentaohjeista ja voi olla mahdollista, että standardi hyväksytään EU:ssa RES-direktiivin mukaiseksi tulkinnaksi. Pyrolyysiöljyn tapauksessa tämä olisi huono asia, koska järjestelmärajojen laajentamisen myötä kattilassa mahdollisesti poltettavat fossiiliset polttoaineet nostaisivat pyrolyysiöljyn päästöä huomattavasti verrattuna tilanteeseen, jossa kattila ja pyrolysaattori oletetaan erillisiksi yksiköiksi. Tapauksen 2 taserajauksen vakiintuminen voisi johtaa siihen, että pyrolysaattoria ei kannattaisi integroida fossiilisia polttoaineita käyttävään kattilaan, koska pelkällä pyrolysaattorilla olisi laskennallisesti pienempi päästö kuin kattilaan integroidulla pyrolysaattorilla. Tällöin ei myöskään syntyisi kannustetta energiatehokkaamman prosessin hyödyntämiseen.

5.3.2 Kohdentaminen

RES-direktiivin mukaan päästöt tulee kohdentaa energiasisältöjen suhteessa pää- ja sivutuotteille. Energiasisältö määritetään alemman lämpöarvon mukaan muille sivutuotteille paitsi sähkölle. Lämmöllä ei kuitenkaan ole alempaa lämpöarvoa, joten epäselväksi jää tuleeko RES-direktiivin kohdentamisperiaatteesta poiketa lämmön osalta vai tuleeko kohdentaminen lämmölle jättää suorittamatta. Tässä työssä päästöjen kohdentaminen lämmölle tapahtui hyödynnetyn energiasisällön mukaan. Jos tämä oletus on väärä eikä päästöjä tulisikaan kohdentaa lämmölle, laskisivat pyrolyysiöljyn päästöt tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erillään) noin 19–45 % riippuen siitä, miten maaperän hiilitaseen muutos huomioidaan. Päästöjen väheneminen johtuu siitä, että kattilan päästöjä ei kohdennu ollenkaan pyrolysaattorille leijutushiekan välityksellä otettavan lämmön mukana. Tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) pyrolyysiöljylle kohdentuvat päästöt suunnilleen kaksinkertaistuisivat, koska päästöjä ei voitaisi enää kohdentaa kaukolämmön mukana ulos järjestelmästä. Tällöin päästöt jakaantuisivat vain pyrolyysiöljyn ja kattilan tuottaman sähkön kesken. Kaukolämpöteho on yli kaksinkertainen sähkötehoon ja pyrolyysiöljyn saantoon nähden, minkä vuoksi merkittävä osa päästöistä kohdentuu kaukolämmön mukana ulos järjestelmästä silloin, kun lämmölle kohdennetaan päästöjä. Päästöjen kohdentamisella lämmölle on näin ollen suuri merkitys pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin. Jos prosessissa saatava lämpö käytetään hyödyksi, kuten tässä tapauksessa, on päästöjen kohdentaminen lämmölle perusteltua. Samalla se voi kannustaa prosessin tehokkaampaan hyödyntämiseen. Jos prosessissa syntyvä lämpö menisi hukkaan, ei päästöjen kohdentaminen lämmölle olisi enää perusteltua. Tällöin päätuote hyötyisi ansiottomasti, koska osa päästöistä kohdentuisi jätevirralle.

Päästöjen kohdentamismenetelmän valinnalla voi olla merkittävä vaikutus elinkaariarvioinnin tuloksiin. RES-direktiivissä kohdentaminen on määrätty suoritettavaksi energiaperusteisesti. Tällä kuten muillakin kohdentamismenetelmillä on hyvät ja huonot puolensa, eikä minkään kohdentamismenetelmän käyttö ole täysin objektiivista ja ongelmaton. (Soimakallio et al. 2009, 35–37.) Elinkaaristandardissa (SFS-EN ISO 14044:2006) kehoitetaan ensisijaisesti välttämään kohdentamista laajentamalla tarkastelurajausta. Kaikissa tapauksissa järjestelmärajauksen laajentaminen ei kuitenkaan ole mahdollista. Tällöin olisi ensisijaisesti käytettävä fysikaalisiin suhteisiin (esim. massa ja energiasisältö) perustuvaa

kohdentamista. Tapauksissa joissa fysikaalisiin suhteisiin perustuva kohdentaminen ei ole mahdollista, voidaan kohdentaminen suorittaa muihin tuotteiden ja toimintojen välisiin suhteisiin perustuen. Kohdentaminen voidaan tällöin suorittaa esimerkiksi taloudellisen arvon perusteella. (SFS-EN ISO 14044:2006, 36 & 38.) Tärkeää on, että kohdentaminen suoritetaan yhdenmukaisesti siten, että samanlaisille syötteille ja tuotoksille sovelletaan samoja kohdentamismenettelyjä. Pyrolyysiöljyn kohdalla päästöt olisi suositeltavaa kohdentaa energiasisällön perusteella kaikille niille sivutuotteille, jotka voidaan hyödyntää energiana.

Tuhkalle ei kohdennettu päästöjä, koska tuhkan sisältämän palamattoman polttoaineen määrä ei ole tiedossa. RES-direktiivin mukaan päästöjä pitäisi kohdentaa kaikille sivutuotteille, joiden energiasisältö on suurempi kuin nolla. Päästöjen kohdentaminen tuhkalle on kuitenkin kyseenalaista, vaikka sillä olisikin pieni energiasisältö palamattoman polttoaineen vuoksi. Tuhkaa on mahdollista hyödyntää, mutta energiahyötykäyttöön siitä ei ole. Päästöjen kohdentaminen sellaisille sivuvirroille, joiden tuotantoon ei tarkoituksellisesti ole pyritty ja joilla ei ole markkinoita, on rinnastettavissa jätevirtoihin. Kuten hyödyntämättömän lämmön kohdalla, hyötyisi päästuote aiheuttomasti, jos päästöjä kohdennettaisiin tuhkalle. Polttoaineen sisältämän tuhkan määrä on yleensä niin pieni verrattuna muihin sivuvirtoihin, ettei kohdentamisella olisi toisaalta suurta vaikutusta pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin. RES-direktiivistä annetussa komission tiedonannossa sanotaan, että päästöjä ei pitäisi kohdentaa sellaisille sivutuotteille, joiden tuotantoon ei ole tarkoituksenmukaisesti pyritty (2010/C160/02). Tuhka voidaan katsoa tällaiseksi sivutuotteeksi. RES-direktiivin tulkintaohjeen suhtautuminen tuhkalle kohdentamiseen on kuitenkin ristiriitaista. Toisaalta päästöjä tulisi kohdentaa kaikille sivutuotteille, mutta toisaalta ei kuitenkaan sellaisille sivutuotteille, joiden tuotantoon ei pyritä. Esimerkiksi lämpö voi olla sivutuote, jonka tuotantoon ei tarkoituksellisesti pyritä, mutta sitä voidaan kuitenkin hyödyntää. Miten, milloin ja mille sivutuotteille kohdentaminen tulisi suorittaa, jää direktiivissä epäselväksi ja tältä osin direktiivin tulkintaa olisikin hyvä tarkentaa entisestään.

5.3.3 Sähköntuotannon päästöt

Sähköntuotannon päästöjä määritettäessä huomioitiin ainoastaan poltossa syntyvät hiilidioksidipäästöt. Sähköntuotannossa syntyy myös metaani- ja typpioksiduulipäästöjä, joita ei

päästökertoimessa huomioitu. Tämän lisäksi huomioimatta jäivät polttoaineiden alkujalostuksen päästöt. Metaani- ja typpioksiduulipäästöjen osuus on tyypillisesti pieni hiilidioksidipäästöihin nähden. Polttoaineen jalostuksen, kuljetuksen yms. päästöt ovat tyypillisesti muutamasta prosentista 20 prosenttiin polton päästöistä (Frischknecht et al. 2007; World Energy Council 2004, 54). Niiden huomiotta jättämisellä voi olla suurikin vaikutus sähköntuotannon päästöihin. RES-direktiivi ei kuitenkaan määrittele miten sähköntuotannon keskimääräinen päästö tulisi määrittää. Epäselvää on mm. mitä markkina-aluetta tulisi käyttää, mille ajanjaksolle keskimääräinen päästö lasketaan ja mitkä kaikki päästöt tulisi huomioida. Näitä samoja ongelmia kohdattiin myös muiden parametrien määrittämisessä.

Keskimääräinen sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästö riippuu monista tekijöistä kuten markkina-alueesta, ajankohdasta, huomioitavista päästökomponenteista ja päästöjen kohdentamisesta (Soimakallio et al. 2010, 75–77). Sähköntuotannon keskimääräiset vuotuiset kasvihuonekaasupäästöt vaihtelevat eri maissa paljon tuotantorakenteesta ja sähkön tuonnista ja viennistä riippuen. Tästä syystä sähköntuotantoalueen määritelmä voi vaikuttaa merkittävästi biopolttoaineketjun kokonaispäästöihin. RES-direktiivissä ei määritetä kuitenkaan mille ajanjaksolle keskimääräinen päästö tulisi määrittää. Päästöt vaihtelevat eri vuosien ja jopa eri kuukausien välillä. Etenkin vesitilanteen muutos paljon vesivoimaa käyttävissä maissa, muuttaa päästökerrointa huomattavasti. Suomessa sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöt riippuvat vahvasti siitä, kuinka päästöjen kohdentaminen sähkön ja lämmön välillä on suoritettu. Siihen, miten sähköntuotannon päästöt tulisi kohdentaa CHP-laitoksessa sähkön ja lämmön välille, ei ole yksiselitteistä eikä yhtä oikeaa menetelmää. Eräs tapa on käyttää hyödynjakomenetelmää, jossa päästöt jaetaan vaihtoehtoisten hankintamuotojen polttoainekulutusten suhteessa. Sähkölle vaihtoehtona käytetään lauhde- tuotantoa ja lämmölle vesikattilalämpöä. (Suomi et al. 2004, 14.) Tässä työssä käytettiin energiaperusteista kohdentamista. Jos lämmölle ei saisi kohdentaa päästöjä, kasvaisivat sähköntuotannon päästökertoimet huomattavasti niissä maissa, joissa on paljon CHP-tuotantoa. Sellaisissa maissa, joissa on vähän tai ei ollenkaan yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa, vastaavaa ongelmaa ei ole. Sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen määrittämiseen liittyvien epäselvyyksien vuoksi sähkönpäästökerroin otettiin mukaan herkkyystarkasteluun. Herkkyystarkastelua varten tulisi yleensä määrittää vaihteluväli käytetylle parametrille. Tässä työssä päätettiin vaihteluväliksi asettaa kuitenkin kahden eri markkina-alueen sähköntuotannon päästökertoimet. Sähköntuotannon päästökertoimen

määrittämisessä käytetty markkina-alue ei varsinaisesti ole parametripävarmuus mutta tässä työssä se katsottiin sellaiseksi. Tällöin herkkyytarkastelu huomioi sekä alueeseen, että yksittäiseen parametriin liittyvät epävarmuudet.

5.3.4 Termien määritelmät

RES-direktiivissä ei määritellä yksiselitteisesti mitkä raaka-aineet voidaan laskea jätteiksi ja tähteiksi. RES-direktiivin käytännön ohjeista annetussa tiedonannossa todetaan, että tähteet ja jätteet olisi tulkittava direktiivin mukaisesti. Tiedonannon mukaan jätteellä voidaan kuitenkin ymmärtää mitä tahansa ainetta tai esinettä, jonka haltija poistaa, aikoo poistaa tai on velvollinen poistamaan käytöstä. Jätteitä voivat olla maatalouden, vesiviljelyn, kalastuksen ja metsätalouden tähteet sekä prosessitähteet. Prosessitähde on aine, johon tuotantoprosessissa ei ole suoraan pyritty. (2010/C160/02.) Tiedonanto ei kuitenkaan ole lainvoimainen päätös, joten siinä annettua määritelmää ei voida pitää RES-direktiivissä tarkoitettujen jätteiden ja tähteiden virallisena määritelmänä. Tämän vuoksi tässä työssä tarkasteltiin hakkuutähteitä molemmista näkökulmista, koska direktiivin pohjalta ei voitu olla varmoja laskettaisiinko hakkuutähteet direktiivin mukaisiksi tähteiksi tai jätteiksi. Hakkuutähteistä valmistetun pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin ei oletuksella kuitenkaan ollut suurta vaikutusta, koska hakkuutähteille metsänkasvatuksen päästöistä kohdentuva osuus on pieni pyrolyysiöljyn elinkaaren kokonaispäästöihin nähden. Hakkuutähteet tulisi kuitenkin luokitella direktiivin mukaiseksi tähteeksi, koska hakkuutähteiden tuotantoon ei pyritä tarkoituksellisesti, vaan tähde syntyy ainespuun korjuun ohessa.

Jalostamo-käsitettä ei määritellä RES-direktiivissä, jonka vuoksi jalostamo voitaisiin ymmärtää niin yksittäiseksi polttoaineen tuotantolaitokseksi tai kokonaiseksi öljynjalostamoksin. Integroitujen tuotantolaitosten, kuten pyrolysaattori ja CHP-kattila, kohdalla tulkinta voi myös olla epäselvä erityisesti, jos raaka-aine- tai energiavirtoja ei ole syystä tai toisesta mahdollista jakaa yksiköiden välillä. Tässä työssä tutkittiin molemmat tapaukset, koska jalostamon määritelmästä ei ole direktiivin pohjalta varmuutta. Tuloksista nähdään, että valinnalla, käsitelläänkö pyrolysaattori ja kattila yhtenä yksikkönä vai erillisinä yksiköinä, on suuri merkitys pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöihin.

5.3.5 Biopolttoaineen käytön päästöt

RES-direktiivissä käytössä olevan biopolttoaineen kasvihuonekaasupäästöjen oletetaan olevan nolla. Myös polttoaineen poltosta aiheutuvat CH₄- ja N₂O-päästöt on jätetty huomiotta biopolttoaineen osalta. Näin menetellään myös fossiilisen vertailukohdan osalta, jonka päästöistä huomioidaan vain hiilidioksidi. Tämä on useimmiten perusteltua, koska biopolttoaineen käyttö ei yleensä aiheuta muutosta CH₄- ja N₂O-päästöissä suhteessa fossiiliseen polttoaineeseen. Jos biopolttoaineen tiedetään aiheuttavan muutoksia, voidaan se huomioida biopolttoaineen päästövähennystä laskettaessa. Esimerkiksi Czernik & Bridgwater (2004) mukaan pyrolyysiöljyn päästöt ovat raskaan polttoöljyn päästöjä pienemmät muiden kuin hiukkaspäästöjen osalta. Päästömittauksissa keskityttiin CO- ja NO_x-päästöihin. Oletettavasti metaani- ja typpioksiduulipäästöt ovat samaa suuruusluokkaa kuin raskaalla polttoöljyllä, koska muissakaan päästöissä ei ollut suuria eroja.

5.3.6 Vertailuketju

RES-direktiivi kehottaa käyttämään liitteestä V löytyvää vakioarvoa fossiilisen vertailukohdan kokonaispäästöille silloin kun kyseessä on bioneste. Vakioarvo ei huomioi fossiilisten vertailukohtien eroja, vaan vakioarvo on määritetty yhteisesti kaikille fossiilisille vertailukohdille sähkön-, lämmön- ja yhteistuotannon osalta. Oletusarvon valinnassa ei siis ole merkitystä sillä, mihin fossiiliseen polttoaineeseen bionestettä verrataan, ainoastaan se merkitsee, missä tuotannossa bionesteellä korvataan fossiilista polttoainetta. Vakioarvo voi siis olla epäoikeudenmukainen tietyissä tilanteissa. Vakioarvon käyttö ei palkitse suuremmalla päästövähennyksellä niissä tilanteissa, joissa fossiilisen vertailukohdan päästöt ovat todellisuudessa vakioarvoa suuremmat. Toisaalta vakioarvon käyttö ei myöskään rankaise päästövähennyksen pienenemisellä niissä tapauksissa, joissa fossiilisesta vertailukohdasta aiheutuu keksimääräistä pienemmät päästöt. Direktiivi kohtelee tältä osin biopolttoaineita ja bionesteitä eriarvoisesti. Biopolttoaineen fossiilisen vertailukohdan päästöjä määritettäessä tulee käyttää viimeisimpiä käytössä olevia keskiarvoja bensiinin ja dieselin fossiilisesta osasta peräisin olevista päästöistä. Jos tietoa ei ole saatavilla, tällöin tulee käyttää direktiivin oletusarvoa. (2009/28/EY, liite V, C19.) Bionesteiden osalta direktiivi ei kannusta käyttämään todellista vertailuketjun arvoa. Tässä työssä päätettiin kuitenkin herkkyystarastelussa huomioida myös bionesteen fossiilisen vertailukohdan todelliset päästöt. Tarkas-

telussa huomattiin, että muut tekijät ovat pyrolyysiöljyn tapauksessa kuitenkin paljon merkittävämpiä kuin vertailuketjun päästöarvon muuttuminen oletusarvosta. Vaikka biopolttoaineiden ja bionesteiden eriarvoinen kohtelu tässä asiassa ei ole järkevää, on vakioarvojen käyttäminen kuitenkin siinä mielessä perusteltua, että tällöin ei aiheudu epäselvyyttä siitä, mikä vertailuketju tulisi valita ja kuinka sen päästöt tulisi määrittää.

5.4 Tulosten vertailu muihin tutkimuksiin

Eri elinkaariarviointien tulosten vertailu on haastavaa, koska analyyseissä on käytetty hyvin erilaisia menetelmiä ja oletuksia. Raportointi ei usein ole riittävän läpinäkyvää, jotta voitaisiin tunnistaa tarkastelun rajauksissa sekä kohdentamisperiaatteiden ja vertailutilanteen valinnassa tehtyjen oletusten vaikutus lopputulokseen. Pyrolyysiöljylle on tehty suhteellisen vähän elinkaariarviointeja. Useimmissa löydetyistä artikkeleista pyrolyysiöljyn raaka-aine, valmistusprosessi ja vertailutilanne poikkesivat tämän työn tilanteesta, kuten myös laskennassa tehdyt menetelmälliset valinnat ja oletukset. Tällöin tuloksia vertailemalla ei välttämättä saada selville sitä, johtuvatko tulosten mahdolliset eroavaisuudet menetelmällisistä valinnoista vai tapauskohtaisista seikoista. Esimerkiksi Zhong et al. (2010) suorittivat elinkaariarvioinnin puujätteen nopealle pyrolyysille. He esittivät tulokset 15 eri vaikutusluokalle siten, että tulosten muuntaminen vertailukelpoiseen yksikköön ei ollut artikkelissa annettujen tietojen pohjalta mahdollista.

Kahdessa löydetystä pyrolyysiöljyn elinkaariarvioinnissa raaka-aineena olivat metsätähteet. Fan et al. (2010) laskivat hakkuutähteistä valmistetun pyrolyysiöljyn elinkaarenkasvihuonekaasupäästöt. Pyrolyysiöljyä käytettiin sähköntuotannossa, jolloin toiminnallisena yksikkönä oli 1 kWh tuotettua sähköä. Järjestelmärajauksessa huomioitiin kaikki energia-, polttoaine- ja energiapanokset sekä kuljetukset, jotka tarvitaan biomassan kasvatuksesta aina sähköntuotantoon saakka. Raaka-aineen päästöissä ei kuitenkaan huomioitu metsänkasvatusta, mutta tähteiden korjuussa, hakkeen tuotannossa ja kuljetuksissa tarvittavien koneiden rakentamisesta aiheutuvat päästöt huomioitiin. Prosessissa syntyvä sivutuotekasvu ja hiiltojäynnös käytettiin prosessin tarvitseman lämmön tuotantoon. Diesel-koneessa poltetun pyrolyysiöljyn elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt ovat Fan et al. (2010) mukaan $37 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{kWh}_e$. Fan et al. (2010) ilmoittivat päästön myös pyrolyysiöljyn megajouleja kohden. Päästö oli $14,51 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$, joka on hyvin lähellä tapauksen 1a tulosta. He tutkivat

myös tapausta, jossa laitoksen tarvitsema sähkö saadaan pyrolysaattoriin integroidussa kattilasta. Tällöin pyrolyysiöljyn päästöt vähenivät 6,34 gCO₂/MJ. Ero keskimääräisen verkkosähkön ja laitospöytäisen sähkön päästökertoimissa voi tästä päätellen olla merkittävä.

Faix et al. (2010) tutkivat myös metsätähteestä valmistetun pyrolyysiöljyn elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä. He käyttivät vertailutilanteena fossiilista dieseliä CHP-dieselmoottorissa. Toiminnallisena yksikkönä käytettiin yhtä kilowattituntia tuotettua sähköä. Raaka-aineen tuotannossa otettiin huomioon metsänhoidosta, puiden kaatamisesta, tähteiden keräyksestä ja kuljetuksesta aiheutuvat päästöt. Hakkeen kuivaus suoritetaan kahdella CHP-dieselmoottorilla sekä polttimella, jossa poltetaan sivutuotekaasut. Raaka-aineen pyrolysoiminen tapahtui kahdeksassa rinnakkaisessa pyrolysaattorissa. Kaasut ja osa hiiltojäännöksestä hyödynnettiin energiana. Valmiiseen öljyyn lisättiin kahta lisäainetta. Osa laitoksen valmistamasta pyrolyysiöljystä käytettiin muualla kuuden dieselmoottorin polttoaineena. Faix et al. (2010) mukaan dieselmoneessa poltettavan pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt ovat 151 gCO_{2ekv}/kWh_e. Vertailuketjuun nähden päästövähennys on noin 83 %. Faix et al. (2010) laskema päästö on noin neljä kertaa suurempi kuin päästö, jonka Fan et al. (2010) tutkimuksessaan laskivat.

Fan et al. (2010) laskema päästö pyrolyysiöljylle oli samaa suuruusluokkaa kuin tässä työssä tapaukselle 1a laskettu oletusarvo. Tästä ei kuitenkaan voida tehdä johtopäätöksiä, koska heidän tutkimuksessaan alkuoletus oli erilainen, vaikka yhtäläisyyksiä raaka-aineen ja prosessin osalta löytyikin. Missään löydettyistä pyrolyysiöljyn elinkaariarvioinneista ei ollut käytetty RES-direktiivin laskentaohjeistusta. Jo pelkästään tästä syystä tuloksia ei voida verrata varauksella toisiinsa. Vertailututkimusten pohjalta kuitenkin huomataan, että pyrolyysiöljyn elinkaaren päästöt, kuten myös muiden biopolttoaineiden ja bionesteiden päästöt ovat pitkälti riippuvaisia päästöjen laskennassa käytetyistä menetelmistä ja laskennassa tehdyistä oletuksista. Tästä syystä elinkaariarviointien tuloksiin tulee suhtautua varauksella eikä tuloksia pidä ajatella absoluuttisena totuutena biopolttoaineen tai -nesteiden todellisista ilmastovaikutuksista. Etenkin sellaisiin tutkimuksiin, joista puuttuu kattava herkkyystarastelu tai oletusten läpinäkyvyys on puutteellista, tulisi suhtautua varauksella. Valitsemalla sopivia arvoja, voidaan saada aikaan haluttu lopputulos, mutta todellisuudessa päästövähennys ei ehkä olekaan sen suuruinen mitä elinkaariarvioinnin tulos näyttää.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja uusiutuvan energian käytön edistämiseksi Euroopan unionissa on säädetty direktiivi uusiutuvasta energiasta (RES-direktiivi). Direktiivissä määritellään biopolttoaineita ja bionesteitä koskevat kestävyyskriteerit, jotka voidaan jakaa laadullisiin ja määrällisiin kriteereihin. Osa kriteereistä rajoittaa biopolttoaineiden ja bionesteiden tuotannossa käytettävien raaka-aineiden alkuperää ja osa niiden elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä. Jotta tuotetut biopolttoaineet ja bionesteet huomioitaisiin kansallisia tavoitteita ja uusiutuvan energian velvoitteita täytettäessä ja ne olisivat myös tukikelpoisia, tulee niiden täyttää direktiivissä annetut kestävyyskriteerit ja biopolttoaineiden ja bionesteiden käytöstä saatava kasvihuonekaasupäästövähennys tulee olla vähintään 35 %. Vuodesta 2017 alkaen vähennys tulee olla 50 % ja vuonna 2017 tai sen jälkeen käyttöön otetuissa laitoksissa vuodesta 2018 eteenpäin 60 %.

Tässä diplomityössä laskettiin hakkuutähteistä valmistettavan pyrolyysiöljyn elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt. Laskennassa käsiteltiin teoreettista laitosta, jossa pyrolyysiöljy valmistetaan kattilaan integroidulla pyrolysaattorilla. Pyrolyysiprosessin tarvitsema lämpö otetaan kattilasta, jossa poltetaan hakkuutähdehaketta, jysinturvetta ja pyrolyysin sivutuotteina syntyvä hiiltojäännös ja lauhtumattomat kaasut. Työn tavoitteena oli selvittää täyttäväkö hakkuutähteistä valmistettu pyrolyysiöljy RES-direktiivin vaatimukset kasvihuonekaasujen päästövähennykselle silloin, kun pyrolyysiöljyllä korvataan raskasta polttoöljyä lämmöntuotannossa. Tämän lisäksi työssä pohdittiin RES-direktiivin laskentamenetelmän soveltuvuutta pyrolyysiöljyn ilmastovaikutusten arviointiin.

Kasvihuonekaasupäästöjen laskenta suoritettiin RES-direktiivin liitteessä V esitetyn laskentaohjeen mukaisesti. Tämä laskentaohje on sovellus elinkaariarvioinnista, joka on menetelmä tuotteen elinkaareen liittyvien ympäristövaikutusten arviointiin. RES-direktiivin laskentamenetelmä noudattaa haitanjaollista elinkaariarviointia, joka keskittyy kuvaamaan niitä ympäristövaikutuksia, jotka liittyvät suoraan tarkasteltavaan elinkaareen. Järjestelmärajauksia muodostettiin RES-direktiivin laskentaohjeen mukaisesti. Järjestelmärajauksessa otettiin huomioon raaka-aineiden tuotannosta, jalostuksesta sekä kuljetuksista ja jakelusta aiheutuvat päästöt. Koneiden ja laitteiden valmistuksesta aiheutuvia päästöjä ei huomioitu, koska RES-direktiivi määrää jättämään ne huomioimatta. Koska direktiivin pohjalta jää

epäselväksi ovatko hakkuutähteet direktiivin mukaisia tähteitä tai jätteitä, jaettiin järjestelmärajauksen kahteen osaan. Järjestelmärajaukset erosivat toisistaan sen osalta, ajatellaanko hakkuutähteä direktiivin mukaiseksi tähteeksi tai jätteeksi vai ei. Toinen merkittävä laskentaan liittyvä epäselvyys oli jalostamon määritelmän puuttuminen. Direktiivin pohjalta ei voi sanoa onko kattilaan yhdistetty pyrolysaattori direktiivin tarkoittama jalostamo vai ei. Tästä syystä tarkasteltiin kahta tapausta sen mukaan ajatellaanko pyrolysaattori ja kattila erillisiksi yksiköiksi (tapaus 1) vai yhdeksi yksiköksi (tapaus 2).

Pyrolyysiöljyn kuivaus valittiin suoritettavaksi savukaasuilla. Kattilan polttoaine-, lämpö- ja sähköteho laskettiin, jotta voitiin kohdentaa päästöt pyrolyysiöljyn ja sivutuotteiden kesken. Pyrolysaattorin sivutuotteina syntyvän kaasun ja hiiltojäännöksen polttamisessa syntyi enemmän energiaa kuin leijutushiekan mukana siirtyi pyrolysaattoriin. Kattilan tuottama sähkö- ja lämpöteho pidettiin vakioina, joten turpeen ja hakkeen syöttöä kattilaan vähennettiin sen verran kuin hiiltojäännös ja sivutuotekaasu tuottavat ylimääräistä energiaa kattilaan. Sekä turpeen että hakkeen syöttöä vähennettiin kumpaakin yhtä paljon.

Tapausten 1 ja 2 elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen laskenta suoritettiin ensin oletusarvoilla, jotka koottiin kirjallisuudesta. Kummallekin tapaukselle muodostettiin alataipaukset a, b ja c, jotka viittaavat maaperän hiilitaseen tarkasteluajanjaksoon. Tapauksessa a ei ole huomioitu maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä. Tapauksessa b maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvia päästöjä on tarkasteltu 100 vuoden ajanjaksolla ja tapauksessa c 20 vuoden ajanjaksolla. Koska kaikkien muuttujien vaikutusta päästövähennyksen määrään on liian monimutkaista ratkaista analyttisesti, määrättiin tärkeimmille parametreille epävarmuusvälit, joiden pohjalta suoritettiin todennäköisyyspohjainen herkkyystarkastelu käyttäen Crystal Ball 2000.2 -ohjelmistoa, joka hyödyntää Monte Carlo -menetelmää. Pyrolyysiöljyn vertailuketjuna käytettiin raskasta polttoöljyä lämmöntuotannossa.

Oletusarvoilla lasketuista tuloksista nähdään, että tapauksen 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) alataipauksissa a, b ja c saavutetaan yli 35 % päästövähennys, mutta tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) ei tähän RES-direktiivin minimivaatimukseen päästä. Ero päästövähennysten suuruudessa johtuu siitä tarkastellaanko pyrolysaattoria ja kattilaa erillisinä yksiköinä vai kokonaisuutena. Tapauksessa 2, jossa pyrolysaattori ja kattila käsi-

tellään yhtenä kokonaisuutena, suurempi osa päästöistä kohdentuu pyrolyysiöljylle kuin tapauksessa 1. Tämän vuoksi päästövähennys on tapauksessa 2 vaatimattomampi.

Herkkyystarkastelun tuloksista huomattiin, että tapauksessa 1 (pyrolysaattori ja kattila erikseen) RES-direktiivin asettaman 60 % päästövähennysvelvoitteen saavuttaminen on hyvin todennäköistä silloin, kun maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt huomioidaan 100 vuoden ajanjaksolla tai jätetään kokonaan huomioimatta. Jos näitä päästöjä tarkastellaan 20 vuoden ajanjaksolla, on 50 % päästövähennysvelvoitteen saavuttaminen jo huomattavasti epätodennäköisempää kuin tapauksissa a ja b, eikä 60 % päästövähennysvelvoitteeseen todennäköisesti päästä. Tapauksessa 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) päästövähennykset olivat systemaattisesti tapauksista 1 huonommat eikä 35 % päästövähennysvaatimuksen saavuttaminen ole ollenkaan varmaa. Jos tapauksessa 2 maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvat päästöt huomioidaan 20 vuoden ajanjaksolla, ei 50 ja 60 prosentin tavoitteiden saavuttaminen ole ollenkaan mahdollista.

Tapauksessa 1 merkittävin päästövähennyksen suuruuteen vaikuttava tekijä oli maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuva päästö. Mitä lyhyemmällä ajanjaksolla päästö huomioitiin, sitä pienempi oli todennäköisyys saavuttaa RES-direktiivin päästövähennysvaatimukset. Tapauksessa 2 ylivoimaisesti merkittävin päästövähennyksen suuruuteen vaikuttava tekijä oli kattilan polttoaineet. Mitä enemmän kattilassa poltettiin haketta, sitä suurempi oli saavutettava päästövähennys. Tarkasteluissa huomattiin, että vaikka kattilassa poltettaisiin ainoastaan haketta, olisi tapauksissa 1c ja 2c päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa kuitenkin epävarmuutta, koska maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuu kuitenkin suuri osa päästöistä. Suuri ero tapauksien 1 ja 2 tuloksissa näkyy kuitenkin vain silloin, kun kattilassa poltetaan fossiilisia polttoaineita. Jos kyseessä on biokattila, ei ero tapauksien 1 ja 2 tuloksissa ole merkittävä. Euroopan standardoimisjärjestössä on valmisteilla standardi, jossa ehdotetaan käytettäväksi juuri tapauksen 2 (pyrolysaattori ja kattila yhdessä) kaltaista taserajausta. Tässä työssä tarkastellun pyrolyysiöljykonseptin kannalta tapauksen 2 kaltaisen taserajauksen käyttäminen on epäedullista silloin, kun pyrolysaattoriin yhdistetyssä kattilassa poltetaan myös fossiilisia polttoaineita. Jos laskenta tulisi jatkossa suorittaa tapauksen 2 kaltaisesti, ei pyrolysaattoria kannattaisi kytkeä laitokseen, jossa poltetaan fossiilisia polttoaineita. Tämä voisi johtaa siihen, ettei pyrolysaattorin ja kattilan integrointia kannattaisi tehdä. Jos pelkän pyrolysaattorin laskennalliset päästöt ovat tavalla 2 laskettuna

pyrolysaattorin ja kattilan yhdistelmää pienemmät, ei synny kannustetta käyttää energiatehokkaampaa integraattia.

Kun pyrolyysiöljyn ilmastovaikutuksia arvioidaan RES-direktiivin laskentaohjeen mukaisesti, kohdataan laskennassa tilanteita, joihin direktiivissä ei anneta yksiselitteistä vastausta. Tästä seuraava tulkinnanvaraisuus voi pahimmillaan johtaa siihen, että päästövähennyksiä laskettaessa toimija pyrkii tietoisilla valinnoilla mahdollisimman itselleen edulliseen lopputulokseen. Direktiivissä ei esimerkiksi sanota sitä, pitäisikö hakkuutähteiden korjuun aiheuttaman maaperän hiilitaseen muutoksen päästöt huomioida laskennassa. Ainakin hakkuutähteiden osalta maaperän hiilitaseen muutoksesta aiheutuvilla päästöillä huomattiin olevan suuri merkitys hakkuutähdihakkeen tuotantoketjun päästöihin. Muita ongelmia aiheuttaa mm. se, että direktiivi ei määrittele tarkasti sellaisia termejä kuten tähde, jäte, jalostamo ja sähköntuotannon päästöjen markkina-alue. Tästä syystä olisi tärkeää, että direktiiviä tarkennettaisiin, jotta eri biopolttoaine- ja bionesteketjut olisivat menetelmiltään mahdollisimman yhtenäisiä kaikissa tapauksissa eikä termien tulkinta aiheuttaisi poikkeavuutta niiden välille. RES-direktiivin laskentamenetelmää tulisi myös tarkentaa, jotta se olisi yhtenäisempi eikä tulkinnan varaa olisi niin paljoa, että se johtaisi näin erilaisiin tuloksiin kuin tämän työn tapauksissa 1 ja 2, jotka molemmat ovat perusteltuja tulkintoja direktiivin laskentamenetelmästä.

Tulkintaan liittyvien ongelmien lisäksi RES-direktiivin laskentamenetelmään liittyy myös menetelmällisiä epäselvyyksiä. Laskentamenetelmä ei esimerkiksi ota kantaa siihen, miten apupolttoaineiden ja kemikaalien kohdalla tulisi muodostaa tarkastelurajaus. Näin ollen epäselväksi jää kuinka pitkälle päästökomponentteja tulisi jäljittää kunkin apupolttoaineen tai kemikaalin kohdalla. Myös ohjeistus päästöjen kohdentamisesta on epätarkka. Direktiivistä ei käy ilmi, voidaanko lämmölle ylipäänsä kohdentaa päästöjä tai kuinka kohdentaminen tulisi suorittaa. Tämän lisäksi RES-direktiivin laskentamenetelmä rajaa tarkastelun ulkopuolelle seurausvaikutukset. Vaikka seurausvaikutukset voivat olla huomattavia, ei niitä kuitenkaan huomioida RES-direktiivin mukaisessa laskennassa. Esimerkiksi pyrolysaattorin ja kattilan integroinnista aiheutuva kattilan päästöjen väheneminen jää huomioimatta RES-direktiivin mukaisessa laskennassa.

Taserajausta 1 käyttämällä tulokset näyttävät siltä, että raskaan polttoöljyn korvaaminen pyrolyysiöljyllä johtaa merkittäviin päästövähennyksiin. Taserajausta 2 käyttämällä päästöt saattavat olla raskasta polttoöljyä suuremmat. Koska erot tapausten 1 ja 2 tuloksissa olivat niin suuret, on selvää että tulokset riippuvat niin direktiivin tulkinnasta kuin myös muista oletuksista. Pyrolyysiöljyn kasviuonekaasupäästöjen määrittäminen ei ole yksinkertaista. Tulosten perusteella näyttää kuitenkin siltä, että raskaan polttoöljyn korvaaminen pyrolyysiöljyllä lämmöntuotannossa täyttää RES-direktiivin päästövähennysvaatimukset, kun direktiivin taserajausta tulkitaan tavalla 1.

LÄHDELUETTELO

2003/87/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2003/87/EY, annettu 13 päivänä lokakuuta 2003, kasvihuonekaasujen päästöoikeuksien kaupan järjestelmän toteuttamisesta yhteisössä ja neuvoston direktiivin 96/61/EY muuttamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti N:o L275/32, 25.10.2003.

2009/28/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY, annettu 23 päivänä huhtikuuta 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 N:o L140/16, 5.6.2009.

2010/C160/02. Komission tiedonanto EU:n biopolttoaineiden ja bionesteiden kestävyysjärjestelmän täytäntöönpanosta käytännössä sekä biopolttoaineiden laskentasäännöistä. Euroopan unionin virallinen lehti N:o C160/8, 19.6.2010.

2010/335/EY. Komission päätös, annettu 10 päivänä kesäkuuta 2010, maaperän hiilivarantojen laskentaa koskevista ohjeista direktiivin 2009/28/EY liitteen V soveltamista varten. Euroopan unionin virallinen lehti N:o L 151/19, 17.6.2010.

Alakangas Eija. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia [pdf-dokumentti]. 172 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5740-9. Viitattu 3.11.2010.

Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Alakangas Eija. 2010. EUBIONET III -selvitys biopolttoainevaroista, käytöstä ja markkinoista Euroopassa? [pdf-dokumentti]. 9 s. Biopolttainemarkkinat ja standardit -seminaari 23.3.2010. Viitattu 5.10.2010.

Saatavissa: www.eubionet.net/GetItem.asp?item=digistorefile;150643;1361

Amos A. Wade. 1998. Report on Biomass Drying Technology [pdf-dokumentti]. 28 s. National Renewable Energy Laboratory. Viitattu 20.9.2010.

Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf>

Antikainen Riina. 2010. Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet [pdf-dokumentti]. 83 s. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2010. ISBN 978-952-11-3734-1. Viitattu 15.11.2010.

Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=116835&lan=fi>

Asplund D., Korppi-Tommola J. & Helynen S. 2005. Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015 [pdf-dokumentti]. 48 s. Viitattu 12.11.2010. Saatavissa: [http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/E5063805F1B754D5C22570190028414D/\\$file/34642005.pdf](http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/E5063805F1B754D5C22570190028414D/$file/34642005.pdf)

Asplund D., Flyktman M. & Uusi-Penttilä P. 2009. Arvio mahdollisuuksista saavuttaa uusiutuvien energialähteiden käytön tavoitteet vuonna 2020 Suomessa [pdf-dokumentti]. 56 s. FINBIO:n julkaisu 42. ISBN 978-952-5135-41-1. Viitattu 17.11.2010. Saatavissa: http://www.sentre.fi/mp/db/file_library/x/IMG/27942/file/LOppuraportti_FINBIOjulkaisu42.pdf

Bradley Doug. 2006. European Market Study for BioOil [pdf-dokumentti]. 85 s. Climate Change Solutions. Viitattu 1.11.2010. Saatavissa: http://www.canbio.ca/documents/publications/European_BioOil_Market_Study_Dec_15_pdf.pdf

Bridgwater A.V., Meier D. & Radlein D. 1999. An Overview of Fast Pyrolysis of Biomass. *Organic Geochemistry*, 1999:30, s.1479-1493. ISSN 0146-6380.

Börjesson Pål. 2000. Economic Valuation of the Environmental Impact of Logging Residue Recovery and Nutrient Compensation. *Biomass and Bioenergy*, 2000:19, s.137-152. ISSN 0961-9534.

Cherubini F., Bird N. D., Cowie A., Jungmeier G., Schlamadinger B. & Woess-Gallasch S. 2009. Energy- and Greenhouse Gas-based LCA of Biofuel and Bioenergy Systems: Key Issues, Ranges and Recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 2009:53, s.434-447. ISSN 0921-3449.

Crystal Ball 2000.2. User Manual. 412 s. Decisioneering, Inc 1998-2001.

Czernik S. & Bridgwater A.V. 2004. Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil. *Energy & Fuels*, 2004:18, s.590–598. ISSN 0887–0624.

Edwards R., Larive J-F., Mahieu V. & Rouveiolles P. 2007. Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context [pdf-dokumentti]. Well-to-Tank Report Version 2c. 140 s. EUCAR, CONCAWE & JRC/IEA. Viitattu 28.10.2010. Saatavissa: http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/WTW_Report_010307.pdf

Ekvall T., Tillman A-M. & Molander S. 2005. Normative Ethics and Methodology for Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2005:13, s.1225–1234. ISSN 0959–6526.

Energiatilasto. 2007. Tilastokeskuksen Energia CD 2007.

EU. 2006. Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants [pdf-dokumentti]. 580 s. Viitattu 2.10.2010. Saatavissa: <http://eippcb.jrc.es/reference/>

Evira. 2009. Tuhkan käyttö lannoitevalmisteena [pdf-dokumentti]. 4 s. Evira, Maatalouskemian yksikön ohje 12502/02. Viitattu 4.1.2011. Saatavissa: http://www.evira.fi/attachments/kasvintuotanto_ja_rehut/lannoitteet/ohjeet/12502_02_tuhkan_kaytto_lannoitevalmisteena.pdf

Fagernäs L., Impola R., Rautiainen R. & Ajanko S. 2004. Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa -PUUT29 [pdf-dokumentti]. Teoksessa: Alakan-gas E. & Holviala N., Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. s.155. Valtion teknillinen tutkimuskeskus 2004. ISBN 951–38–6288–7. Viitattu 30.10.2010. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/symposiums/2004/S231.pdf>

Fagernäs L., Brammer J., Wilen C., Lauer M. & Verhoeff F. 2010. Drying of Biomass for Second Generation Synfuel Production. *Biomass & Bioenergy*, 2010:34, s.1267–1277. ISSN 0961–9534.

Faix A., Schweinle J., Schöll S., Becker G. & Meier D. 2010. (GTI tcbiomass) Life Cycle Assessment of the BTO-Process (Biomass-to-Oil) with Combined Heat and Power Generation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2010/29:2, s.193–202. ISSN 1944–7442.

Fan J., Kalnes T., Alward M., Klinger J., Sadehvandi A. & Shonnard D. 2010. Life Cycle Assessment of Electricity Generation Using Fast Pyrolysis Bio-oil. *Hyväksytty lehteen Renewable Energy*, 2011/36:2, s.632–641. ISSN 0960–1481.

Finnveden G., Hauschild M., Ekvall T., Guinee J., Heijungs R., Hellweg S., Koehler A., Pennington D. & Suh S. 2009. Recent Developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 2009:91, s.1–21. ISSN 0301–4797.

Frischknecht R., Althaus H-J., Bauer C., Doka G., Heck T., Jungbluth N., Kellenberger D. & Nemecek T. 2007. The Environmental Relevance of Capital Goods in Life Cycle Assessments of Products and Services. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007:11, s.1–11. ISSN 1614-7502.

Guinee J. B., Heijungs R. & E. van der Voet. 2009. A Greenhouse Indicator for Bioenergy: Some Theoretical Issues with Practical Implications. *Life Cycle Assess* 2009:14, s.328–339.

Helynen S., Flyktman M., Mäkinen T., Sipilä K. & Vesterinen P. 2002. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä [pdf-dokumentti]. 110 s. Espoo 2002. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2145. ISBN 951–38–6055–8. Viitattu 16.11.2010. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2002/T2145.pdf>

Hondo Hiroki. 2004. Life Cycle GHG Emission Analysis of Power Generation Systems: Japanese Case. *Energy*, 2005:11–12. s.2042–2056. ISSN 0360–5442.

Hongisto M., Loikkanen T., Kuisma J. & Järvinen P. 2001. Tapaustutkimuksia energia-alan ympäristömyötäisistä innovaatioista ja niihin vaikuttavista tekijöistä [pdf-dokumentti]. 125 s. IEE Reports No 16/2001. ISSN 1457–2494. Viitattu 1.12.2010. Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2001/innoene21_12_01ppp.pdf

Hyppänen T. & Raiko R. 1995. Leijupolttu. Teoksessa: Raiko R., Kurki-Suonio I., Saastamoinen J. & Hupa M., Poltto ja Palaminen 1995. s.629. International Flame Research Foundation, Suomen kansallinen osasto. ISBN 951-666-448-2.

Ilmatieteenlaitos. 2010. Kasvihuonekaasut [www-dokumentti]. Viitattu 10.12.2010. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasut>

IPCC. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change [pdf-dokumentti]. 531 s. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [pdf-dokumentti]. Cambridge University Press. ISBN 0-521-56433-6 (kovakantinen), ISBN 0-521-56436-0 (pehmytkantinen). Viitattu 13.8.2010. Saatavissa: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm

IPCC. 2000. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories [pdf-dokumentti]. Chapter 2 (Energy). s.95. Intergovernmental Panel on Climate Change. Viitattu 12.8.2010. Saatavissa: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/2_Energy.pdf

IPCC. 2001a. Climate Change 2001. The Scientific Basis [pdf-dokumentti]. 881 s. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. ISBN 0521-80767 -0 (kovakantinen), ISBN 0521-01495-6 (pehmytkantinen). Viitattu 13.8.2010. Saatavissa: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/index.htm>

IPCC. 2001b. Climate Change 2001 [pdf-dokumentti]. Mitigation. 753 s. Contribution of working group III to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. Viitattu 19.9.2010. Saatavissa: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/

IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [pdf-dokumentti], Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. & Tanabe K. ISBN 4-88788-032-4. Viitattu 14.9.2010. Saatavissa: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

IPCC. 2007. Issues related to mitigation in the long term context [pdf-dokumentti]. Teoksessa: Climate Change 2007: Mitigation. s.170. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. Viitattu 15.8.2010. Saatavissa:

<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter3.pdf>

Joanneum Research. 2010. The Upfront Carbon debt of Bioenergy [pdf-dokumentti]. Prepared by: G. Zanchi, N. Pena & N. Bird. Viitattu 4.1.2011. Saatavissa:

http://www.birdlife.org/eu/pdfs/Bioenergy_Joanneum_Research.pdf

Kirkinen J., Minkkinen K., Penttilä T., Kojola S., Sievänen R., Alm J., Saarnio S., Silvan N., Laine J. & Savolainen I. 2007. Greenhouse Impact Due to Different Peat Fuel Utilisation Chains in Finland – a Life-Cycle Approach. Boreal Environment Research, 2007:12, s.211–223. ISSN 1239–6095.

Kirkinen Johanna. 2010. Greenhouse Impact Assessment of Some Combustible Fuels with a Dynamic Life Cycle Approach. 63 s. Doctoral dissertation. Åbo Akademi University, Division of Natural Sciences and Technology, Department of Chemical Engineering, Industrial Management. VTT Publications 733. ISBN 978–951–38–7388–2.

Koponen Kati. 2009. Euroopan unionin kestävyyskriteerien soveltuvuus liikenteen biopolttoaineiden kasvihuonekaasuvaikutusten arviointiin. 85 s. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Ympäristötekniikan koulutusohjelma.

Koponen K., Soimakallio S. & Sipilä E. 2010. Testing the European Union Sustainability Criteria for Biofuels -Case Study of Waste-derived ethanol. 18th European Biomass Conference and Exhibition. Proceedings of the international conference held in Lyon, France 3–7 May 2010. s.2019–2024. ISBN 978–88–89407–56–5.

Korpijärvi K., Mroueh U-M., Merta E., Laine-Ylijoki J., Kivikoski H., Järvelä E., Wahlström M. & Mäkelä E. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön [pdf-dokumentti]. 75 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2499. Viitattu 3.12.2010. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2499.pdf>

Kujanpää et al. 2010. Carbon balance of forest residue collection and combustion in southern-Finland. 18th European Biomass Conference and Exhibition. Proceedings of the international conference held in Lyon, France 3–7 May 2010. s.1575–1579. ISBN 978–88–89407–56–5.

Kärhä Kalle. 2010. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2009. Metsätehon tulosalvosarja 9/2010. Viitattu 1.11.2010. Saatavissa:

http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2010_09_Metsahakkeen_tuotantoketjut_Suomessa_2009_kk.pdf

Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R. & Liski J. 2004. Biomass Expansion Factors (BEFs) for Scots Pine, Norway Spruce and Birch According to Stand Age for Boreal Forests. *Forest Ecology and Management*, 2004:188, s.211–224. ISSN 0378–1127.

Lundie S., Ciroth A. & Huppes G. 2007. Inventory Methods in LCA: Towards Consistency and Improvement – Final Report [pdf-dokumentti]. 121 s. UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, Life Cycle Inventory (LCI) Programme, Task Force 3: Methodological Consistency. Viitattu 15.12.2010. Saatavissa:

<http://lcinitiative.unep.fr/includes/file.asp?site=lcinit&file=1DBE10DB-888A-4891-9C52-102966464F8D>

Metla. 2009. Metsätilastollinen vuosikirja 2009 [pdf-dokumentti]. 452 s. Toimittanut Peltola A. ISBN 978–951–40–2204–3. Viitattu 15.8.2010.

Saatavissa: http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2009/vsk09_kokonaan_09.pdf

Mohan D., Pittman C. & Steele P. 2006. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 2006:20, s.848–889. ISSN 0887–0624.

Mäkinen T., Soimakallio S., Paappanen T., Pahkala K. & Mikkola H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. 134 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2357. ISBN 951–38–6825–7.

Neste Oil Oyj. 2006. Raskaan polttoöljyn käyttöopas. ISBN 952–5656–02–0. Viitattu 18.8.2010. Saatavissa: <http://www.nesteoil.com/binary.asp?GUID=7704C1C1-3784-48F1-B8E9-13F2C4DF03EA>

Oasmaa Anja. 2003. Fuel Oil Quality Properties of Wood-Based Pyrolysis Liquids. 65 s. Academic Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. Jyväskylän yliopisto, Kemian osasto. Research Report No. 99. ISBN 951-39-1572-7.

Oasmaa A., Kuoppala E., Selin J-F., Gust S. & Solantausta Y. 2004. Fast Pyrolysis of Forestry Residue and Pine. 4. Improvement of the Product Quality by Solvent Addition. Energy & Fuels, 2004:18. s.1578-1583. ISSN 0887-0624.

Oasmaa A., Peacocke C., Gust S., Meier D. & McLellan R. 2005. Norms and Standards for Pyrolysis Liquids. End-User Requirements and Specifications. Energy & Fuels 2005:19, s.2155-2163. ISSN 0887-0624.

Oasmaa A., Solantausta Y., Arpiainen V., Kuoppala E. & Sipilä K. 2010. Fast Pyrolysis Bio-Oils from Wood and Agricultural Residues. Energy & Fuels, 2010:24, s.1380-1388. ISSN 0887-0624.

Onay Ozlem & Kockar Mete O. 2003. Slow, Fast and Flash Pyrolysis of Rapeseed. Renewable Energy 2002:28, s.2417-2433. ISSN 0960-1481.

Palosuo Taru & Wihersaari Margareta. 2000. Puuenergia ja kasviuonekaasut. Osa 2: Hakkuutähteiden energiakäytön vaikutus metsien maaperän hiilitaseeseen. 34 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Energian raportteja 9/2000.

Pingoud Kim. 2006. Puutuotteet ilmastopolitiikassa. Teoksessa: Valsta L., Ahtikoski A., Horne P., Karttunen K., Kokko K., Melkas E., Mononen J., Pingoud K., Pohjola J. & Uusi-vuori J., Puu ilmastonmuutoksen hillitsijänä [pdf-dokumentti]. s.11. Tutkimusraportteja 39. Helsingin yliopisto, Metsäekonomian laitos. ISBN 952-10-3022-4. Viitattu 20.10.2010. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=48189>

Pirilä P., Anttila M. & Helynen S. 2004. Kotimaiset energiavarat. Teoksessa: Kara M., Helynen S., Mattila L., Viinikainen S., Ohlström M. & Lahnalampi M., Energia Suomessa; Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 396 s. VTT Prosessit. ISBN 951-37-4256-3.

Pohjola J., Valsta L. & Mononen J. 2006. Metsät hiilinieluinä. Teoksessa: Valsta L., Ahtikoski A., Horne P., Karttunen K., Kokko K., Melkas E., Mononen J., Pingoud K., Pohjola J. & Uusivuori J., Puu ilmastonmuutoksen hillitsijänä. s.4. Tutkimusraportteja 39. Helsingin yliopisto, Metsäekonomian laitos. ISBN 952-10-3022-4. Viitattu 20.10.2010. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=48189>

PrEN 16214-4. 2010. Sustainably Produced Biomass for Energy Applications-Principles, Criteria, Indicators and Verifiers for Biofuels and Bioliquids-Part 4: Calculation Methods of the Greenhouse Gas Emission Balance Using a Life Cycle Analysis. Working document prepared by Technical Committee CEN/TC 383.

Repo A., Tuomi M. & Liski J. 2010. Indirect Carbon Dioxide Emissions from Producing Bioenergy from Forest Harvest Residues. GCB Bioenergy, 2010. ISSN 1757-1707.

Ross S., Evans D. & Webber M. 2002. How LCA Studies Deal with Uncertainty. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002/7:1, s.47. ISSN 1614-7502.

Savolainen Ilkka. 2010. Henkilökohtainen tiedonanto 9.12.2010.

Seppälä J., Grönroos J., Koskela S., Holma A., Leskinen P., Liski J., Tuovinen J-P., Laurila T., Turunen J., Lind S., Maljanen M., Martikainen P. & Kilpeläinen A. 2010. The Climate Impacts of Peat Fuel Utilization Chains – a Critical Review of the Finnish and Swedish Life Cycle Assessments. 65 s. Suomen Ympäristö 16/2010. ISBN 978-952-11. Viitattu 18.11.2010.

Saatavissa: <http://www.environment.fi/download.asp?contentid=122310&lan=en>

SFS-EN ISO 14040. 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. 48 s. European committee for standardization. Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN ISO 14044. 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. 96 s. European committee for standardization. Suomen standardisoimisliitto.

Sinkko T., Hakala K. & Thun R. 2010. Biopolttoaineiden raaka-aineeksi viljeltävien kasvien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt Suomessa: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/28/EY mukainen laskenta [pdf-dokumentti]. 42 s. Maa- ja elintarviketa-

louden tutkimuskeskuksen raportti 9. ISBN: 978-952-487-289-8. Viitattu 11.10.2010. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti9.pdf>

Soimakallio S., Antikainen R. & Thun R. 2009. Assessing the Sustainability of Liquid Bio-fuels from Evolving Technologies. A Finnish Approach. 220 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2482. ISBN 978-951-38-7292-2. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2482.pdf>

Soimakallio S., Hongisto M., Koponen K., Sokka L., Manninen K., Antikainen R., Pasanen K., Sinkko T. & Thun R. 2010. EU:n uusiutuvien energialähteiden edistämisdirektiivin kestävyyskriteeristö: Näkemyksiä määritelmistä ja kestävyden todentamisesta. 130 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Working Papers. ISBN 978-951-38-7491-9. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W150.pdf>

Soimakallio Sampo & Saikku Laura. 2010. CO₂ Emissions Attributed to Electricity Consumption of Nations. 11 s. (Manuscript submitted).

Solantausta Yrjö. 2010. Henkilökohtainen tiedonanto 22.09.2010.

Suomi U., Hietaniemi J. & Hellgren M. 2004. Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskenta-ohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet [pdf-dokumentti]. 15 s. Motiva Oy. Viitattu 15.9.2010. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/co2ohje>

TEM. 2010a. Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti [pdf-dokumentti]. 10 s. Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiaosasto. Viitattu 12.10.2010. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/27405/NREAP_300610_FINLAND.pdf

TEM.2010b. Uusiutuvat energialähteet [www-dokumentti]. Viitattu 12.10.2010. Saatavissa: <http://www.tem.fi/?s=2481>

Thamsiriroj T., & Murphy J. D. 2010. Can Rape Seed Biodiesel Meet the European Union Sustainability Criteria for Biofuels? Energy Fuels, 2010:24, s.1720-1730.

Tilastokeskus. 2010a. Polttoaineluokitus [www-dokumentti]. Viitattu 3.8.2010. Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Tilastokeskus. 2010b. Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990–2008. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol [pdf-dokumentti]. 470 s. Viitattu 19.10.2010. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/tup/khkinv/fin_nir_20100525.pdf

Tsupari E., Tormonen K., Monni S., Vahlman T., Kolsi A. & Linna V. 2006. Typpioksiduulin (N_2O) ja metaanin (CH_4) päästökertoimia Suomen voimalaitoksille, lämpökeskuksille ja pienpoltolle [pdf-dokumentti]. 94 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Working papers 43. ISBN 951–38–6595–9. Viitattu 30.11.2010.

Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W43.pdf>

Tsupari E., Monni S., Tormonen K., Pellikka T. & Syri. 2007. Estimation of annual CH_4 and N_2O emissions from fluidised bed combustion: An advanced measurement-based method and its application to Finland. International Journal of Greenhouse Gas Control I. 2007, s.289–297. ISSN 1750–5836.

Vepsäläinen Harri. 2008. Pyrolyysiöljyn tuottaminen kiertoileijukattilaan liitettyllä prosessilla. 80 s. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Energia-tekniikan koulutusohjelma.

Vesala T., Haila Y., Korppi-Tommola J., Kulmala L., Lohila A., Raivonen M., Ruuhijärvi R. & Savolainen I. 2010. Turpeen energiakäytön hyödyt ja haitat. 54 s. Suomalaisen tiedakatemian kannanottoja 1/2010. ISBN 978–951–41–1061–0.

Saatavissa: <http://www.acadsci.fi/kannanottoja/turpeenenergiakaytto.pdf>

VTT. 1998. Suomalaisen sahatavaran elinkaariarvio [excel-tiedosto]. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Ei saatavissa.

Wihersaari Margareta & Palosuo Taru. 2000. Puuenergia ja kasvihuonekaasut. Osa 1: Päätehakkuun hake tuotantoketjujen kasvihuonekaasupäästöt. 55 s. VTT Energian raportteja 8/2000.

Wihersaari Margareta. 2005a. Evaluation of Greenhouse Gas Emission Risks from Storage of Wood Residue. Biomass and Bioenergy, 2005:28. s.444–453. ISSN 0961–9534.

Wihersaari Margareta. 2005b. Aspects on Bioenergy as a Technical Measure to Reduce Energy Related Greenhouse Gas Emissions. 93 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Publications 564. ISBN 951-38-6446-4.

World Energy Council. 2004. Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment [pdf-dokumentti]. 61 s. A Special Report of the World Energy Council. ISBN 0-946121-16-8. Viitattu 12.1.2011.

Saatavissa: <http://www.worldenergy.org/documents/lca2.pdf>

UNFCCC. 1992. United nations framework convention on climate change [pdf-dokumentti]. 24 s. Yhdistyneet kansakunnat 1992. Viitattu 10.9.2010.

Saatavissa: http://unfccc.int/essential_background/convention/background/items/2853.php

UNFCCC. 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change [pdf-dokumentti]. 20 s. Viitattu 14.8.2010.

Saatavissa: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

UNFCCC. 2002. Agreement between the European Community and Its Member States under Article 4 of the Kyoto Protocol. [pdf-dokumentti]. 9 s. Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties, eight session, New Delhi 23.10-1.11.2002.

Saatavissa: <http://unfccc.int/resource/docs/cop8/02.pdf>

UNFCCC. 2006. Updated UNFCCC Reporting Guidelines on Annual Inventories Following Incorporation of the Provisions of Decision 14/CP.11. 93 s. Viitattu 20.9.2010.

Saatavissa: <http://unfccc.int/resource/docs/2006/sbsta/eng/09.pdf>

UNFCCC. 2010. Report of the Conference of the Parties on its Fifteenth Session, Held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009. Part Two: Action Taken by the Conference of the Parties at its Fifteenth Session. 43 s. Viitattu 15.10.2010. Saatavissa:

<http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf>

Yaman Serdar. 2004. Pyrolysis of Biomass to Produce Fuels and Chemical Feedstocks. Energy Conversion and Management, 2004:45, s.651-671. ISSN 0196-8904

Zhong Z.W., Song B. & Zaki M.B.M. 2010. Life-Cycle Assessment of Flash Pyrolysis of Wood Waste. *Journal of Cleaner Production*, 2010:18, s.1177–1183. ISSN 0959–6526.

Äijälä O., Kuusinen M. & Koistinen A. 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset energia-puun korjuuseen ja kasvatukseen [pdf-dokumentti]. 31 s. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. ISBN 978–952–5694–64–2. Viitattu 25.11.2010. Saatavissa:

http://www.tapio.fi/files/tapio/Aineistopankki/Energiapuusuositukset_verkkoon.pdf

Savukaasulaskut

Ensin lasketaan paljonko hakkeen ja turpeen poltosta syntyy savukaasuja yhtä polttoainekilogrammaa kohden. Tämän laskemiseksi tarvitaan palamisen ilmakerroin, polttoaineiden lämpöarvot, alkuainekoostumukset, kosteudet ja tuhkapitoisuudet. Polttoaineiden ominaisuudet on koottu Alakankaan (2000) kokoamasta teoksesta, jossa esitellään Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valitut arvot on esitetty taulukossa 1. Ilmakertomiksi valitaan 1,3.

Taulukko 1. Laskennassa tarvittavat polttoaineiden ominaisuudet (Alakangas 2000).

Ominaisuus	Metsätähdehake	Jyrsinturve
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	8 MJ/kg	9,6 MJ/kg
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa	2 %	5,1 %
Kosteuspitoisuus	50 %	48,5 %
C	51,30 %	54,50 %
H	6,10 %	5,58 %
N	0,40 %	2,01 %
O	42,18 %	37,72 %
S	0,02 %	0,19 %

Taulukossa 2 on esitetty polttoaineiden koostumukset yhtä kilogrammaa polttoainetta kohden taulukon 1 tietojen pohjalta.

Taulukko 2. Polttoaineiden koostumukset.

Koostumus	Metsätähdehake [g]	Jyrsinturve [g]
Polttoainetta	1000	1000
Vettä	500	485
Kuivaa polttoainetta	500	515
Tuhkaa	10	26
Kuivaa ja tuhkatonta polttoainetta	490	489
C	251	267
H	30	27
N	2	10
O	207	184
S	0	1

Laskennan yksinkertaistamiseksi oletetaan typpi inertiksi kaasuksi eli typpi ei reagoi hapen kanssa muodostaen typenoksideja. Tämän lisäksi palamisilman oletetaan olevan kuivaa. Savukaasujen määrää laskettaessa huomioidaan hiilen, vedyn ja rikin palamisreaktiot (R1-R3).



Savukaasulaskuissa tarvittavat alkuaineiden moolimassat on koottu jaksollisesta järjestelmästä taulukkoon 3.

Taulukko 3. Alkuaineiden moolimassat.

Moolimassat	[g/mol]
C	12,01
H	1,008
N	14,01
O	16,00
S	32,07

Taulukoissa 4 ja 5 esitetään hakkeen ja jyrsinturpeen palamisessa syntyvien savukaasujen laskenta tarkemmin. Taulukkoon 6 on koottu polttoaineiden palamisessa syntyvien savukaasujen määrät ja koostumukset.

Taulukko 4. Hakkeen palamisessa syntyvät savukaasut poltettaessa 1000 g haketta.

Polttoaine	m [g]	M [g/mol]	n[mol]	Hapen tarve [mol]	CO ₂ [mol/kg _{pa}]	H ₂ O [mol/kg _{pa}]	SO ₂ [mol/kg _{pa}]	N ₂ [mol/kg _{pa}]	O ₂ [mol/kg _{pa}]
C	251,4	12,01	20,93	20,93	20,93				
H	29,9	1,01	29,66	14,83		14,83			
N	2,0	14,01	0,14					0,14	
O	206,7	16,00	12,92	-12,92					
S	0,1	32,07	0,00	0,00			0,00		
H ₂ O	500,0	18,02	27,75			27,75			
Tuhka	10,0								
Yhteensä	1000,00			22,84	20,93	42,58	0,00	0,14	
Yli-ilmaa Palamisilman tyyppi								111,94	6,85
Yhteensä				22,84	20,93	42,58	0,00	112,08	6,85

Taulukko 5. Turpeen palamisessa syntyvät savukaasut poltettaessa 1000 g turvetta.

Polttoaine	m [g]	M [g/mol]	n[mol]	Hapen tarve [mol]	CO ₂ [mol/kg _{pa}]	H ₂ O [mol/kg _{pa}]	SO ₂ [mol/kg _{pa}]	N ₂ [mol/kg _{pa}]	O ₂ [mol/kg _{pa}]
C	266,4	12,01	22,18	22,18	22,18				
H	27,3	1,01	27,06	13,53		13,53			
N	9,8	14,01	0,70					0,70	
O	184,4	16,00	11,52	-11,52					
S	0,9	32,07	0,03	0,03			0,03		
H ₂ O	485,0	18,02	26,92			26,92			
Tuhka	26,3								
Yhteensä	1000,00			24,21	22,18	40,45	0,03	0,70	
Yli-ilmaa Palamisilman tyyppi								118,66	7,26
Yhteensä				24,21	22,18	40,45	0,03	119,36	7,26

Taulukko 6. Hakkeen ja turpeen palamisessa syntyvien savukaasujen koostumus.

Komponentti	Hake [g/kg _{pa}]	Turve [g/kg _{pa}]
CO ₂	921	976
H ₂ O	767	729
SO ₂	0	2
N ₂	3141	3345
O ₂	219	232
Yhteensä	5048	5284

Kattilan polttoainetehon laskenta

Sivulla 24 esitettyjen lähtötietojen perusteella voidaan laskea, että pyrolyysin raaka-aineesta tulee haihduttaa vettä noin 2,2 kg/s, jotta saavutetaan haluttu kosteuspitoisuus eli 8 %. Kuivauksen energiankulutus voidaan laskea yhtälöllä (1).

$$\phi_K = q_{m,H_2O} \cdot h, \quad (1)$$

missä ϕ_K = kuivauksen energiankulutus [MW]

q_{m,H_2O} = haihdutettavan veden massavirta [kg/s]

h = haihdutuksen energiankulutus [MJ/kg_{H2O}]

Savukaasusta saatava lämpömäärä voidaan laskea yhtälöllä 2.

$$\phi_{sk} = c_{p,sk} \cdot q_{m,sk} \cdot \Delta T_{sk}, \quad (2)$$

missä ϕ_{sk} = savukaasusta saatava lämpömäärä [MW]

$c_{p,sk}$ = savukaasun ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

$q_{m,sk}$ = savukaasun massavirta [kg/s]

ΔT_{sk} = savukaasun lämpötilaero [K]

Koska pelkkää turvetta poltettaessa savukaasujen määrä on pienempi kuin pelkkää haketta poltettaessa, lasketaan kattilan polttoaineteho pelkän turpeen polton mukaan. Tällä tavalla laskettu polttoaineteho on niin suuri, että savukaasujen määrä riittää raaka-aineen kuivaukseen myös muilla polttoainesuhteilla. Savukaasun massavirta voidaan laskea yhtälöllä 3.

$$q_{m,sk} = \frac{\phi_{pa} \cdot s_{turve}}{Q_{net,ar,turve}}, \quad (3)$$

missä ϕ_{pa} = polttoaineteho [MW]

s_{turve} = turpeen poltossa syntyvien savukaasujen määrä [kg/kg_{pa}]

$Q_{net,ar,turve}$ = saapumistilaisen turpeen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]

Polttoaineteho voidaan ratkaista asettamalla kuivauksen energiankulutus ja savukaasuista saatava lämpömäärä yhtä suuriksi.

$$q_{m,H_2O} \cdot h = c_{p,sk} \cdot \frac{\phi_{pa} \cdot s_{turve}}{Q_{net,ar,turve}} \cdot \Delta T_{sk} \quad (4)$$

$$\rightarrow \phi_{pa} = \frac{q_{m,H_2O} \cdot h \cdot Q_{net,ar,turve}}{c_{p,sk} \cdot s_{turve} \cdot \Delta T_{sk}} \quad (5)$$

Rumpukuivurin haihdutuksen energiankulutuksena käytetään 4MJ/kg_{H₂O} (Fagnäs et al. 2010). Kuivuriin menevän savukaasun lämpötilaksi on valittu 180 °C. Tässä työssä oletetaan, että voimalaitoksesta on saatavissa tämän lämpöistä savukaasua ilman, että voimalaitoksen toimintaan tarvitsee tehdä muutoksia. Samalla oletetaan, että voimalaitoksen sähkö- ja lämpöteho eivät pienene kattilan ja pyrolysaattorin integroinnin seurauksena. Tällöin voidaan olettaa, että raaka-aineen kuivauksesta ei aiheudu päästöjä. Savukaasun lämpötila kuivurin jälkeen (60 °C) on valittu siten, että savukaasun sisältämä ja raaka-aineesta kuivurissa haihtuva vesi ei pääse tiivistymään kuivurin pintoihin. Savukaasun ominaislämpökapasiteetti on laskettu savukaasun keskimääräisessä lämpötilassa (120 °C) savukaasukomponenttien massaosuuksien suhteessa. Polttoainetehon laskentaan käytettävät arvot on koottu taulukkoon 7.

Taulukko 7. Polttoainetehon laskennassa käytettävät arvot.

Suure	Arvo	Yksikkö
Haihdutettavan veden massavirta	2,2	kg _{H2O} /s
Haihduksen energiankulutus	4	MJ/kg _{H2O}
Savukaasun lämpötila ennen kuivuria	180	°C
Savukaasun lämpötila kuivurin jälkeen	60,0	°C
Lämpötilaero	120,0	°C
Savukaasun ominaislämpökapasiteetti	1,4	kJ/kgK

Yhtälöllä (1) voidaan laskea, että raaka-aineen kuivaukseen tarvitaan energiaa 8,7 MW. Tällöin kattilan polttoainetehoksi saadaan yhtälöstä (5) noin 96 MW. Tämän kokoinen kattila riittää laskelmien mukaan tuottamaan kuivaukseen tarvittavan savukaasun kaikilla polttoaineiden seossuhteilla kattilan käydessä täydellä teholla. Silloin kun kattilassa poltetaan pelkkää haketta, syntyy savukaasuja yli kuivauksen tarpeen.

Sähkö- ja lämpötehon laskenta

Sähkö- ja lämpöteho lasketaan polttoainetehosta kokonaishyötysuhteen ja rakennusasteen avulla. Rakennusasteella (yhtälö 6) kuvataan sähkötehon suhdetta lämpötehoon ja kokonaishyötysuhteella (yhtälö 7) kauko- ja lämpötehojen summan suhdetta polttoainetehoon.

$$\sigma = \frac{P_e}{\phi_{KL}}, \quad (6)$$

missä P_e = sähköteho [MW]

σ = rakennusaste [-]

ϕ_{KL} = kaukolämpöteho [MW]

$$\eta_{tot} = \frac{\phi_{KL} - P_e}{\phi_{pa}}, \quad (7)$$

missä η_{tot} = kokonaishyötysuhde [-]

Hyötysuhteeksi on valitaan 0,85 ja rakennusasteeksi 0,5. Molemmat arvot ovat tyypillisiä yhteiskunnan CHP-voimalaitokselle. Yhtälöistä (6) ja (7) saadaan ratkaistua sähkötehoksi 27 MW ja lämpötehoksi 54 MW.

Taulukko 1. Päästötase tapaukselle 1a.

Pyrolysaattori		
Syötteet	Energiamäärä [MJ]	Päästö [gCO₂]
Sähkö		2386800000
Raaka-aine		2628240521
Hiekka		7958349295
Tuotokset		
Pyrolyysiöljy	697996800	6665036048
Kaasu ja hiiltojäännös	660643200	6308353768
Kattila		
Syötteet	Energiamäärä [MJ]	Päästö [gCO₂]
Turve		120738628800
Hake		3439914368
Kaasu ja hiiltojäännös		6308353768
Tuotokset		
Sähkö	783360000	40842849214
Kaukolämpö	1566720000	81685698427
Hiekka	152640000	7958349295

Taulukko 2. Päästötase tapaukselle 1b.

Pyrolysaattori		
Syötteet	Energiamäärä [MJ]	Päästö [gCO₂]
Sähkö		2386800000
Raaka-aine		9490066435
Hiekka		8607108884
Tuotokset		
Pyrolyysiöljy	697996800	10523574474
Kaasu ja hiiltojäännös	660643200	9960400844
Kattila		
Syötteet	Energiamäärä [MJ]	Päästö [gCO₂]
Turve		120738628800
Hake		10425076395
Kaasu ja hiiltojäännös		9960400844
Tuotokset		
Sähkö	783360000	44172332385
Kaukolämpö	1566720000	88344664771
Hiekka	152640000	8607108884

Taulukko 3. Päästötase tapaukselle 1c.

Pyrolysaattori		
Syötteet	Energiamäärä [MJ]	Päästö [gCO₂]
Sähkö		2386800000
Raaka-aine		37281481963
Hiekka		11238788906
Tuotokset		
Pyrolyysiöljy	697996800	26153339048
Kaasu ja hiiltojäännös	660643200	24753731822
Kattila		
Syötteet	Energiamäärä [MJ]	Päästö [gCO₂]
Turve		120738628800
Hake		38781366919
Kaasu ja hiiltojäännös		24753731822
Tuotokset		
Sähkö	783360000	57678312878
Kaukolämpö	1566720000	115356625756
Hiekka	152640000	11238788906

Taulukko 1. Oletusarvoilla lasketut tulokset tapaukselle 1.

Tapaus 1a	Päästö [gCO_{2ekv}/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,05
–Tuotanto	1,80
Sähkö	1,68
Lämpö	5,59
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	12,30
Tapaus 1b	Päästö [gCO_{2ekv}/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,05
–Tuotanto	1,80
–Maaperän hiilitaseen muutos 100 a	4,82
Sähkö	1,68
Lämpö	6,05
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	17,58
Tapaus 1c	Päästö [gCO_{2ekv}/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,05
–Tuotanto	1,80
–Maaperän hiilitaseen muutos 20 a	24,35
Sähkö	1,68
Lämpö	7,90
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	38,96

Taulukko 2. Oletusarvoilla lasketut tulokset yksinkertaistetulle tapaukselle 1.

Tapaus 1a	Päästö [gCO_{2ekv}/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,05
–Tuotanto	1,80
Sähkö	1,68
Lämpö	5,32
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	12,03
Tapaus 1b	Päästö [gCO_{2ekv}/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,05
–Tuotanto	1,80
–Maaperän hiilitaseen muutos 100 a	4,82
Sähkö	1,68
Lämpö	5,69
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	17,22
Tapaus 1c	Päästö [gCO_{2ekv}/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,05
–Tuotanto	1,80
–Maaperän hiilitaseen muutos 20 a	24,35
Sähkö	1,68
Lämpö	7,18
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	38,24

Taulukko 3. Oletusarvoilla lasketut tulokset tapaukselle 2.

Tapaus 2a	Päästö [gCO₂ekv/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,02
–Tuotanto	0,81
Hake kattilaan	
–Metsän kasvatus	0,03
–Tuotanto	1,01
–Poltto	0,29
Turve kattilaan	46,82
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	52,17
Tapaus 2b	Päästö [gCO₂ekv/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,02
–Tuotanto	0,81
–Maaperän hiilitaseen muutos 100 a	2,18
Hake kattilaan	
–Metsän kasvatus	0,03
–Tuotanto	1,01
–Poltto	0,29
–Maaperän hiilitaseen muutos 100 a	2,72
Turve kattilaan	46,82
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	57,06
Tapaus 2c	Päästö [gCO₂ekv/MJ]
Raaka-aine	
–Metsän kasvatus	0,02
–Tuotanto	0,81
–Maaperän hiilitaseen muutos 20 a	10,99
Hake-kattilaan	
–Metsän kasvatus	0,03
–Tuotanto	1,01
–Poltto	0,29
–Maaperän hiilitaseen muutos 20 a	13,71
Turve kattilaan	46,82
Etanoli	2,08
Pyrolyysiöljyn jakelu	1,10
Yhteensä	76,87