

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

BH10A0300 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**PYROLYYSIÖLJYN POLTON EDELLYTYKSET JA
VAIKUTUKSET LÄMPÖKESKUSKÄYTÖSSÄ**

**The effects and requirements of pyrolysis oil use in district heating
applications**

Työn tarkastaja: Professori, TkT Mika Horttanainen

Työn ohjaaja: Tutkijaopettaja, TkT Mika Luoranen

Lappeenrannassa 23.01.2011

0319486 Juho Innanen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	3
1 JOHDANTO	5
2 PYROLYYSIÖLJYN VALMISTUS JA RAAKA-AINEET	7
2.1 Pyrolysointiprosessin historia ja nykytila	7
2.2 Fast-pyrolyysi.....	8
2.3 Pyrolyysiöljyn raaka-aineet.....	8
2.4 Tuotantoketjut ja integroitu tuotanto.....	9
2.5 Laatu ja standardointi	11
2.6 Hinta ja saatavuus	12
3 PYROLYYSIÖLJYN POLTTOAINEOMINAISUUKSIA JA ERITYISPIIRTEITÄ	13
3.1 Viskositeetti	14
3.2 Jähmepiste, sameapiste ja leimahduspiste.....	14
3.3 Happamuus.....	15
3.4 Lämpöarvo	15
3.5 Kiintoainepitoisuus	15
3.6 Tuhkapitoisuus	16
3.7 Vesipitoisuus	17
3.8 Stabiilius.....	18
3.8.1 Ikääntyminen	18
3.8.2 Lämpötilan vaikutus	19
3.8.3 Haihtuminen ja hapettuminen	20
3.9 Homogeenisuus	20
4 CASE: HANASAAREN HUIPPU- JA VARALÄMPÖKESKUS	21
4.1 Perustiedot lämpökeskuksesta.....	21
4.2 Lämpökeskuksen toimintaperiaate.....	22
4.3 Pyrolyysiöljyn käytön materiaalivaatimuksia	23
4.4 Pyrolyysiöljyn varastointi	24
4.5 Vaikutukset tehoon.....	25
4.6 Vaikutukset hiilidioksidipäästöihin.....	26
5 PYROLYYSIÖLJYN POLTON HIUKKASPÄÄSTÖT.....	27

5.1 Laskentamallin kuvaus.....	28
5.2 Tulokset.....	29
5.3 Herkkyysanalyysi ja arviointi	29
5.4 Polttokokemuksia pyrolyysiöljyllä.....	32
5.5 Hiukkaspäästöjen vähennysmenetelmät.....	33
5.5.1 Emulsiopoltto ja mikroräjähdykset	33
5.5.2 Syklonit	34
5.5.3 Muita tekniikoita	35
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	37
7 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA	39
LÄHTEET	40

LIITTEET

Liite 1 Savukaasulaskut

Liite 2 Kiintoainepitoisuus vs tuhkapitoisuus

Liite 3 Hiilidioksidipäästöt

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Suureet

c_{th}	hiukkaspäästötaso	[mg/m ³ n]
E_{ref}	referenssitilan happipitoisuus	[tilavuus-%]
E_{th}	savukaasun happipitoisuus	[tilavuus-%]
H_{pa}	polttoaineen tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg, GJ/t]
m_{ash}	tuhkapitoisuus	[mg/kg _{pa}]
P_{pa}	polttoaineteho	[MW, kW]
q_m	massavirta	[kg/h]
V_{dn}	kuiva ominaissavukaasumäärä	[m ³ n/kg _{pa}]
x_{ROC}	hehkutusjäännös	[massa-%]
μ	kinemaattinen viskositeetti	[cSt, mm ² /s]
ρ	tiheys	[kg/dm ³ , t/m ³]
η	kattilan ja kanavan erotustehokkuus	[massa-%]

Alkuaineet, yhdisteet ja materiaalit

AISI 316	haponkestävä teräslaatu
C	hiili
Ca	kalsium
CO ₂	hiilidioksidi
CO _{2eq}	hiilidioksidiekvivalentti
H	vety
K	kalium
MeOH	metanoli
N	typpi
Na	natrium
NO _x	nypen oksidit NO ₂ ja NO
O	happi
PEG400	polyetyleeniglykoli 400
PE-HD	polyetyteeni, korkeatiheyksinen
PE-LD	polyetyteeni, matalatiheyksinen
PP	polypropyleeni

S	rikki
SO ₂	rikkidioksidi

Lyhenteet

BAT	Best available technique, Paras käyttökelpoinen tekniikka
CCR	Conradson carbon residue, hiiltojäännös
CFB	Circulating fluidized bed, kiertoileijupeti
CHP	Combined heat and power, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
IE-direktiivi	direktiivi teollisuuden päästöistä, Directive on Industrial Emissions
IPPC	International panel on pollution prevention and control
LHV	alempi (tehollinen) lämpöarvo
LOI	loss on ignition
POR	raskas polttoöljy
TOC	total organic carbon
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

1 JOHDANTO

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu on johtanut kasvihuoneilmiön voimistumiseen ja ilmakehän lämpenemiseen. Tämän ilmastonmuutokseksi kutsutun ilmiön vaikutukset ovat havaittavissa esimerkiksi mannerjäätiköiden ja ikeroudan sulamisena. On ennustettu, että maapallon keskilämpötilan kohotessa mm. uusia lajeja tulee uhanalaisiksi, merenpinta nousee entisestään ja meteorologiset ääri-ilmiöt tulevat yleistymään. Yli puolet maapallon ilmastolle haitallisista kasvihuonekaasupäästöistä tulee fossiilisten polttoaineiden käytöstä, joten päättäjät sekä Suomen että EU:n tasolla ovat reagoineet asettamalla hiilidioksidipäästöjen vähennys- ja uusiutuvan energian osuuden lisäämistavoitteita. EU:n niin kutsuttu 20-20-20-tavoite pitää sisällään uusiutuvien energiamuotojen osuuden kasvattamisen 20%:iin, hiilidioksidipäästöjen vähentämisen 20%:lla ja energiatehokkuuden parantamisen 20%:lla vuoteen 2020 mennessä.

Biopolttoaineiden käyttö on yksi keino vähentää hiilidioksidipäästöjä ja korvata fossiilisia polttoaineita. Tässä työssä selvitettiin edellytyksiä korvata fossiilista raskasta polttoöljyä kaukolämpökattiloissa biomassasta valmistettavalla pyrolyysiöljyllä. Pyrolyysiöljy on uusiutuvaa, sillä sen raaka-aineet ovat osa elollista luontoa. Luonnon hiilikiertoon kuuluvana sen käyttö on myös hiilidioksidineutraalia. Se on lisäksi useisiin muihin biopolttoaineisiin (esim. puuhake) verrattuna energiatiheämpää (Oasmaa & Meier 2004, 1).

Tämä tutkimus tehtiin Helsingin Energialle kandidaatin tutkintoon kuuluvana opinnäytetyönä. Puusta nopeasti kuumentamalla tislattava pyrolyysiöljy, bio-öljy, on yksi ehdokas korvaamaan raskasta tai kevyttä polttoöljyä kaukolämpökattiloissa, teollisuudessa tai sähköntuotannossa. Sillä voi olla myös sovellusalueita kaasuturbiineissa ja dieselmoottoreissa. Helsingin Energialla on tutkittu myös, miten paperiteollisuuden sivutuote mäntyöljypiki soveltuisi lämpölaitoskäyttöön. Pyrolyysiöljyä on maailmalla onnistuneesti kokeiltu kattilapoltossa useita kertoja. Pyrolyysiöljyn houkuttelevuutta lisää mahdollisuus olemassa olevan lämpökattilainfrastruktuurin käyttämiseen hiilidioksidipäästöjen hillinnässä ja tuontienergiariippuvuuden vähentämisessä. Lämpökeskuksiin tai bio-öljyyn kuitenkin joudutaan tekemään muutoksia, jotta jatkuva poltto olisi mahdollista.

Työn kirjallisuusosassa tarkasteltiin tärkeimpiä pyrolyysiöljyn polttoaineominaisuuksia kuten viskositeettia, tuhkapitoisuutta, happamuutta, lämpöarvoa ja vesipitoisuutta. Lisäksi selvitettiin ekonomiaa, saatavuutta, ehdotettuja laatuluokkia ja pyrolyysiöljyn ominaispiirteitä varastointikäyttäytymisen osalta. Työn käytännön osassa tarkasteltiin esimerkkilaitoksena vuonna 2009 valmistunutta Hanasaaren huippu- ja varalämpökeskusta, jossa kuudesta raskaan polttoöljyn kattilasta kahdessa on pyrolyysiöljyn matalan pH-arvon kestävät polttimet.

Uuden IE-direktiivin (2007/0286/KOM) kiristyvät päästönormit etenkin hiukkaspäästöjen osalta voivat olla sekä haaste että mahdollisuus pyrolyysiöljyn käyttämiselle. Vuonna 2016 voimaan tuleva IPPC-direktiivin korvaava IE-direktiivi asettaa nestemäistä polttoainetta käyttäville laitoksille tiukat päästövaatimukset. Hanasaaren lämpökeskuksen nykyisen hiukkasraja-arvon 70 mg/m^3 n sijaan raja-arvo tulee olemaan 25 mg/m^3 n, mikä on kokemuksen ja teorian perusteella raskaalla polttoöljyllä täysin mahdotonta saavuttaa ilman puhdistuslaitteita, ja pelkkä syklonikaan tuskin riittää savukaasujen puhdistukseen (Huhtinen 2006, 117; IPPC 2006). Raskaan polttoöljyn rikkipitoisuus on myös niin suuri, ettei rikkidioksidinkaan osalta uusiin päästörajoihin päästä ilman rikinerotuslaitteistoa. Näin ollen pyrolyysiöljy kilpailisi matalarikkisen kevyen polttoöljyn tai maakaasun kanssa direktiivin astuessa voimaan.

Tässä polttoaineteholtaan 299 MW lämpökeskuksessa oli tavoitteena arvioida mahdollinen tehon alenema, syntyvä hiukkaspäästötaso sekä arvio päästönvähennystoimenpiteistä haluttuun raja-arvoon pääsemiseksi. Työtä rajattiin niin, että sivuttiin saatavuuskysymystä, mutta jätettiin tarkemmat kustannusarviot kandidaatintyön ulkopuolelle ja suljettiin pois sähkö- ja letkusuodatin päästönvähennystekniikoista. Tässä työssä keskitytään pääasiassa metsäteollisuuden sivutuotteista valmistettuun pyrolyysiöljyyn, koska raaka-ainetta Suomen olosuhteissa on runsaasti, hiilidioksidipäästöt ovat neutraalit, laatu on hieman parempaa kuin maatalouden sivutuotteista valmistetun öljyn ja tutkimustietoa on paljon.

2 PYROLYYSIÖLJYN VALMISTUS JA RAAKA-AINEET

2.1 Pyrolysointiprosessin historia ja nykytila

Pyrolyysillä eli kuivatislauksella on pitkät perinteet. Teollisessa vallankumouksessa 1800-luvun alkupuolella kivihielestä alettiin tuottaa pyrolyysillä koksia, joka mahdollisti halvan teräksen valmistuksen. Suomessa perinteinen tervan miilupoltto oli myös eräänlainen pyrolyysiprosessi. Edellä mainitut edustavat hitaan lämmitysnopeuden pyrolyysiä.

Biomassan muuntamisessa nestemäiseksi polttoaineeksi yksi tehokkaimmista ja laajimmin tutkituista keinoista on nk. fast-pyrolyysi, jota alettiin ymmärtää paremmin vasta 1980-luvun alussa (Venderbosch & Prins 2010). 80- ja 90-luvuilla kehitystyö keskittyi lähinnä erilaisiin pyrolyysireaktorityyppeihin, kunnes 90-luvun loppupuolella prosessin toteuttaminen nousi pintaan ja useita pilottilaitteistoja rakennettiin Espanjassa, Italiassa, Isossa-Britanniassa, Kanadassa, Suomessa ja Hollannissa. (Venderbosch & Prins 2010.)

Laitteiston kapasiteettia kuvataan usein pyrolyysiöljyn tuntisaannolla (kg/h), jossa vaihteluväli on laboratorioskaalan sadoista grammoista pilottilaitteistojen satoihin kilogrammoihin ja aina demolaitosten tuhansiin kilogrammoihin tunnissa. Kaupallisia sovelluksia pyrolyysiöljyllä on tähän mennessä ollut lähinnä elintarviketeollisuudessa, jossa pyrolyysiöljystä valmistetaan savuaromeja. Aiemmin mainitut pilottilaitteistot eivät suurilta osin ole enää toiminnassa. Venderboschin mukaan tämä saattoi johtua tuon aikaisesta uskonpuutteesta kaupallisiin näkyymiin ja markkinatilanteeseen tai lainsäädännöllisistä syistä (Venderbosch & Prins 2010). Näin kävi esimerkiksi Suomessa Fortumin Foresteratm -öljyn valmistukselle loppuvuonna 2003: ”Tuotteen markkinoille saamisen esteeksi ovat [...] nousseet taloudelliset seikat, sillä raaka-aineena käytettävän puuhakkeen hinta ja saatavuus ovat kehittyneet epäsuotuisaan suuntaan. Seuraavan vaiheen tuotanto ajateltiin käyttää ruotsalaisessa kaukolämmön tuotannossa, jossa kuitenkin verotuskohtelu muuttuu ensi vuoden alusta Foresteran kannalta epäedulliseen suuntaan.” (Fortum 2003).

Kaupallisen kokoluokan laitokset tulevat tuottamaan pyrolyysiöljyä mittakaavassa 2 – 200 t/h ja niitä on useita suunnitteilla ja rakenteilla sekä Euroopassa että Yhdysvalloissa.

Yhdysvalloissa ja Australiassa tutkimusta on tehty paljon viime vuosina pyrolyysiöljyn jalostamiseen liikennekäyttöön esim. vetykäsittelyllä. Pyrolyysiöljyn pioneeriyrityksiin kuuluvat Ensyn ja Dynamotive valmistavat Yhdysvalloissa ja Kanadassa jo nyt pyrolyysiöljyä energiantuotantoon, mutta Euroopassa on vasta rakenteilla ensimmäinen tonninkokoluokan laitos. (Pyne 2010.)

2.2 Fast-pyrolyysi

Fast- tai Flash-pyrolyysiprosessissa hienoksi jauhettu biomassa kuumennetaan nopeasti hapettomassa tilassa noin 500 °C lämpötilaan, joka saa aikaan raaka-aineen hajoamisen höyryiksi ja aerosoleiksi, jotka sitten kondensoidaan lauhduttimessa bio-öljyksi. Jäljelle jää aina myös hiiltojäännös ("char") ja kaasumainen osuus, jotka voidaan käyttää *in situ* prosessin lämmöntarpeeseen. Käytettävästä biomassasta saadaan tyypillisesti noin 60 - 70 paino- % talteen öljyksi. Biomassan sisältämästä energiasta saadaan öljyksi hieman pienempi osuus, noin 55 – 65 %. Silti osa kokonaisenergiasta saadaan talteen myös hiilenä, raaka-aineen kosteuspitoisuudesta riippuen. (Venderbosch & Prins 2010, 118.)

Hieman yli 500 °C on optimaalinen lämpötila pyrolyysille, jossa tavoitteena on juuri nestejakeen mahdollisimman suuri osuus – alempi lämpötila tuottaa enemmän hiiltä, ja korkeampi enemmän kaasua. Lisäksi kaasufaasilla on oltava lyhyt viipymäaika (0,2 - 2 s). Tavoitteena on saada pyrolyysikaasut kondensoitumaan juuri oikealla hetkellä, jottei sekundäärisiä lämpökrakkautumisia pääsisi tapahtumaan. Nopeaan ja tasaiseen lämmönsiirtoon käytetään yleisesti kuumaa hiekkaa ja erilaisia reaktorityyppejä on monia. (Bridgwater 1999.)

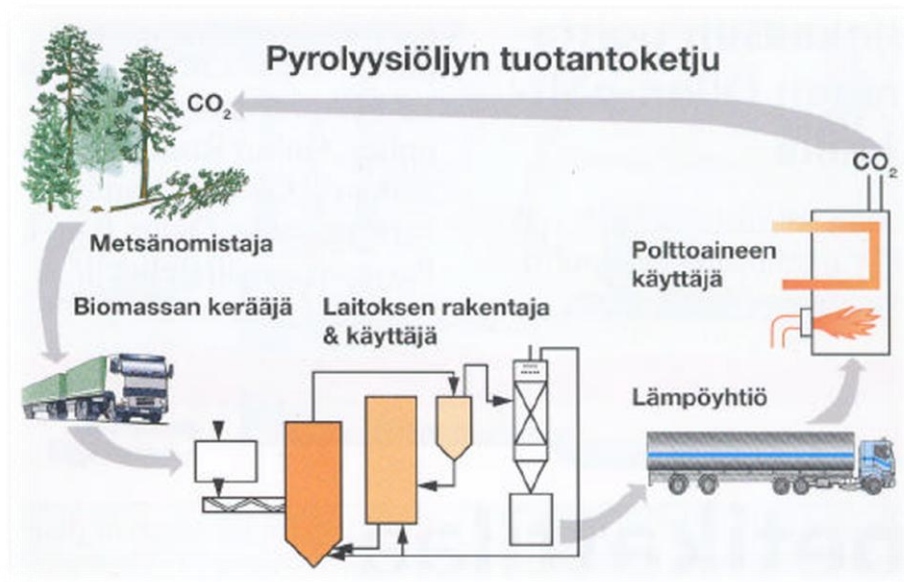
2.3 Pyrolyysiöljyn raaka-aineet

Pyrolyysiöljyn raaka-aineena voidaan käyttää lähes mitä tahansa biomassaa. Suomessa koepyrolyysilaitoksissa on tutkittu metsäteollisuuden ja maatalouden sivutuotteita ja aiemmin myös turvetta. Nykyisin tutkimus Euroopassa on keskittynyt lähinnä puupohjaisiin jakeisiin kuten hakkuutähde, kuori ja eri puulajit. Amerikassa tutkitaan vuonna 2010 myös maatalouden sivutuotteita ja on suunnitteilla laitos, joka tuottaisi 5 tonnia pyrolyysiöljyä päivässä kananlannasta. (Pyne 2010.)

Tavoitteena valmistuksessa on palamisominaisuuksiltaan hyvä öljy hyvällä saannolla mahdollisimman halvoin tai jopa ilmaisin raaka-ainein, joten esimerkiksi sahanpurua pidetään yleisesti korkealuokkaisena referenssiraaka-aineena. Oljesta ja erilaisista hakkuutähteistä valmistetuilla suodattamattomilla pyrolyysiöljyillä on tyypillisesti korkeahko tuhka- ja typpipitoisuus (0,2-0,4 p-%). Olkiöljyssä on myös hieman enemmän rikkiä (0,04-0,05 %) ja alkalimetalleja (esim. K 0,9 %). (Oasmaa et al. 1997.)

2.4 Tuotantoketjut ja integroitu tuotanto

Mahdollisia tuotantoketjuja metsäbioenergian käytölle on monia. Pyrolyysiöljyn sanotaan olevan hyvä energiankantaja kuljetuksiin (kuva 1), sillä se on metsähakkeeseen verrattuna energiatiheydeltään yli kuusinkertainen. Pyrolyysiöljyn tuotanto on pohjimmiltaan logistinen ratkaisu, tosin sillä on nestemäisen polttoaineen etuja (mahdollisuus käyttää kaasuturbiinissa, käsittely pumpuin, pienempi kattila jne.). (Venderbosch & Prins 2010.)



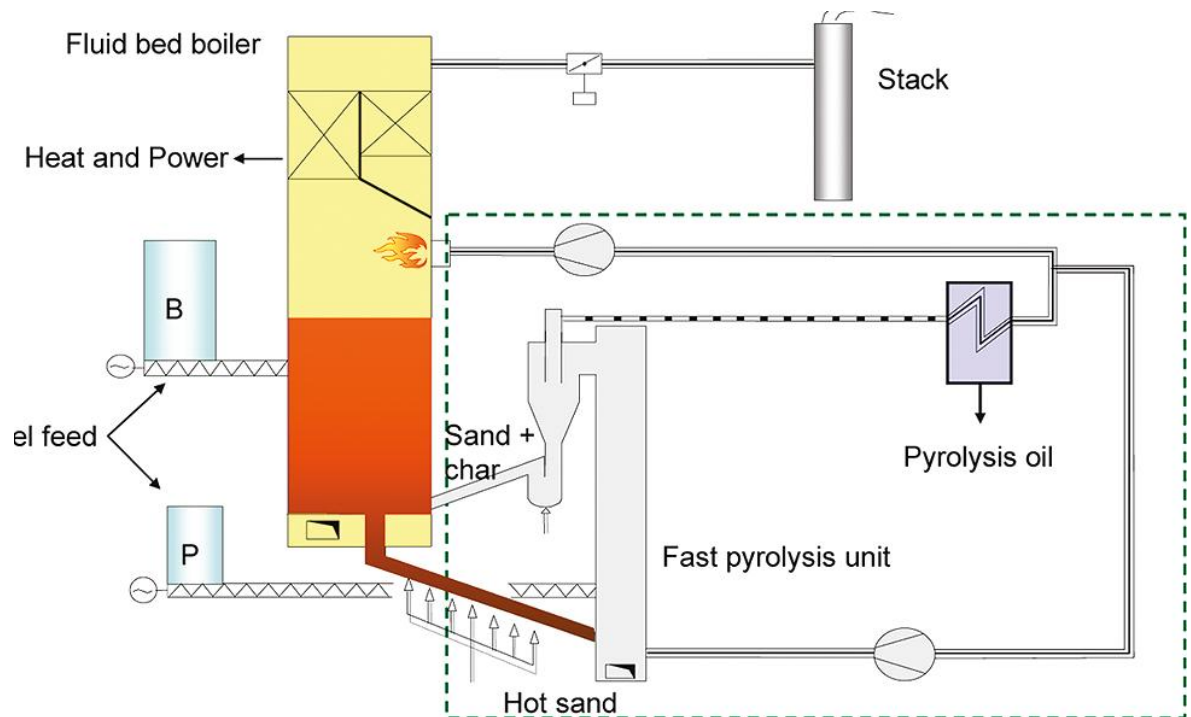
Kuva 1. Perinteinen malli pyrolyysiöljyn tuotantoketjusta (Oksanen 2001).

Suomessa yleisin hakkuutähteen käsittelymenetelmä on tienvarsihaketus, jolloin raaka-aineen esikäsittely alkaa jo metsästä, mutta esim. Kanadassa on jo toimivia mobilisoitavia pyrolyysilaitoksia. Pyrolyysilaitteiston integroimista öljyjalostamoihinkin tutkitaan (Pyne

2010). Etanolin tuotannon sivuainevirroille pyrolyysiprosessin on laskettu olevan kannattavin verrattuna mädätykseen tai kaasutukseen (Vänskä 2009).

Yhdessä ehdotetussa skenaariossa sekalainen biomassa kerättäisiin lähialueilta suuren kokoluokan laitokseen, josta pyrolyysiöljy kuljetettaisiin jatkojalostettavaksi liikennepolttoaineeksi – hieman samalla tavalla kuin etanolin tislaminen ensin hajautetusti tiettyyn vahvuuteen ja vaativampaa tekniikkaa käyttämän absoluotoinnin hoitaminen keskitetysti (Oasmaa et al. 2010, St1 2010).

Kirjoittamishetkellä Metso, UPM ja VTT demonstroivat pyrolyysiöljyä tuottavan laitoksen integroimista leijupeti-CHP-laitokseen, ja valmistetun bio-öljyn koepolttojen olisi määrä valmistua tänä vuonna (2010). Demolaitoksen kapasiteetti on 300 kg/h ja prosessissa käytetään kuumaa leijupetihiekkaa pyrolyysiprosessin lämmittämiseen ja syntyviä sivuainevirtoja (kaasu ja hiiltojäännös) CHP-kattilan lisäpolttoaineeksi (kuva 2).



Kuva 2. CHP-Leijupetikattilaan integroitu CFB-pyrolyysilaitos (Oasmaa et al. 2010)

Näin toteutettuna pyrolyysiöljytuotannon integrointi laitokseen nostaa voimalan kokonaishyötysuhdetta ja suotuisissa olosuhteissa se on myös taloudellisesti kannattavaa (Vepsäläinen 2008, Oasmaa et al. 2010). Onnistumismahdollisuudet kokeilulle ovat hyvät,

sillä mukana on teknologiatoimittaja, loppukäyttäjä/raaka-aineen toimittaja ja tutkijaorganisaatio (Lehto et al. 2009). Raaka-aine toimitetaan laitokselle esikäsiteltynä, jolloin voidaan käyttää UPM:n paperitehtaiden tai sahojen sivuainevirtoja ja hyödyntää kuivattamista syntypaikoilla hukkalämmön avulla. Tämä on myös ensimmäinen pilottilaitos, jossa käytetään öljyn laadun kannalta tärkeätä reaaliaikaista vesi- ja kiintoainepitoisuuden mittausta (Oasmaa et al. 2009).

Metsä-raaka-aineen tarjonta ja hyödyntämisteknologiat tulevat luultavasti yleistymään, sillä Suomessa on meneillään metsäteollisuuden rakennemuutos, jossa tullaan paperin kysynnän ja hinnan laskiessa panostamaan entistä enemmän energiaan ja kemiaan. UPM suunnittelee jo mahdollisesti myös pyrolyysiöljyä raaka-aineena käyttävän biopolttoainetehtaan rakentamista Kaukaan tehtaiden yhteyteen Lappeenrantaan. (Ojanperä 2010.)

2.5 Laatu ja standardointi

Pyrolyysiöljyn standardointiprosessi on työn alla ja standardointia johtaa Ensyn, yksi suurimmista pyrolyysiöljyn tuottajista ja kehittäjistä. Taulukossa 1 on listattu kehitteillä olevan standardin useiden luonnosten ja äänestysten jälkeinen ehdotus ominaisuuksista poltinpolttosovelluksiin. (Oasmaa et al. 2009.)

Taulukko 1. Odotetut pyrolyysiöljyn ominaisuudet ASTM-standardissa (Oasmaa et al. 2009)

Ominaisuus	min	max	yksikkö
Lämpöarvo	15		MJ/kg
Vesipitoisuus		30	p-%
Kiintoainepitoisuus		2,5	p-%
Viskositeetti, 40 °C		125	mm ² /s
Tiheys, 20 °C	1,1	1,3	kg/dm ³
Rikkipitoisuus		0,05	m-%
Tuhkapitoisuus		0,25	m-%
pH	ilmoitettava		
Leimahduspiste	45		°C
Jähmepiste		-9	°C

Painopiste on saada ensin yksi polttoainelaatu hyväksytyä. Tämän jälkeen voisi standardoinnissa keskittyä muihin, kuten kaasuturbiini- ja dieselmoottori-laatuihin, joissa esimerkiksi kiintoaine- ja alkalimetallipitoisuus on oltava matalampi. (Oasmaa et al. 2009).

2.6 Hinta ja saatavuus

Pyrolyysiöljyn vaihtelevasta lämpöarvosta johtuen on arvioitu, että sitä tulisi myymään energia- eikä massayksiköittäin. Pyrolyysiöljyn arvona on eräässä suomalaisessa kustannusanalyysissä (Oasmaa et al. 2010) käytetty arvoa 30 €/MWh. Kanadasta tai Brasiliasta Eurooppaan tuotuna pyrolyysiöljy maksaisi 21,6 €/MWh – 37,7 €/MWh (Bradley 2006). Tutkimuksessa on todettu, että tuontiöljy on kilpailukykyinen useilla EU-maiden öljy- ja kaasumarkkinoilla. Myös Suomen kaukolämmöntuotantoa on tarkasteltu. Hinta on kuitenkin luultavasti noussut raaka-aineiden kustannusten ja yleisen polttoainekustannustason nousun myötä, mutta lopullinen kilpailukyky riippuu verotuskohtelusta ja yli 20 MW laitoksissa päästökaupan osuudesta. Aiemmissa pyrolyysiöljyn käyttö-arvioissa ei ole välttämättä arvioitu vuonna 2005 alkaneen päästökaupan vaikutusta öljyn hintaan (2,8 - 8,5 €/MWh päästöoikeuksien hinnalla 10 - 30 €/t), joka on osaltaan nostanut raskaan polttoöljyn käyttökustannuksia ja pyrolyysiöljyn kilpailukykyä tässä kokoluokassa.

Suomessa nopean pyrolyysin laitoksia on tutkimuskäytössä VTT:llä (20 kg/h) ja nyt myös Tampereen demolaitos (300 kg/h) Metson tiloissa. Muualla maailmassa tällä hetkellä kaupallisia pyrolyysilaitoksia on vain Kanadassa ja Yhdysvalloissa. Hollantilainen yritys BTG-BTL aikoo käynnistää ensimmäisen neljästä 5 t/h laitoksistaan vuonna 2011. Pyrolyysiöljyä voi Euroopasta ostaa pieniä määriä tutkimustarkoituksiin tai suuria määriä energiantuotantoon BTG-BTL:ltä. Kanadassa öljyä myy Dynamotive. (Venderbosch & Prins 2010; Pyne 2010; BTG-BTL; Dynamotive 2009.)

Monilta ominaisuuksiltaan fossiilisista öljyistä poikkeavan bio-öljyn tuominen markkinoille ei tapahdu hetkessä. Asteittaista markkinoille siirtymistä on ehdotettu: bio-öljy tulisi ensin korvaamaan polttoöljyjä kattilapoltossa, jonka jälkeen muita vaihtoehtoisia

tapoja hyödyntää bio-öljyä voitaisiin kehittää edelleen. Tarvittaisiin osoittaa toimivaksi koko ketju biomassasta pyrolysoinnin kautta lämmöntuotantoon. (Oasmaa et al. 2010.)

3 PYROLYYSIÖLJYN POLTTOAINEOMINAISUUKSIA JA ERITYISPIIRTEITÄ

Pyrolyysiöljy on tummanruskeaa juoksevaa nestettä, joka haisee savuiselle ja hieman pistävälle. Oasmaa ja Czernik (1999) ovat koonneet yhteen pyrolyysiöljyn ominaisuudet ja koostumukset noin 150:n erilaisin prosessein ja raaka-ainein valmistetuista näytteistä. Vertailun vuoksi vieressä on Suomessa yleisesti käytetty raskasöljyalaatu.

Taulukko 2. Pyrolyysiöljyn ominaisuuksia verrattuna raskaaseen polttoöljyyn. (Oasmaa & Czernik 1999; Teboil tuotetiedote 2009, Helen Öljyanalyysi)

ominaisuus	Pyrolyysiöljy eri raaka-aineista				POR180, tyypillinen
	koivu	mänty	useita, min	max	
kiintoaine, p-%	0,06	0,030	0,01	1	
pH	2,5	2,4	2,0	3,7	
vesipitoisuus, p-%	18,9	17	15	30	0,1*
tiheys kg/dm ³	1,25	1,24	1,1	1,3	0,99
Viskositeetti @ 50 °C , mm ² /s	28	28	13	80	165
tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	16,5	17,2	13	18	41,0
leimahduspiste, °C	62	95	50	100	95
jähmepiste, °C	-24	-19	-36	-9	-3
tuhkapitoisuus, p-%	0,004	0,03	0,004	0,3	0,03
CCR, p-%	20	16	14	23	12
C, p-%	44	45,7	32	49	
H, p-%	6,9	7	6,9	8,6	
N, p-%	<0,1	<0,1	0	0,2	0,3
S, p-%	0	0,02	0,00	0,05	0,9
O, p-%	49	49	44	60	
Na + K , ppm	29	22	5	500	
Ca, ppm	50	23	4	600	

3.1 Viskositeetti

Viskositeetti eli nesteen juoksevuus on tärkein ominaisuus öljyn käsittelyn kannalta. Viskositeetin kasvaessa öljystä tulee jähmeämpää, jolloin sitä on raskaampi pumpata. Sekä raskasöljyn että bio-öljyn viskositeetti pienenee lämpötilan noustessa. Bio-öljyn viskositeetiksi on ilmoitettu 50 °C lämpötilassa 13 - 80 mm²/s, joka on kevyen ja raskaan polttoöljyn välissä (taulukko 2).

Raskasöljyn pumpattavuuden takaamiseksi on viskositeetin oltava 300 - 500 mm²/s, jota varten sitä on lämmitettävä laadusta riippuen noin 40 - 80 °C:n lämpötilaan. Pumpattavuuden lisäksi on öljyllä oltava sopiva viskositeetti, jotta se sumuuntuisi tai hajoaishi riittävän pieniksi pisaroiksi polttimessa (Huhtinen 2006). Hanasaaren huippulämpökeskuksen pyöriväkuppisen raskasöljypolttimen hajotusviskositeetti on raskaalla polttoöljyllä 45 mm²/s (Saacke GmbH). Tätä vastaava käyttölämpötila on raskasöljyllä n. 75 °C. Pyrolyysiöljyillä VTT:n testaamissa useissa öljyissä tämä viskositeetti saavutettaisiin viskositeettipiirroksen mukaan alueella 30 - 50 °C (Oasmaa et al. 2001, s. 1472).

3.2 Jähmepiste, sameapiste ja leimahduspiste

Jähmepiste on alin öljyn lämpötila, jossa sitä voidaan pumpata. Kun polttoöljyn lämpötila laskee vielä noin 2-4 °C jähmepisteen alapuolelle, nousee sen viskositeetti äkkijyrkästi ja öljy jähmettyy parafiinimaisten yhdisteiden muodostaessa kiteitä (Huhtinen 2006). Pyrolyysiöljyissä ei ole juurikaan parafiinimaisia yhdisteitä, ja pyrolyysiöljyjen jähmepisteet (-36 - -9 °C) ovat huomattavasti alempia kuin raskaan polttoöljyn (-3 °C). (Oasmaa & Peacocke 2001.)

Sameapiste tulee öljyä viilennettäessä vastaan ennen jähmepistettä. Siinä parafiinimaiset hiilivedyt alkavat jo muodostaa kiteitä ja aiheuttavat pumpuilla siirrettäessä tukoksia öljysuodattimissa. Tummillle pyrolyysiöljyille sameapistettä ei pystytä määrittämään samoilla menetelmillä kuin petrolipohjaisille polttoöljyille, koska sameutta ei pystytty havaitsemaan. (Oasmaa & Peacocke 2001.)

Leimahduspiste on alin lämpötila, jossa öljystä haihtuvat höyryt muodostavat palamiskelpoisen seoksen umpinaisessa tilassa, joka voi syttyä esim. kipinästä. Sillä ei ole käytännön merkitystä nykyisissä polttimissa, mutta turvallisuussyistä ja hajuhaittojen vuoksi polttoöljyjen lämpötilan tulisi varastoinnissa olla 10 °C alle leimahduspisteen (Huttunen 2006). Oasmaan (2009) mukaan pyrolyysiöljyn alhainen leimahduspiste johtuu helposti höyrystyvistä yhdisteistä öljyssä, mutta höyrystyvä vesi tukahduttaa leimahduksen heti sen tapahduttua.

3.3 Happamuus

Pyrolyysiöljyn pH-arvo vaihtelee välillä 2 – 3.7. Näin suuri happamuus johtuu öljyn sisältämästä etikkahaposta, muurahaishaposta ja muista happamista yhdisteistä. Lämpökeskuskäyttöön tämä vaikuttaa niin, että joudutaan käyttämään happokorroosion kestäviä materiaaleja esim. venttiileissä, paineentasaajissa, pumpuissa ja polttimissa.

3.4 Lämpöarvo

Pyrolyysiöljyn alempi lämpöarvo vaihtelee välillä 13 - 18 MJ/kg joka on yli puolet pienempi verrattuna POR:n lämpöarvoon 41 MJ/kg. Pienempi lämpöarvo johtuu pyrolyysiöljyn sisältämästä vedestä ja korkeasta happipitoisuudesta. Pyrolyysiöljyn lämpöarvo kuivana on noin 20 - 21 MJ/kg. Suomessa 2004 tuotettu Forestera oli lämpöarvoltaan tyypillisesti 15 MJ/kg. Hakkuutähteestä saadaan kaksifaasista pyrolyysiöljyä, jonka yläfaasin lämpöarvo on korkeampi kuin alafaasin, mutta sen viskositeetti ja tuhkapitoisuus ovat korkeita. Kuumahöyrystys parantaisi bio-öljyn lämpöarvoa hieman, tässä työssä myöhemmin käsitellyllä kuumahöyrystysuodatetulla poppeliöljyllä lämpöarvo on 17,4 MJ/kg. (Oasmaa & Czernik 1999.)

3.5 Kiintoainepitoisuus

Kiintoainetta pyrolyysiöljyyn tulee valmistusprosessin aikana jäännöshiilipartikkeleista ja myös lämmönsiirtoon käytettävästä hiekasta. Kiintoainepitoisuuden pienentämiseen käytetään sykloneita, sähkösuodattimia tai keraamisia suodattimia. Joissain yksiköissä on

jopa kolme sykklonia peräkkäin. (Zhu et al. 2009). VTT:n valmistaman Foresteran kanssa jouduttiin käyttämään sentrifugierotusta, koska sykklonilla saavutettu kiintoainepitoisuus oli liian suuri, vaikka käytettiin moniaukkosykloniteknologiaa (Nieminen et al. 2003). Kuumahöyrysuodatus on viime vuosina ollut tutkijoiden kiinnostuksen kohteena, koska sillä voitaisiin päästä huomattavasti pienempiin tuhka- ja kiintoainepitoisuuksiin. (Pyne 2010, Oasmaa et al. 2003). Kiintoainepitoisuuden pienentämiseksi myös sisäänsyötetyn biomassan partikkelikokojakauma on oltava mahdollisimman tasainen.

Kiintoaineesta on lähinnä haittaa pyrolyysiöljyjen kattilakäytössä. Kiintoainepartikkelit pyrkivät agglomeroitumaan hitaasti nesteessä varastoinnin aikana ja muodostamaan säiliön pohjalle sakkaa. Ne myös lisäävät nesteen viskositeettiä, aiheuttavat kulumista ja tukoksia polttoaineen suuttimissa, katalysoivat ikääntymisreaktioita eivätkä pala kunnolla (Zhu et al. 2009).

On tutkittu, että kiintoainehiukkasten läsnäolo palavassa pyrolyysiöljypisarassa on yksi hiukkaspäästöjä pienentävien mikroräjähdysten laukaiseva mekanismi, mutta syntyvät mikroräjähdykset ovat heikkoja – paljon heikompia kuin raskaan polttoöljyn emulsiopoltossa. Kiintoainehiukkasten hitaan palamisen huomioon ottaen on kiintoaineesta kokonaisuuden kannalta pelkästään haittaa. (Shaddix & Tennison 1998.)

3.6 Tuhkapitoisuus

Suurin osa bio-öljyn epäorgaanisista yhdisteistä jää kiintoainehiukkasiin valmistusprosessin aikana. Näin ollen kiintoainehiukkasten tuhkapitoisuus on 3-8 kertaa korkeampi kuin raaka-aineen (Zhu et al. 2009). Tuhka- ja kiintoainepitoisuuden välillä ei silti välttämättä ole yhteyttä (liite 2). On myös merkillepantavaa, että bio-öljyn valmistus on puupolttoaineen puhdistuskeino jo sinänsä ilman merkittävää hiekka-hiiltojäännöserotusta, sillä bio-öljyn tuhkapitoisuus voi olla noin 100 kertaa alempi kuin pyrolysoitavan biomassan (Dynamotive 2009). On uskottu, että tuhkan sisältämät metalliyhdisteet aiheuttavat lämpökorroosiota ja kerrostumia lämpöpinnoille bio-öljyn polttamisen aikana (Zhu et al. 2009). Epämetalleista ainakin kloori ja sen yhdisteet ovat myös lämpökorroosiota kattilassa aiheuttavia.

Tuhkapitoisuus puusta valmistetuilla pyrolyysinesteillä (0,01 – 0,2 p-%) on tyypillisesti ollut alempi kuin oljesta valmistetuilla (0,2 – 0,3 p-%). Kuumahöyrysuodatuksella on saavutettu todella alhaisia tuhka- ja alkalimetallipitoisuuksia (0,01 p-%, 10ppm).

Bio-öljyn tuhkapitoisuus riippuu mm. käytettävän raaka-aineen tuhkapitoisuudesta, prosessiolosuhteista ja kiintoaine-hiekka-erotuksesta. Tuhkapitoisuus metsäpohjaisella raaka-aineella on suurin lehdissä, neulasissa ja kuoreissa (Oasmaa et al. 2003). Myös ylivuotisesta hakkuutähteestä valmistetun pyrolyysiöljyn tuhkapitoisuus on korkeampi kuin tuoreena kerätyn. Metsän kasvun kannalta olisi parempi, jos hakkuutähteet kerättäisiin silloin kun suurin osa neulasista on pudonnut, koska korjattaessa hakkuutähteet tuoreina viedään kasvupaikalta neulasiin kerääntyneitä typpi- ja fosforiravinteita (Tamminen 2009).

3.7 Vesipitoisuus

Korkea vesipitoisuus on pyrolyysiöljylle ominainen piirre verrattuna muihin nestemäisiin polttoaineisiin. Vesipitoisuus on seurausta käytettävän biomassan kosteudesta ja dehydraatioreaktioista fast-pyrolyysiprosessissa. Raaka-aineen kosteutta vähentämällä voidaan tuotteen vesipitoisuutta vähentää vain tiettyyn rajaan asti, johtuen dehydraatioreaktioista eli veden lohkeamisesta suuremmista molekyyleistä pyrolyysiprosessin aikana. Raaka-aineen tuhkapitoisuus korreloi lopputuotteen vesipitoisuuden kanssa, sillä biomassan sisältämät alkalimetallit katalysoivat dehydraatioreaktioita. (Oasmaa et al. 2010) Näin ollen raaka-aineen korkea tuhkapitoisuus on tältäkin osalta epäedullinen ominaisuus. Vesipitoisuus vaihtelee yleensä välillä 15 - 30 p-% riippuen prosessiolosuhteista ja esikuivatun raaka-aineen kosteudesta. Bio-öljyjen vesiliukoisuudelle on yläraja, joka määräytyy öljyn kemiallisen koostumuksen mukaan. Tämä yläraja on yleensä alueella 30 - 35 p-%, jonka jälkeen bio-öljyn homogeenisuus kärsii. Tällöin öljyn mikroemulsiorakenne tuhoutuu ja öljy pyrkii erottumaan vesimäiseen ja raskaampaan orgaaniseen faasiin.

Vettä on hankala erottaa pyrolyysiöljyistä, eikä pyrolyysiöljyä voi tislata sillä pyrolyysiöljy on herkkä lämpötilalle (kappale 3.8.2). Veden läsnäololla on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia. Kattilapolton kannalta se heikentää lämpöarvoa, lisää syttymisviivettä ja alentaa adiabaattista palamislämpötilaa. Lisäksi se voi johtaa

ennenaikaiseen höyrystymiseen ja myöhemmin syöttövaikeuksiin esilämmityksen aikana (Zhu et al. 2009).

Toisaalta vesipitoisuus auttaa alentamaan viskositeettia ja helpottaa öljyn pisaroitumista. Ennen kaikkea se on hyödyllinen ominaisuus poltonaikaisten päästöjen vähennyksessä. Vesi alentaa ja tasoittaa tulipesän lämpötilaprofiilia, jotka molemmat ovat tärkeitä NO_x-päästöjen vähentämisessä. Lisäksi vedestä tulleet OH-radikaalit voivat lieventää noen muodostumista ja lisätä sen hapettumista. (Zhu et al. 2009) Kuitenkin liian korkea vesipitoisuus on mitä todennäköisimmin epäedullinen ominaisuus päästöjen vähennyksen kannalta. Polttokokeessa huomattiin, että yli 30 % vesipitoisuus johtaa kohonneisiin hiukkaspitoisuuksiin savukaasussa (Oasmaa et al. 2003).

3.8 Stabiilius

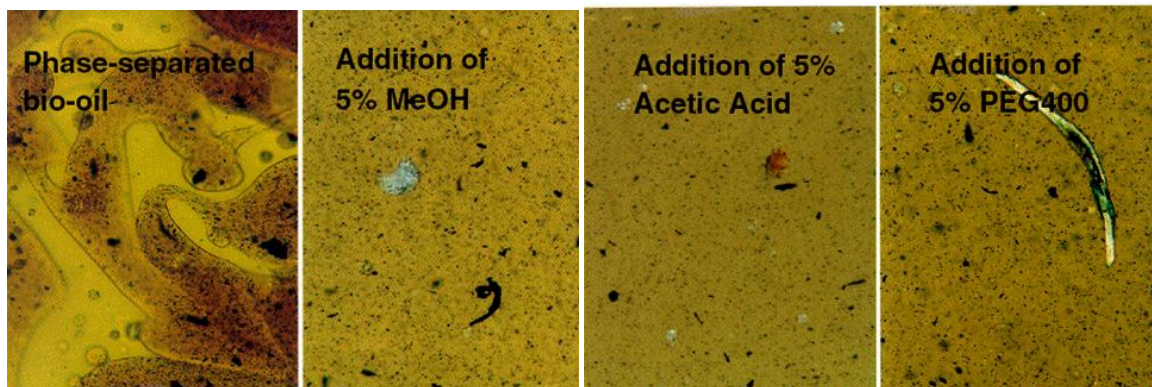
Pyrolyysinesteiden stabiiliuden eli herkkyuden muutoksille voidaan sanoa muodostuvan kolmesta osatekijästä: 1) viskositeetin hidas kasvu varastoinnin aikana (”ikäntyminen”), 2) viskositeetin nopea nousu lämmitettäessä, 3) haihtuvien yhdisteiden höyrystyminen ja hapettuminen ilmassa (Oasmaa & Kuoppala 2003). Raskas polttoöljy on stabiilimpaa kuin pyrolyysiöljy viskositeettikäyttäytymisen kannalta, mutta senkin varastoinnissa tapahtuu hapetusreaktioita (Huhtinen 2006). Stabiilius riippuu käytettävästä raaka-aineesta ja pyrolyysiprosessista. Stabiilisuutta voidaan parantaa käyttämällä sinkkioksidia katalyyttinä prosessissa tai lisäämällä valmiiseen pyrolyysinesteeseen esim. metanolia tai etanolia, jolloin pyrolyysinesteen viskositeetin kasvu ei ole niin jyrkkää ajan tai lämpötilan kasvaessa (Oasmaa et al. 2009). Esimerkiksi kun pyrolyysinesteeseen lisättiin 5 p-% etanolia, oli viskositeetin kasvu vain puolet verrattuna alkuperäisen näytteen viskositeetin kasvuun neljän kuukauden varastoinnin aikana. Etanolin teho viskositeetin alentajana ja stabiilisuuden lisääjänä ei uskota perustuvan pelkästään laimenemiseen.

3.8.1 Ikäntyminen

Pyrolyysiöljyssä tapahtuu polymerointi- ja kondensaatioreaktioiden aikaansaamia muutoksia ajan kuluessa, jotka johtavat suurien ligniinimolekyylien muodostumiseen ja vesipitoisuuden nousuun. Tutkimuksessa, jossa selvitettiin varastoitavuutta männyn

purusta, ylivuotisesta ja tuoreesta hakkuutähteestä valmistetuilla pyrolyysinesteillä, mitattiin nämä muutokset. Pääasialliset muutokset olivat samansuuntaisia kaikilla tutkittavilla nesteillä, kuten aiemmissakin tutkimuksissa. Raskaampien yhdisteiden muodostumisen myötä öljyn viskositeetti kasvaa ja myös muut öljyn ominaisuudet hiukan heikkenevät. Tätä tapahtumaketjua kutsutaan ikääntymiseksi ("aging"). Muutokset kemiallisessa koostumuksessa ja täten fysikaalisissa ominaisuuksissa noudattavat logaritmista käyrää, jossa muutos on suurinta aluksi ja heikkenee ajan myötä. (Oasmaa & Kuoppala 2003.)

Viskositeetin kasvun ja vesipitoisuuden nousun lisäksi ikääntyminen johtaa ennen pitkää orgaanisen ja vesimäisen faasin erottumiseen nesteestä. Faasien erottuminen havaittiin n. 16 varastointikuukauden jälkeen, kun öljyn vesipitoisuus oli n. 30 %. Bio-öljy voidaan kuitenkin helposti homogenisoida faasien erottumisen jälkeen (kuva 3) lisäämällä nesteeseen polaarista liuotinta (esim. etanoli, asetoni jne.). (Oasmaa & Czernik 1999.)

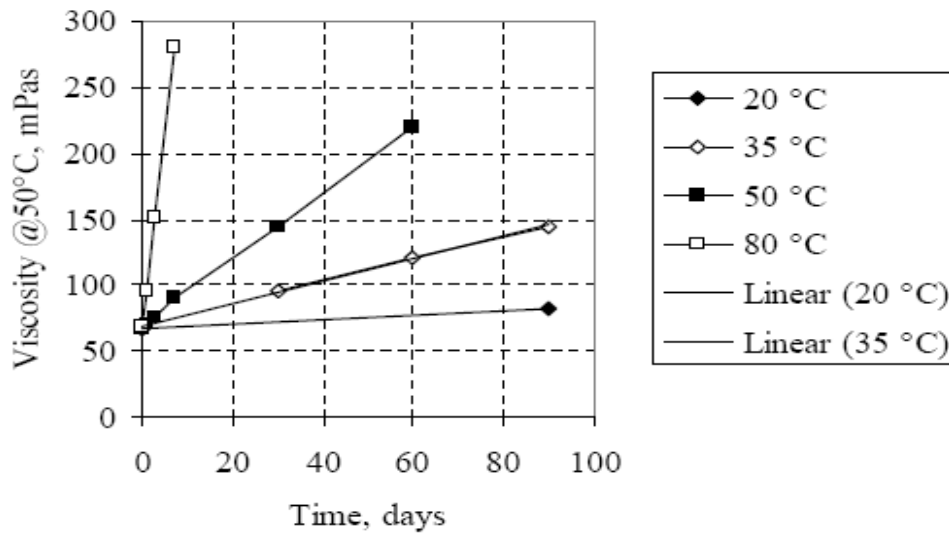


Kuva 3. Vasemmalta lähtien: 1) Faasierottunut pyrolyysiöljy; 2) homogenisointi lisäämällä 5 p-% metanolia; 3) homogenisointi lisäämällä 5 p-% etikkahappoa; 4) homogenisointi lisäämällä 5 p-% polyetyleeniglykoli 400:aa. (Oasmaa & Peacocke 2001, B5)

3.8.2 Lämpötilan vaikutus

Pyrolyysiöljyn ikääntyminen on voimakkaasti lämpötilariippuvainen ilmiö, koska lämpötilan nousu vaikuttaa eksponentiaalisesti kemiallisten reaktioiden nopeuteen Arrheniuksen yhtälön mukaan. Esimerkiksi lehtipuun pyrolyysiöljyn viskositeetti kaksinkertaistui vuoden varastoinnin jälkeen huoneenlämpötilassa, kun taas saman nesteen viskositeetti muuttui 80 °C lämpötilassa kaksinkertaiseksi jo yhden päivän varastoinnin

jälkeen (Oasmaa & Czernik 1999). Alla (kuva 4) on kuvattu lämpötilan vaikutus viskositeetin nousuun.



Kuva 4. Lehtipuun pyrolyysiöljyn viskositeetin kasvaminen eri lämpötiloissa (Oasmaa et al. 1997)

3.8.3 Haihtuminen ja hapettuminen

Jos pyrolyysiöljy jätetään alttiiksi ilmalle avoimeen säiliöön, muuttuu se ajan myötä liimamaiseksi paksuksi massaksi. Pääsyy on matalan kiehumispisteen haihtuvien yhdisteiden höyrystyminen (hapot, alkoholit) (Oasmaa et al. 1997). Hapettuminen ei ole kovinkaan merkittävässä asemassa pyrolyysiöljyn vanhenemisessä.

3.9 Homogeenisuus

Pyrolyysiöljy voi erottua kahteen tai useampaan eri faasiin pääosin kolmesta eri syystä: 1) vesipitoisuus on liian korkea 2) raaka-aineena käytetään paljon uuteaineita sisältävää materiaalia (esim. hakkuutähde) 3) pyrolyysiöljy on ikääntynyt. Myös pyrolyysiprosessin korkea lämpötila voi johtaa kahteen nestefaasiin saatavassa pyrolyysinesteessä. (Oasmaa & Czernik 1999.) Hakkuutähteet sisältävät neulasia ja kuorta, joiden uuteainepitoisuus on suurempi kuin muilla tyypillisillä raaka-aineilla. Hakkuutähteistä valmistettu pyrolyysineste koostuu uuteainerikkaasta yläkerroksesta (10 % - 20%) ja normaalia kuorettomasta puusta valmistettua pyrolyysiöljyä ominaisuuksiltaan muistuttavasta

alafaasista. Yläfaasilla on suurempi lämpöarvo, viskositeetti, tuhkapitoisuus ja kiintoainepitoisuus. (Oasmaa et al. 2003.)

4 CASE: HANASAAREN HUIPPU- JA VARALÄMPÖKESKUS

4.1 Perustiedot lämpökeskuksesta

Hanasaaren huippu- ja varalämpökeskus sijaitsee Helsingissä Sörnäisten energiahuoltoalueella hiilivoimalaitoksen kupeessa. Helsingin suuresta ja laajentuvasta kaukolämmönkäytöstä johtuen Helsingin energian neljää CHP-voimalaitosta ajetaan jotakuinkin lämmönkysynnän mukaan. Silloin, kun ulkoilman lämpötila laskee nollan alapuolelle tai voimalaitoksissa on toimintahäiriöitä, astuvat mukaan maakaasu- ja öljykäyttöiset huippulämpökeskukset, joita Helsingin alueella on tällä hetkellä 10. Hanasaaren lämpökeskuksen polttoaineena on raskas polttoöljy lähinnä nopean käynnistettävyyden ja toimintavarmuuden johdosta. Lämpökeskuksen polttoaineena on raskas polttoöljy lähinnä nopean käynnistettävyyden ja toimintavarmuuden johdosta. Taulukkoon 3 on koottu laitoksen tärkeimpiä toiminta-arvoja.

Taulukko 3. Hanasaaren lämpökeskuksen tekniset tiedot. (Helsingin energia 2003; Uudenmaan ympäristökeskus 2007)

		Toiminta-arvo	yksikkö
Lämpökeskus			
	vesiteho	282	MW
	hyötysuhde	94	%
	huipunkäyttöaika	130	h/a
	kaukolämmöntuotanto	35	GWh/a
Kattilatyyppe	Noviter NWTB-47-1.6-204 vesiputki-tuliputki		
	kokonaiskorkeus	12,09	m
	vesiteho	47	MW
	lukumäärä	6	
Poltintyyppi	Saacke SKS 450 pyöriväkuppinen		
	polttolaitteen teho max	49,9	MW
	lukumäärä	6	

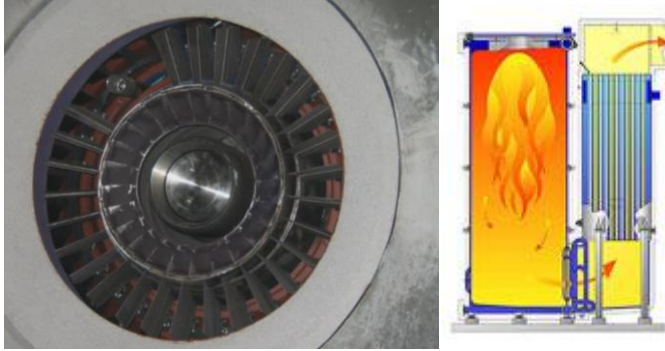
Vuosittaiset käyttötunnit ja sitä myötä raskasöljyn kulutus ja kaukolämmöntuotanto vaihtelevat joka vuosi likimäärin välillä 100 - 300 h/a. (Aaltonen, sähköpostiviesti 2010) Säädettyvyyden ja toimintavarmuuden asettamien vaatimusten johdosta tässäkin huippulämpökeskuksessa on kuusi lämpöteholtaan 47 MW vesiputki-tuliputkikattilaa, jolloin osaa kattiloista tai polttimista voidaan huoltaa samaan aikaan kun taataan lämmöntarjontavalmius muilla kattiloilla. Kattiloita näkyy taka-alalla kuvan 5 vasemmassa laidassa. Polttimina Hanasaarella käytetään laajan säädettyvyysalueen mahdollistavia pyöriväkuppisia low-nox-polttimia. Lisätoimenpiteenä hiukkaspäästöjen hallinnassa ja palamisen parantamiseen voidaan käyttää vesiemulsiotekniikkaa.



Kuva 5. Vasemmassa kuvassa lämpökeskus kuvattuna sisältä ensimmäiseltä tasanteelta ja oikeassa kuvassa lämpökeskus ulkoa.

4.2 Lämpökeskuksen toimintaperiaate

Ulkona sijaitseva öljysäiliö on lämmitettävä öljyn pumpattavuuden takaamiseksi. Öljy kulkee saattolämmityksellä varustettujen maanalaisten putkistojen kautta esilämmitys- ja pumppausyksikköön, josta se jatkaa matkaansa kattiloiden katossa sijaitseviin polttimiin. Polttimiin tuodaan esilämmitetty palamis- ja hajotusilma kattiloiden takana sijaitsevilla puhaltimilla. Polttimissa öljy ruiskutetaan pyörivään kartiomaiseen kuppiin, jonka sisäpinnalle muodostuu öljyfilmi. Kuuma öljy hajoaa pisaroiksi kupin reunalla ulkopintaa tulevan hajotusilman avulla. Sytytyspolttoaineena käytetään nestekaasua. Vasemmalla kuvassa 6 näkyy polttimen ilmanohjauspeltejä ja 120 kW sytytyspoltin vasemmassa yläkulmassa.



Kuva 6. Vasemmalla lämpökeskuksella käytettävä pyöriväkuppinen poltin ja oikealla havainnekuva kattilasta (MW Power 2010)

Lämpö siirtyy kattilassa (kuva 6, oikea laita) ensin säteilemällä tulipesän reunamien vesiputkiin, josta kuumat savukaasut jatkavat kattilan konvektio-osaan. Konvektio-osa koostuu ohuista tuliputkista, joiden ympärillä virtaa vesi lämmön talteenottamiseksi. Tämän jälkeen savukaasu johdetaan kustakin kattilasta erillisen hormin kautta 100 metriä korkeaan savupiippuun.

4.3 Pyrolyysiöljyn käytön materiaalivaatimuksia

Lämpökeskuksessa on polttoteknisesti jo varauduttu käyttämään bio-öljyjä. Kattiloissa 1 ja 2 on haponkestävästä teräksestä (AISI 316) valmistetut polttimen sisäosat ja toiminnaltaan pyöriväkuppiset polttimet soveltuvat hyvin epäpuhtaiden öljyjen polttamiseen. Mikäli bio-öljyt saavuttavat kaupallisen aseman, täytyisi laitokseen vielä investoida uusi säiliö ja syöttölinja sekä uusia automaatiojärjestelmää.

Pyrolyysiöljyn happamuutta ja materiaalivaatimuksia ovat tutkineet mm. Oasmaa et al (1997) ja Oasmaa & Peacocke (2001). Säiliön materiaaliksi sanotaan erinomaisesti soveltuvan monet muovit kuten PP, PE-LD ja PE-HD. Tiivisteissä voidaan käyttää EDPM- ja teflon-renkaita. Putkituksissa kupari seoksineen ovat perinteisillä polttoaineilla yleisiä lähinnä hyvän saatavuuden takia. Useilla pyrolyysinesteillä suoritetuissa kuparin korroosiotesteissä (40 °C) ei havaittu korroosion aiheuttamaa painohäviötä, mutta kupari pehmeänä metallina voi kulua, mikäli lämpötila, virtausnopeus ja hankaava kiintoainepitoisuus ovat korkeita (Oasmaa & Peacocke 2001). Kuparin elektrokemiallinen reaktiivisuus muiden metallien kanssa on myös otettava huomioon.

VTT:n tutkimuksessa (Solantausta et al. 2001) ehdotetaan seuraavia suosituksia pyrolyysiöljyn happamuuden johdosta:

- Varastointisäiliöiden materiaali muovi tai AISI 316
- Putkirakenteiden materiaali muovi, AISI 316 tai kupari ja sen seokset
- AISI 316 tai parempi haponkestävä teräs prosessilaitteille

4.4 Pyrolyysiöljyn varastointi

Pyrolyysiöljyn pitkäaikainen säilyttäminen asettaa tietyt polttoainekohtaiset vaatimukset mm. varastointilämpötilalle ja -ajalle sekä laitoskohtaiset vaatimukset säiliön sijoitukselle ja koolle. Varastoitaessa mitä tahansa polttonestettä on myös otettava turvallisuus- ja ympäristönäkökohdat huomioon.

Ikääntymisen seurauksena pyrolyysiöljyssä tapahtuu viskositeetin nousua, joka on voimakkainta ensimmäisten varastointiviikkojen aikana. Ennen pitkää ikääntymistä ajavat kemialliset reaktiot johtavat vesimäisen ja orgaanisen faasin erottumiseen. Faasit saadaan kuitenkin jälleen sekoittumaan lisäämällä esim. metanolia tai etanolia. Kanadassa myytävälle pyrolyysiöljylle on asetettu maksimivarastointiaika 3 kuukautta (Dynamotive 2008).

Pyrolyysiöljyn lämmittäminen kiihdyttää sen ikääntymistä (kuva 4). Tällaisissa huippulämpökeskuksissa on hyötyä siitä, että käyttöaika sijoittuu vuoden kylmimpiin kuukausiin, sillä pyrolyysiöljy säilyy sitä paremmin, mitä viileämmässä sitä varastoidaan. Mikäli käytettäisiin samanlaisia öljyjä kuin lähteissä tarkastellut, tämä voisi tarkoittaa sitä, että pakkaskuukausien jälkeen säiliön olisi oltava miltei tyhjillään. Varastointiaikaa voitaisiin pidentää huomattavasti lisäämällä esim. etanolia ja näin ollen ostaa suurempia eriä pyrolyysiöljyä kerralla. Mikäli bio-öljy tuotaisiin laivalla, täytyisi tankkeri joka tapauksessa pestä etanolilla (Dynamotive 2009). Se, mikä etanolin lisäämisen polttoainekustannuksissa hävitään, voitetaan osin pyrolyysiöljyn viskositeetin alenemisena esilämmityksessä ja pumppauksessa. Lisäksi polttoainetaraston arvo heikkenee hitaammin, sillä pyrolyysiöljyn viskositeetin kasvaessa pumppaamiseen tarvitaan suurempi määrä energiaa. Mikäli pyrolyysiöljy ikääntyy, sen lämpöarvo myös alenee hieman kemiallisten reaktioiden seurauksena. (Oasmaa & Kuoppala 2003.)

Solantausta et al. (2001) ovat tutkineet pyrolyysiöljyn varastointiolosuhteita. Ikääntymisen kiihtyessä lämpötilan nousun myötä on suositeltu, että varastointilämpötila olisi 15 °C - 25 °C. Lämmitystä yli 60 °C tulisi välttää ja lämmitys välille 40 - 60 °C tulisi minimoida muutamaksi tunniksi. Putkituksissa kuumien pintojen läheisyyttä tulisi välttää. Ilmaa varastointisäiliössä ei saisi olla, ja jatkuvakäyntinen säiliön sekoitus olisi suositeltavaa. Lisätietoa pyrolyysiöljyn turvallisuusseikoista ja varastoinnista löytyy Peacocken ja Bridgwaterin artikkelista (2001) sekä suosituksia Dynamotiven (2009) esitteestä.

4.5 Vaikutukset tehoon

Polttoaineteho voidaan laskea kaavalla 1.

$$P_{pa} = q_m H_{pa} \quad (1)$$

Tällöin siihen vaikuttavat käytetyn polttoaineen tehollinen lämpöarvo H_{pa} ja syötetty polttoainemassavirta q_m . Pyrolyysiöljyn raskasta polttoöljyä pienemmästä lämpöarvosta johtuvaa tehonalenemaa voidaan kompensoida pumpaamalla suurempi massavirta polttoainetta polttimeen. Savukaasun loppulämpötilaa voidaan myös hieman laskea pyrolyysiöljyn vähärikkisyyden vuoksi, ja näin kasvattaa kattilahiötysuhdetta.

Hajotus- ja palamisilmaa saadaan puhaltimilla riittävästi; pyrolyysiöljykilon hapentarve on alle puolet öljykilon hapentarpeesta (Liite 1). Kupin kierrosnopeus on polttimessa vakio, n. 100 r/s. Öljyfilmin paksuus kupin sisäpinnalla ei saa olla kovin suuri koska silloin hajottuminen pisaroiksi kupin reunalla on epätäydellisempää ja hiukkaspäästöt täten suuremmat (Saikkonen, haastattelu 2010). Oilonilla tehdyissä polttokokeissa 8 MW kevytöljykattilasta saatiin pyrolyysiöljyllä noin 4 MW teho, mutta polttimen tyyppi oli paineilmahajoitteinen. Polttokokeita pyrolyysiöljylle pyöriväkuppisissa polttimissa ei kirjallisuusselvityksen yhteydessä löytynyt.

Saacken polttimien perusohjeiden mukaan olisi tärkeää, että lämpöarvo olisi erikoispolttoaineilla vähintään 18 MJ/kg. Polttimen massavirtaa voidaan kasvattaa noin 20 %. Tällöin polttoainetehoksi saadaan 26,5 MW raskasöljyn 49,9 MW sijaan.

Pyrolyysiöljyä tuskin voidaan polttaa ilman tukipolttoainetta sen korkean vesipitoisuuden ja alhaisen lämpöarvon vuoksi. Tukipolttoainetta olisi oltava noin 10 – 20 %. Vesi pyrkii viemään lämmön liekin ytimestä, koska se höyrystyy alemmassa lämpötilassa kuin osa palavista yhdisteistä ja tarvitsee höyrystymiseensä energiaa. Hanasaassa on käytössä vain yksipolttoainepolttimet. Tällöin joko etanolin tai metanolin lisäys mahdollisesti auttaisi, mutta lopullista arviota palamistuloksesta on hankala tehdä ilman polttoaineen testaamista käytännössä. (Nousiainen, sähköpostiviesti 2010.)

Olisikin suotuisaa käyttää mahdollisimman alhaisen vesipitoisuuden ja korkean lämpöarvon öljyä, jotta liukenevien lisäaineiden lisäyksellä päästäisiin kustannustehokkaaseen lopputulokseen. Toisena vaihtoehtona olisi tutkia suuren lämpöarvon ja korkean tuhkapitoisuuden öljyä, kuten hakkuutähteen pyrolyysiöljyn yläfaasia. Metanolia (LHV 19,5MJ/kg) tarvitaan suhteettoman paljon lämpöarvon kasvatusmielessä, tarkasteltuun öljyyn (LHV 15,3MJ/kg) sitä olisi lisättävä yli puolet.

4.6 Vaikutukset hiilidioksidipäästöihin

Koska hiilidioksidineutraalia lämmöntuotantoa tullaan suosimaan, niin kattiloiden 1 ja 2 käyttöajat tulevat luultavasti kasvamaan. Jos arvioidaan, että puolet lämpökeskuksen vuotuisesta lämmöntuotannosta tapahtuisi näillä kattiloilla, niin vuodessa päästetään noin 6 300 tonnia vähemmän hiilidioksidia ilmaan. (Liite 3).

Biopolttoaineeseen vaihtaminen on myös hyvä päästökaupan riskienhallintakeino, sillä päästökaupan uuden kauden alkaessa 2013 energiantuotannon toimijoiden on ostettava kaikki päästöoikeutensa huutokaupassa, ja mm. sääntömuutosilmoitusten jälkeen on tapahtunut vaikeasti ennustettavia hinnanmuutoksia päästöoikeuksissa (Sanin & Violante 2009). Huippulämpökeskusten ajojärjestystä voitaisiin myös muuttaa niin, että näitä kattiloita käynnistettäisiin osin ennen maakaasukattiloita. Tällöin Helsingin kaukolämmön hiilidioksidipäästöt, rikkidioksidipäästöt sekä mahdollisesti myös kustannukset olisivat alhaisemmat.

Pyrolyysiöljy on käyttövaiheeltaan hiilidioksidineutraalia, mutta koko elinkaaren hiilidioksidipäästöihin kuuluvat myös raaka-aineen korjaus, kuljetukset, tuotantolaitteiden

valmistus ja pyrolyysiöljyn kuljetus. Pyrolyysiöljyn tuotanto on tyypillisesti energiaomavaraista ja esim. tuotannossa syntyvistä kondensoimattomista kaasuista voidaan tuottaa kaasumoottorilla vihreää sähköä yli oman tarpeen. Eräässä elinkaariarvioinnissa pyrolyysiöljyllä tuotetun kaukolämmön on laskettu aiheuttavan hiilidioksidiksi painotettuja kasvihuonekaasupäästöjä $60\text{g CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$, joka on pieni verrattuna samoilla oletuksilla laskettuun puun kaasutuksen ominaispäästökertoimeen $100\text{g CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$ (Jungmeier et al. 2003). Raportissa ei ole mainittu minkäläinen kaasutusprosessi on kyseessä.

5 PYROLYYSIÖLJYN POLTON HIUKKASPÄÄSTÖT

Kun valittu polttoaine poltetaan öljykattilassa, polttoprosessin hiukkaspäästöihin vaikuttavat valittu polttimen tyyppi, polttotekniset säädöt, lisä-aineet sekä savukaasujen hiukkaserotinlaitteisto. Myös kattilan geometrialla voi olla vaikutusta asiaan.

Laajassa Suomen kattilakantaa koskevassa kustannusanalyysissä on ehdotettu, että raskasta polttoöljyä polttavien kattiloiden olisi joko siirryttävä kevyeen polttoöljyyn IE-direktiivin astuessa voimaan 2016 hiukas- ja rikkidioksidipäästöjen vähentämisen vuoksi tai käytettävä märkää sähkösuodatinta ja vähärikkisempää öljyä (Pöyry Energy 2009). Energiateollisuus on myös ottanut kantaa direktiiviehdotuksen päästöraja-arvoihin. Suomen tilanne on kaukolämmön tuotannon vuoksi erilainen muihin EU-maihin verrattuna, sillä Suomessa on runsaasti vähän käyviä huippulämpökattiloita. Näihin ei välttämättä ole teknis-taloudellisesti soveltuvaa päästöpuhdistustekniikkaa, ja väljempää raja-arvoja kaivataan (Energiateollisuus 2008).

Pyrolyysiöljy sisältää tyypillisesti vain pieniä määriä rikkiä ja typpeä ($<0,1\text{ p-}\%$), joten rikki- ja typpioksidipäästöjen osalta polttoaineen vaihtaminen parantaisi ilmanlaatua ja hyvin epätodennäköisesti tarvitsisi low-nox-polttimen oikeilla säädöillä mitään ylimääräisiä päästönhallintatoimia näiden päästöjen osalta. Voidaankin perustellusti sanoa, että pyrolyysiöljy on puhtaampi polttoaine kuin raskas polttoöljy.

5.1 Laskentamallin kuvaus

Hiukkaspäästöt muodostuvat raskaalla polttoöljyllä öljykoksista, kondensoituneesta noesta ja polttoaineen sisältämästä tuhkasta. Öljykoksi on peräisin suurimolekyylisistä hiilivety-yhdisteistä (asfalteenit, hartsit) ja noki palamatta jääneistä haihtuvista hiilivedyistä (Huhtinen 2006). Pyrolyysiöljyn polttoprosessissakin syntyy hitaasti palavia koksi- ja nokihiukkasia (Shaddix & Tennison 1998). Pyrolyysiöljyn palaminen etenee siten, että ensin haihtuvat ja palavat kevyet yhdisteet, jonka jälkeen tapahtuu suurten molekyylien pyrolyysi ja palaminen tuottaen hiiltä. Tämän jälkeen happi reagoi hiilen kanssa muodostaen tuhkaa (García et al. 2006, 1). Hiukkaspäästöjä on arvioitu polttoaineen sisältämän tuhkan perusteella yksinkertaisen massataseeseen perustuvan laskentamallin (kaava 2) avulla.

$$C_{th} = \frac{100-\eta}{100-x_{ROC}} * \frac{m_{ash}}{V_{dn}} * \frac{20,9-E_{ref}}{20,9-E_{th}} \quad (2)$$

Jossa

C_{th}	hiukkaspäästötaso [$\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$]
m_{ash}	tuhkapitoisuus [mg/kg_{pa}]
V_{dn}	kuiva ominaissavukaasumäärä [$\text{m}^3\text{n}/\text{kg}_{pa}$]
E_{ref}	referenssipitoisuus [tilavuus-%]
E_{th}	savukaasun happipitoisuus [tilavuus-%]
η	kattilan ja savukaasukanavan erotustehokkuus [massa-%]
x_{ROC}	hehkutusjäännös [massa-%]

Tarkastelluiksi polttoaineiksi on valittu suomalainen männynpurusta valmistettu pyrolyysiöljy (myöhemmin mäntyöljy), kansainvälisessä kirjallisuudessa usein siteerattu hyvälaatuinen kuumahöyrysuodatettu, poppelista valmistettu pyrolyysiöljy (myöhemmin poppeliöljy) ja vertailun vuoksi raskas polttoöljy.

5.2 Tulokset

Polttoöljyjen analyysitiedot syötettiin taulukkolaskentaohjelmaan, ja tuloksena saatiin hiukkaspäästötaso, jonka polttoaine minimissään tuottaa. Laskennassa käytetyt parametrit olivat: $\eta = 0$ ja $x_{TOC} = 0$. Merkille pantavaa pyrolyysiöljyjen minimihiukkaspäästöasoja tarkasteltaessa on tuhkapitoisuuden POR:ia suurempi vaikutus päästötasoon. Tämä johtuu siitä, että pyrolyysiöljyä poltettaessa syntyvä kuiva savukaasuvirta polttoainevirtaan nähden on alle puolet raskaasta polttoöljystä. Tällöin sama tuhkapitoisuus pyrolyysiöljyllä tarkoittaa yli kaksinkertaista teoreettista päästötasoa raskasöljyyn verrattuna. Tulokset kolmesta öljystä on esitetty taulukossa 4 ja yksityiskohtaisempi laskenta liitteessä 1.

Taulukko 4. Simuloinnin tulokset täydellisellä palamisella ja täydellisellä läpäisyllä

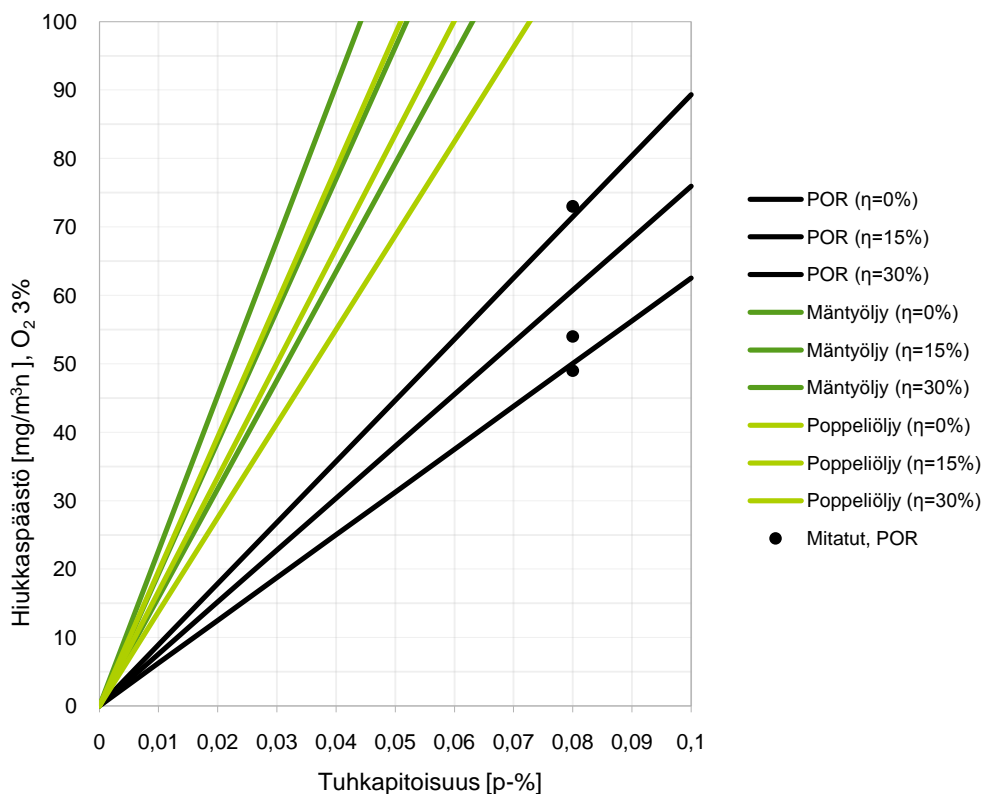
Polttoaine	Tuhka(p-%)	Hiukkaspäästö(mg/m ³ n - 3 % O ₂)
POR	0,04	33
Mäntyöljy	0,03	67
Kuumahöyrysuodatettu	0,01	19

Tuloksista käy ilmi, että tuhkasta johtuva hiukkaspäästö alittaa *nykyisen* hiukkasrajan 70 mg/m³n hyvälaatuisellakin mäntypuruöljyllä vain niukasti. *Uuteen* hiukkaspäästörajaan päästäisiin tällä öljyllä vasta syklonin erotustehokkuudella 63 %, jos lisäainein ja säädöin päästäisiin miltei täydelliseen palamiseen ($\eta = x_{TOC}$). Sen sijaan, matalatuhkaisella bioöljyllä voitaisiin teoriassa päästä IE-direktiivin hiukkaspäästörajaan jo ilman savukaasun puhdistuslaitteistojakin. Korkealämpöarvoiset lisäaineet laskevat teoreettista päästötasoa myös hieman jo pelkästään ominaissavukaasumäärän kasvun takia.

5.3 Herkkyysanalyysi ja arviointi

Simuloidut pyrolyysiöljyt tuottivat vaihtelevamman savukaasumäärän kuin raskaat polttoöljyt. Simuloinnissa on käytetty lähempänä tyypillistä pyrolyysiöljyä olevaa mäntyöljyä ($V_{dn} = 4,4 \text{ m}^3\text{n/kg}_{pa}$) ja hieman hiilipitoisempaa poppeliöljyä ($V_{dn} = 5,1 \text{ m}^3\text{n/kg}_{pa}$). Raskaan polttoöljyn kuivien savukaasujen ominaistilavuus, V_{dn} , oli 12,0 m³n/kg_{pa}. Kuvasta 7 nähdään aiemmin mainittu päästötasojen erilainen herkkyys tuhkapitoisuudelle.

Kattilaan jää osa kiintoaineesta, sillä hiukkaset kulkeutuvat ja jäävät kiinni lämpöpinnoille diffuusion ja muiden mekanismien vaikutuksesta. Näin käy etenkin savukaasun virratessa kattilan konvektio-osan yli 6 m pitkissä ja 5,2 cm halkaisijaltaan olevissa tuliputkissa (Noviter OY 2007). Vaikkei osuus olisikaan kiinteää polttoainetta polttavan voimalaitoskattilan tasoa, voi sillä olla oma merkityksensä, sillä nuohottavaa ainesta voi kertyä vuodessa lämpökeskuksesta kymmeniä tonneja. Kansallisen BAT-asiakirjan ja Huhtisen mukaan jopa 30 % hiukkasista voi varastoitua kattilan seinämille (Jalovaara et al. 2003,48; Huhtinen 2006, 118). Kuvissa 7 ja 8 samanväriset kolme suoraa tarkoittavat päästötasoa kolmella eri erotustehokkuudella, 0 %, 15 % ja 30 %.

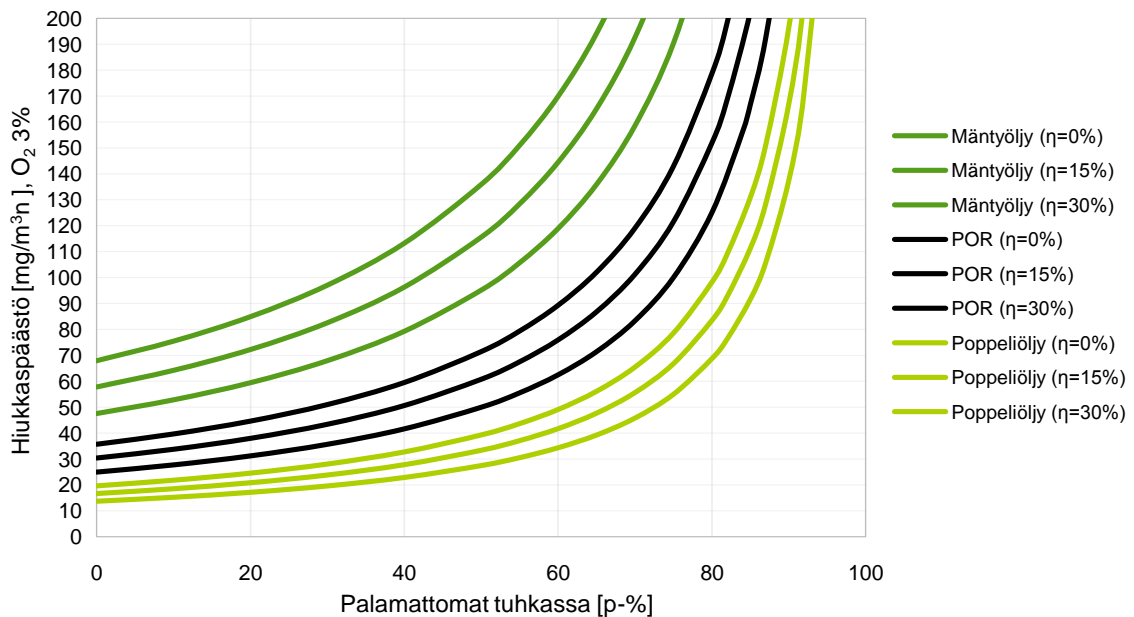


Kuva 7. Laskentamallin ennustama päästötaso tuhkapitoisuuden funktiona.

Virhelähteitä ovat esim. tuhkapitoisuuden määrittämisessä yläsuuntaan heilahtelua aiheuttavat raskasmetallien hapettuminen ja toiseen suuntaan niiden haihtuminen (Oasmaa et al. 1997, 18). Myös tuhkapitoisuuden mittauksen resoluutio yhden merkitsevän numeron tarkkuudella antaa mäntypyrolyysiöljyn hiukkas päästötasolle virheen $\pm 9 \text{ mg/m}^3\text{n}$ ja raskaalle polttoöljylle $\pm 4 \text{ mg/m}^3\text{n}$. Mitatuista päästöistä kaksi alempaa pistettä on mitattu

osatehoilla 24 MW ja 13 MW. Poltinten säädöillä tavoiteltiin mahdollisimman täydellistä koksipartikkelien loppuun palamista, koska tiedettiin öljyn olevan huonolaatuista (normaalisti tuhkapitoisuus on 0,03 %, nyt 0,08 %). Hiukkasten suurempi depositio seinämille voi olla seurausta virtauksen asettumisesta turbulentista laminaariselle alueelle.

Kuvassa 8 on esitetty palamattomien määrän vaikutus päästötasoon. Kummallakin polttoaineella päästään laboratorio-olosuhteissa pelkän tuhkan aiheuttamaan päästötasoon, mutta käytännössä kattilassa muodostuu low-NO_x-polttimilla pisarapalamisen loppuvaiheessa hitaasti palavia koksihiukkasia, jotka nostavat hiukkaspäästöä.



Kuva 8. Tuhkan heikutushäviön vaikutus simuloituun päästötasoon eri öljyillä

Jos muodostunut kiintoaine on POR:lla mustaa, on siinä paljon palamatonta materiaalia ja jos se on harmaata tai keltaista, on siinä suurempi osuus tuhkaa (IPPC 2006). Kiintoaineen heikutushäviö analysoimalla voitaisiin arvioida palamattoman hiilen osuus poltossa syntyneissä hiukkasissa. Taulukkoon 5 on koottu kirjallisuudesta löydettyjä heikutushäviöitä raskaan polttoöljyn lentotuhkalle.

Taulukko 5. Kirjallisuudessa esitetyt hehkutushäviöt raskaan polttoöljyn lentotuhkalle

Hehkutushäviö	Kokoluokka	Lähde
70 % - 90 %	?	Ohlström et al. 2005
64,1 % - 86.6 %	<1MW	Miller et al. 1998
5 % - 20 %	>50MW	IPPC 2006
65 %	47MW	Polttimen takuuarvot (kun $\eta=7\%$)

Nestemäisen polttoaineen lentotuhkan suuri hiilipitoisuus asettaakin rajoituksia laskentamallin käyttökelpoisuudelle etenkin pyrolyysiöljyllä laskettaessa. Laskentamallia voidaan kuitenkin tähänastisen ymmärryksen valossa käyttää teoreettisena miniminä hiukkaspäästölle, etenkin jos hiukkasten depositio kattilaan on vähäistä. Koksinmuodostukselle on kehitetty kokeellisia malleja polttoaineen ominaisuuksista, mm. alkalimetallien suhteista, vanadiini- ja asfalteenipitoisuudesta (Molero de Blas 1995, 97).

5.4 Polttokokemuksia pyrolyysiöljyllä

Aiemmissa polttokokeissa liian korkea lämpötila esilämmityksessä (>60 °C) johti ongelmiin jos pyrolyysiöljyssä oli paljon reagoivia yhdisteitä. Yhdellä testatuista öljyistä hiutaleista sedimenttiä muodostui öljysäiliön pohjalle. Liian korkea lämpötila johti myös polttoöljysuuttimen kohonneeseen tukkeutumisiin (Oasmaa et al. 2003). Pyöriväkuppisella polttimella pyrolyysiöljyn polttamisesta ei löytynyt kirjallisuusselvityksen yhteydessä mainintaa. Tämä voi johtua siitä, että pyrolyysiöljyn käyttöä on tutkittu pienemmässä kokoluokassa kevyttä polttoöljyä korvaavana kattiloissa, joissa pyöriväkuppinen poltin ei ole niin yleinen sen vaatiman huoltotarpeen ja korkeiden investointikustannusten takia.

Ilmahajotteisilla polttimilla metanolin lisäyksellä (10 p-%) saatiin viskositeetin alentumisen lisäksi pienemmät hiukkaspäästöt (57-203 mg/m³n verrattuna 353-385 mg/m³n [mg/MJ muunnettu kertoimella 0,26 m³n/MJ]) (Oasmaa et al. 2003). Toisessa tutkimuksessa (Gust 1999) raportoitiin tyypillisiksi hiukkaspäästöiksi paineöljypolttimella 50 - 150 mg/m³n. Kuuman suuttimen tukkeutuminen estettiin huuhtelemalla suutin jollain

liuottimella polton jälkeen, jottei siihen muodostuisi polymeroituneita jäännöksiä. Foresteralla myöhemmin tehdyissä polttokokeissa raportoitiin optimiolosuhteissa pääsy orgaanista materiaalia sisältämättömään, pelkän tuhkan aiheuttamaan kiintoainepäästötasoon (Nieminen et al. 2003).

Pyrolyysiöljyä on käytetty kaupallisesti lisäpolttoaineena hiilikattilassa sähköntuotantoon Manitowoc Public Utilitiesin kattilassa Wisconsinissa (USA). Sitä käytettiin myös korvaamaan kallista diesel-öljyä leijupetikattilan käynnistyspolttoaineena Malesiassa. Tuloksia poltosta ei ole tuotu julkisuuteen (Venderbosch & Prins 2010). Ruotsissa pyrolyysiöljy on hyväksytty käytettäväksi kaukolämpökeskuksissa. Polttokokeista raportoitiin oletettua suuremmat savukaasun hiukkaspitoisuudet (Oasmaa et al. 2003).

5.5 Hiukkaspäästöjen vähennysmenetelmät

Tuhka- ja kiintoainepitoisuuden vähentämisen keskiössä ovat valmistuksen puolelta raaka-aineen tuhkapitoisuus, toiseksi pyrolyysiolosuhteet sekä pyrolyysiprosessin kiintoaineen erotusteknologiat (Oasmaa & Meier, 7). Poltettaessa öljyä hiukkaspäästöjen vähentämiseksi ja palamattoman polttoaineen minimoimiseksi polttimen säädöt ovat tärkeitä. Jos öljy on runsastuhkaista, Hanasaaren lämpökeskuksessa on myös mahdollista käyttää emulsiopolttoa tai sykloneita, joille on varattu tila.

5.5.1 Emulsiopoltto ja mikroräjähdykset

Emulsiopolton teho hiukkaspäästöjen pienentäjänä perustuu raskasöljyllä niin kutsuttuihin mikroräjähdyksiin ja mahdollisesti myös vesihöyryn pelkistymiseen. Emulsiopoltossa öljyyn sekoitetaan vettä pieninä pisaroina. Poltettaessa öljyä vesipisararat höyrystyvät ja laajenevat nopeasti polttoainepisaran sisällä, synnyttäen näin sekundääristä polttoaineen hajoamista. (Huhtinen 2006.)

Bio-öljyjä poltettaessa on pisarakokeissa havaittu yleisenä piirteenä noin puolet hitaampia syttymisnopeuksia verrattuna kevyeen polttoöljyyn. Tämän jälkeen bio-öljyjen palamista leimaa aina pisaran räiskyvä mikroräjähdys, josta yleensä on seurauksena hieman

paikallista noenmuodostusta ja eriasteista pisaran hajoamista. Pyrolyysiöljyillä, joilla mikroräjähdykset ovat heikompia, voi suurten pisaran osasten nopeava ja keho palaminen johtaa koksishiukkasten muodostumiseen. Tämän monimutkaisen ilmiön voimakkuuteen vaikuttaa mm. vesipitoisuus, happipitoisuus, pyrolyysiprosessin krakkautumisreaktiot ja nesteen kiintoainepitoisuus. (Shaddix & Tennison 1998.)

Shaddix ja Tennison kokeilivat apuaineiden lisäämisen vaikutusta mikroräjähdyksiin. Metanolin havaittiin vähentävän viivettä ennen mikroräjähdyttä ja veden lisäävän sitä. Aiemmissä tutkimuksissa oli havaittu todella voimakkaita mikroräjähdyksiä korkeavesipitoisilla (30 p-%) pyrolyysinesteillä. Samaa vaikutusta ei kuitenkaan aivan täysin pystytty tuottamaan pelkästään lisäämällä vettä pyrolyysiöljyyn, mutta pienellä veden lisäyksellä todettiin olevan mikroräjähdyksen voimaa lisäävä vaikutus, etenkin jos lisättiin myös metanolia. (Shaddix & Tennison 1998.)

Lämpökeskuksella käytetty vesiemulsiopoltto ei välttämättä tuottaisi pyrolyysiöljyllä haluttua tulosta. Pyrolyysiöljyssä on korkea vesipitoisuus jo ennestään, jolloin vettä lisättäessä sen syttymisessä sekä stabiilin palamisen saavuttamisessa voi olla ongelmia. Lisätty vesi ei myöskään esiinny siinä emulsiopisaroina, vaan dispersiona täydellisesti sekoittuneena. Tältä näkökannalta on yhdentekevää, pumpataanko vesi öljysäiliöön vai syöttölinjaan juuri ennen suutinta. Myös mahdollisten muiden lisä-aineiden kanssa on mietittävä missä vaiheessa niitä lisättäisiin.

5.5.2 Syklonit

Sykloneilla on lukuisia sovelluksia tekniikan eri aloilla. Energiantuotannon päästöjen hallinnassa syklonit soveltuvat hyvin karkeiden, yli 5 μ m halkaisijaltaan olevien hiukkasten erottamiseen, ja raskasöljykattiloissa sillä päästään vanhojen lähteiden mukaan korkeintaan 50 – 60 % erotusasteeseen, koska hiukkaskokojakauma on keskittynyt pieniin hiukkasiin (Lahtinen & Komppula 1995, 44).

Syklonin erotustehokkuus on sitä suurempi, mitä kapeampi sykloni on. Tästä syystä on kehitetty suuria savukaasuvirtoja varten multisykloni, jossa syklonisuppiloita on useita

vierekkäin. Myös esim. hiukkasten tiheys lisää syklonin erotustehokkuutta, sillä niihin kohdistuu suurempi keskipakovoima (De Nevers 2000). Multisyklonit ovat vesiemulsiotekniikan ohessa Suomessa yleisesti käytetty hiukkaspäästöjen vähennyskeino raskasöljykattiloissa (Pöyry Energy 2009). Yhdistelmänä nämä puhdistustekniikat eivät toimi optimaalisesti, sillä vesiemulsiopoltolla hiukkaskokojakauma pienenee ja keskittyy polttoaineen paremman hajoamisen ansiosta kokoluokkaan 1-4 μ m.

Kehittyneimmissä sykloneissa erotustehokkuus riippuu myös syklonin muotoilusta: voidaan esimerkiksi käyttää moniaukkosityklonia, jossa virtaus tulee useasta eri sisääntuloaukosta, estäen näin syklonin sisään tulevan ilman törmäämisen syklonissa kiertävään ilmaan ja hiukkasiin, tasaten näin virtauskenttää. Koska sykloneita voidaan valmistaa suhteellisen helposti millä tahansa konepajalla, eivät syklonien valmistajat mielellään tuo julkisuuteen geometrian muutosten aiheuttamia parannuksia erotustehokkuudessa. De Neversin (2000) mukaan kuitenkin selvästi suorituskyvyltään parempia sykloneita, kuin yksinkertainen tangentialisella sisäänmenolla varustettu, ei ole olemassa. SykloniyhTELÖiden mukaan pienempi leikkausrajahalkaisija saavutetaan, mikäli painehäviötä voidaan kasvattaa, jolloin savukaasupuhaltimien kuluttama sähköenergia kasvaa. Leikkausrajahalkaisijan pienentäminen ja sitä kautta suorituskyvyn parantaminen on myös mahdollista, jos voidaan käyttää suurempaa syklonia. (De Nevers 2000, 265.)

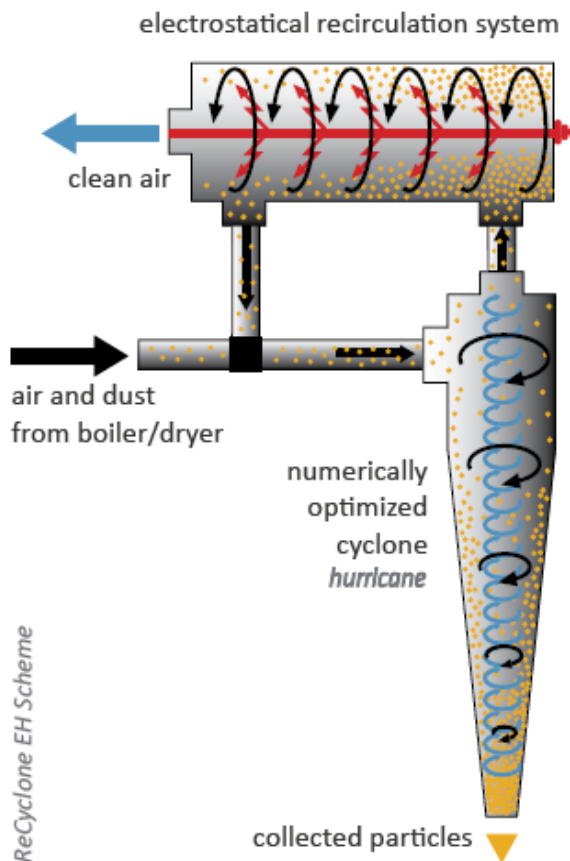
5.5.3 Muita tekniikoita

Sähkösuodattimen käyttö on tilantarpeen, kustannushyötysuhteen ja lyhyiden käyttöaikojen johdosta huonosti soveltuva huippulämpökeskuksiin. Märkkää sähkösuodatinta on ehdotettu uusien päästörajoiden saavuttamiseksi, mikäli vähärikkistä raskasöljyä olisi saatavilla, mutta se on Pöyryn selvityksen mukaan kustannustehoton ja vaatii jätevedenkäsittelyjärjestelyjä. (Pöyry Energy 2009.)

Uudenlaisia sykloneja sähköisellä takaisinkierätyksellä käytetään niin materiaalien talteenotossa kuin ilmansuojelussa esim. biomassan poltossa. Tällaisen syklonin toimintaperiaate on muuten sama kuin syklonin tai multisyklonin, mutta yläosan ulostulosta hiukkaset sinkoutuvat pyöreään putkeen, jossa on keskellä varaajaelektrodi.

Putken kuori toimii toisena napana. Putkesta varautuneet ja osin agglomeroituneet hiukkaset tulevat takaisin tangentiaalisesti syklonin sisääntuloon ja putken keskeltä savukaasu jatkaa savukaasukanavaan (kuva 9). (ACS 2010.)

Ilmoitetut investointikustannukset ovat sähkösuodatinta halvemmän kuitusuodattimen luokkaa, mutta käyttökustannukset ja huollon tarve vähäisempi. Tuhkan resistiiviset ominaisuudet eivät myöskään vaikuta niin paljon erottimen toimintaan kuin sähkösuodattimen, sillä tuhka ei keräänny seinille, eikä tehoa tarvita kuin 10-15 % sähkösuodattimen tarpeesta. Näiden syklonien erotustehokkuus on pienille hiukkasille laitevalmistajan mukaan mekaanista takaisinkierrättävää sykklonia korkeampi. Esimerkkitapausten valossa puhutaan 90 – 99 % erotustehokkuuksista. (ACS 2010.)



Kuva 9. ReCyclone EH (ACS 2010)

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Pyrolyysiöljyä tarkasteltiin sen perusominaisuuksien, varastoinnin, saatavuuden ja erityisesti hiukkaspäästöjen näkökulmista. Myös pyrolyysiöljyn polttoa ja hintaa selvitettiin.

Varastointiajan ja -lämpötilan puolesta voidaan todeta, että pyrolyysiöljylle ominaista on siihen liittyvä ikääntyminen, joka kiihtyy lämpötilan kasvaessa. Koska öljy ei ole täysin homogeenistä, täytyy varastointisäiliössä käyttää sekoitinta. Olennaista varastoinnissa ja putkituksissa on myös huomioida materiaalit, joiden tulee olla pyrolyysiöljyn alhaisen pH-arvon ja mahdollisesti korkeahkon kiintoainepitoisuuden kestäviä.

Lähimpänä tätä kokoluokkaa olevien kattiloiden aikaisempien polttokokeiden perusteella pyrolyysiöljyn lämpöarvolle on asetettu minimiraja 17 MJ/kg (Oasmaa & Meier 2004, 3). Koska Hanasaassa on vain yksipolttoainepolttimet, pyrolyysiöljyn tehollisen lämpöarvon tulisi olla Saacken mukaan yli 18 MJ/kg. Muussa tapauksessa poltossa tulisi käyttää tukipolttoainetta (esim. maakaasua 10 - 20 %). Lämpöarvon kasvattamiseksi ja palamista stabiloimaan voisi kokeilla etanolin lisäämistä pyrolyysiöljyyn. Massavirtaa voidaan polttimella kasvattaa n. 20 %. Polttoaineteho olisi tällöin 26,5 MW, eli teho pienenee 47 %. Tutkimuksessa ei käynyt selväksi, onko näin suuri tehonalenema ominaista vain pyöriväkuppisille polttimille tai välttyttäisiinkö siltä polttimen uusimisella.

Pyrolyysiöljyn rikkipitoisuus on alle kevyen polttoöljyn ja typpipitoisuuskin on yleensä alle määritysrajan. Pyrolyysiöljy on hiilidioksidineutraali polttoaine. Myöskään elinkaaren hiilidioksidipäästöt eivät ensi alkuun näytä suurilta. Bio-öljyn vahvuutena voidaankin pitää alhaisia CO₂-, SO₂- ja NO_x-päästöjä.

Pyrolyysinesteille on standardien puuttuessa ja prosessien vaihdellessa ominaista vaihteleva tuhkapitoisuus ja täten myös sen vaikutus hiukkaspäästöön. Työssä arvioidut hiukkaspäästötasot ovat suuntaa-antavia teoreettisia minimejä, jossa oletetaan stabiili palaminen. Mikäli palaminen ei ole stabiili, kasvaa palamattomien osuus. Raskaan polttoöljyn ja pyrolyysiöljyn tuhkapitoisuudet eivät ole saavutettuun minimihiukkaspäästötasoon nähden keskenään vertailukelpoisia. Pyrolyysiöljyn polton

vaikutuksena muodostuu vähemmän kuivia savukaasuja polttoainekiloa kohden, jolloin samalla vapautuva tuhka asettuu pienempään tilavuuteen (kuva 7).

Lämpökeskuksissa syktonia tulisi ensisijaisesti harkita silloin, kun palaminen saadaan stabiiliksi, mutta polttoaineen tuhkasta johtuva päästötaso ylittää normit. Foresteralla kevytöljypolttimilla suoritetuissa testeissä aiemmin ehdotettu maksimi tuhkapitoisuudelle 0,03 % (Oasmaa & Meier, 7) olisi nykyisillä päästörajoilla riittävä. IE-direktiivin voimaantulon jälkeen täytyisi saada öljyä, jonka tuhkapitoisuus on turbiini- ja dieselmoottoriöljylle asetettujen edellytysten (Oasmaa & Meier, 7) mukaista (<0,01 %) tai vaihtoehtoisesti käytettävä savukaasun hiukkaspuhdistusta.

Pyrolyysiöljyn valmistus ei ole vielä täysin kaupallisessa vaiheessa oleva teknologia, ainakaan Euroopassa, mutta lähivuosina esim. Hollantiin tulee suuren kokoluokan laitoksia sekä näitä on myös suunnitteilla Suomessa. Yhdysvalloissa ja Kanadassa niitä on jo toiminnassa. Pyrolyysiöljystä tulisi luultavasti kalliimpaa silloin kun typpi- ja tuhkapitoisuus olisivat alhaisempia (esim. hyvälaatuinen kuumahöyrysuodatettu öljy).

Hanasaaren tapauksessa tilanne hinnan osalta tulee myös muuttumaan vuonna 2016, mikäli päästörajojen lievennyksiä ei toteuteta vähän käyville nestemäisen polttoaineen kattiloille. Rikin oksidien vähennyksessä on lämpökeskuksissa harvoin mahdollista käyttää savukaasun puhdistusteknologioita, jolloin pyrolyysiöljy tulisi kilpailemaan raskasta polttoöljyä noin 22€/MWh kalliimman kevyen polttoöljyn kanssa rikkidioksidin vähennystoimena, mikäli tehonalenema sallitaan ja öljyn käyttö on teknisesti mahdollista. Uusiin päästörajoihin varautuessa voisi muuallakin harkita, voitaisiko pyrolyysiöljyä käyttää kattiloissa, joihin joudutaan joka tapauksessa hankkimaan low-nox-polttimet. Polttimiin voitaisiin uusimisen yhteydessä tehdä tarvittavat muutokset.

Bio-öljyn käyttö on varhaisessa vaiheessa ja pitempiaikaisia julkisia käyttökokemuksia on vähän. Käyttöön otossa voi ilmetä ongelmia. Edellytyksinä pyrolyysiöljyn käytölle investointi niin pumppaus-, varastointi-, kuin polttolaitteistoonkin kantaa mahdollisuuksien lisäksi myös jonkinasteisen taloudellisen riskin. Tällöin yhteistyö öljynvalmistajien kanssa on tärkeää, niin suunnittelussa kuin käytössäkin.

7 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSIA

Hiukkaspäästöjen arvioiminen nestemäisillä polttoaineilla onnistuisi tarkemmin, mikäli massansiirron kattilaan ja koxinmuodostuksen huomioonottavaa mallia käytettäisi. Pyrolyysiöljyn polton hiukkasten ominaisuudet on myös suppeasti tunnettu alue ja päästönpuhdistuslaitteiston kannalta ne olisi tiedettävä. Mikäli tavoitteena on olemassa olevan lämmöntuotantoinfrastruktuurin käyttäminen, niin polttokokeilla voitaisiin todeta tämän kohteen soveltuvuus käyttöön pyrolyysiöljyllä. Pyrolyysiöljyn käyttöä voisi myös tutkia muissa kohteissa, esimerkiksi tuki- ja käynnistyspolttoaineena hiilikattiloissa.

LÄHTEET

ACS Advanced Cyclone Systems. 2010. Hurricane & ReCyclone® Systems. Particulate Matter Emission Control & Air Dedusting.[esite] [Viitattu 29.06.2010]. Saatavissa: http://acsystems.pt/repo/file_en_33.pdf

Saikkonen, Antti. 2010. Projektipäällikkö Helen Lämpö. Tutustumistilaisuus Hanasaaren lämpökeskukseen.

BTG-BTL. Biomass-to-liquid. [verkkojulkaisu] [Viitattu: 22.08.2010]. Saatavissa: <http://www.btg-btl.com/index2.php>

De Nevers, Noel. 2000. Air Pollution control engineering. ISBN 0-07-039367-2. 586s.

Bradley, Doug. 2006. European Market Study for BioOil (Pyrolysis Oil). [verkkojulkaisu] [Viitattu 12.07.2010]. Saatavissa: http://www.canbio.ca/documents/publications/European_BioOil_Market_Study_Dec_15_pdf.pdf

European commission. Integrated Pollution Prevention and Control. 2006. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants.

Fortum Oyj. 2003. Foresteran kenttäkokeet päätöksessä. [verkkojulkaisu] [Viitattu 1.6.2010] Saatavissa: http://www.fortum.fi/fi/news_section_item.asp?path=14020;14028;14029;25800;5533;18210

García , M et al. 2006. Evaporation and Combustion Characteristics of Biomass Vacuum Pyrolysis Oils. IFRF Combustion Journal, 2006. ISSN 1562-479X.

Gust, Steven. 1999. Combustion Properties of Biomass Flash Pyrolysis Oils: Final Project Report. Combustion of pyrolysis oils in Europe. Sandia National Laboratories.

Helsingin Energia. Hanasaaren säiliön öljyanalyysi 2005.

Helsingin Energia. Hanasaaren lämpökeskuksen tekniset tiedot. 13 s.

Huhtinen, Markku. 2006. Raskaan polttoöljyn käyttöopas. Neste Oil Oyj. ISBN 952-5656-02-0

Aaltonen, Juhani. 2010. Yksikön päällikkö, Helen Lämpö. Sähköpostiviesti.

Jungmeier G et al. 2003. Energy aspects in LCA of forest products. The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol 8: Nro 2.

MW Power Oy. 2010. Noviter water tube boilers. [verkkojulkaisu] [Viitattu 22.1.2011]
Saatavissa: http://www.mwpower.fi/mwpower/mwpower_pages.nsf/WebWID/WTB-090422-22575-2EB94?OpenDocument&mid=3D0AF60A4C81C575C22575B6003C2E62

Nousiainen, Kari. 2010. Saacke GmbH. Sähköpostinvaihtoa poltinvalmistajan edustajan kanssa.

Lehto, J et al. 2009. Integrated heat, electricity and bio-oil production. Teoksessa: Bioenergy 2009 - Book of proceedings Part II. s. 915- 922. Finbio. ISBN 978-952-5135-44-2.

Miller, CA et al. 1998. Fine particle emissions from heavy fuel oil combustion in a firetube package boiler. Combustion Science and Technology Vol. 134. ISSN 0010-2202. s. 477 – 502.

Molero de Blas, Luis Javier. 1995. Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels. Väitöskirja. University of London, Department of Chemical Engineering. 266 s.

Nieminen, J-P et al. 2003. Experiences from Forestera™ liquefied wood fuel pilot plant. s 392-395. Teoksessa: Bioenergy 2003. International Nordic Bioenergy Conference Proceedings. Finbio 2003. ISBN 952-5135-26-8.

Noviter OY. 2007. NWTB-47-1.6-204 Konvektio-osan kokoonpano. CAD-piirustus.

Oasmaa Anja & Kuoppala, E. 2003. Fast pyrolysis of forestry residue. 3. Storage stability of liquid fuel. Energy & Fuels, 2003: 17. s. 1075-1084.

Oasmaa, Anja et al. 2010. Fast Pyrolysis Bio-Oils from Wood and Agricultural Residues. Energy & Fuels 2010 : 24. s. 1380–1388.

Oasmaa Anja et al. 2009. Quality control in fast pyrolysis bio-oil production and use. Environmental progress & Sustainable energy, 28 : 3. s. 404 – 409.

Oasmaa, Anja et al. 2001 Pyrolysis Oil Combustion Tests in an Industrial Boiler, Teoksessa: Progress in Thermochemical Biomass Conversion (Toim. A. V. Bridgwater), Blackwell Science, Oxford, UK, 2001, s. 1468-1481.

Oasmaa, A & Meier D. 2004. Thermonet –PyNe SG Report. Characterisation, Analysis, Norms & Standards. Part 1 End-User Requirements and Specifications. [verkkojulkaisu] [Viitattu: 22.08.2010]. Saatavissa: http://www.combio-project.com/download/PDF/Thermonet_Final_Report.pdf

Oasmaa, Anja & Czernik, Stefan. 1999. Fuel oil quality of biomass pyrolysis oils – State of the art for the end users. Energy & Fuels 1999: 13. s. 914-921.

Oasmaa, Anja et al. 1997. Physical characterization of biomass-based pyrolysis liquids. Application of standard fuel oil analyses. VTT publications 306

Oasmaa, Anja et al. 2003. Fast pyrolysis of forestry residue. 2. Physiochemical composition of product liquid. Energy & Fuels, 2003: 17. s. 433-443.

Ohlström, M et al. 2005. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset. Espoo: VTT. ISBN 951-38-6720-X.

Ojanperä, Kari. 2010. Strategiat menevät uusiksi. Tekniikka ja Talous 2010 nro 21, s 2-3.

Peacocke, G. V. C. & Bridgwater, A. V. 2001. Transport, handling and storage of biomass derived fast pyrolysis liquid. Teoksessa: Bridgwater, A. V., Progress in thermochemical biomass conversion Vol. 2., s. 1482-1499.

Oksanen, Antti. 2001. Energia-Tampere seminaari ”Yhdessä bioenergiaosaamista kansainvälisille markkinoille”. Tampereen teknillinen korkeakoulu 5.12.2001.

Tilastokeskus. 2010. Polttoaineluokitus 2010. [verkkojulkaisu] [Viitattu 4.7.2010]. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_2010.xls

Pyne. 2010. Pyrolysis Network [verkkojulkaisu] [Viitattu: 22.08.2010]. Newsletters and publications. Saatavissa: http://www.pyne.co.uk/?_id=20

Pöyry Energy OY. 2009. IE-direktiiviehdotuksen päästöraja-arvojen kustannusvaikutukset. [verkkojulkaisu] [Viitattu: 19.07.2010]. Saatavissa: http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/ymp%3%a4rist%3%b6pooli/liitekirjasto/p%c3%b6yry%20selvitys_q210_007b.pdf

Saacke GMBH. Pyörivähajotteinen poltin SKS 450. Käyttöönotto-ohjeet / polttimen perussäädöt.

Sanin, María Eugenia & Violante, Francesco. 2009. Understanding volatility dynamics in the EU-ETS market: lessons from the future. Université catholique de Louvain. [verkkojulkaisu]. Issue 24, p 18-19. [Viitattu 20.08.2010]. CORE discussion papers. Saatavissa: http://www.uclouvain.be/cps/ucl/doc/core/documents/coredp2009_24.pdf

SFS 5624. 1990. Ilmansuojelu. Päästöt. Savukaasun tilan määrittäminen. Suomen standardisoimisliitto SFS. 10 s.

Shaddix, Christopher R & Tennison, Paul J. 1998. Effects of char content and simple additives on biomass pyrolysis oil droplet combustion. Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion p. 1907–1914. The Combustion Institute.

Solantausta et al. 2001. Bio Fuel Oil - Upgrading by Hot Filtration and Novel Physical Methods.

St1. Biojätteistä etanolia. [verkkojulkaisu] [Viitattu: 22.08.2010]. Saatavilla: <http://www.st1.fi/index.php?id=5806>

Teboil. 2009. Tuotetiedote 2009/02 - Raskas polttoöljy 180 (tuontilaatu). [verkkojulkaisu] [Viitattu: 22.08.2010]. Saatavissa: <http://www.teboil.fi/Product.asp?path=1;1510;1503;7440;5262;4349;4590>

Uudenmaan Ympäristökeskus. 2006. Ympäristölupapäätös – Hanasaaren huippu- ja varalämpökeskus. [verkkojulkaisu] [Viitattu: 22.08.2010]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=49969&lan=FI>

Venderbosch, Robbie & Prins, Wolter. 2010. Fast pyrolysis technology development. Biofuels, Bioproducts and biorefining, 4. s. 178-208.

Vepsäläinen, Harri. 2008. Pyrolyysiöljyn tuottaminen kiertoileijukattilaan liitettyllä prosessilla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan laitos.

Zhu, Xi-Feng et al. 2009. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. Energy Conversion and Management, vol 50. s. 1376–1383.

Liite 1 Savukaasulaskut

Tässä liitteessä on esitetty savukaasumäärän sekä tuhkapitoisuuden perusteella arvioitu hiukkaspäästötaso yksikössä $\text{mg}/\text{m}^3\text{n}$ redusoituna 3% happipitoisuuteen. Euroopassa päästöt lasketaan ja ilmoitetaan nestemäisillä polttoaineilla 3% jäännöshappipitoisuudessa kuivista savukaasuista, koska muutoin ylimääräilmalla voisi laimentaa päästöjä. Kuivien savukaasujen koostumus on laskettu standardin SFS 5624 mukaisesti ja märkien savukaasujen laskenta on yksinkertaistusten vuoksi jätetty pois, sillä päästörajat ovat kuivia savukaasuja kohden. Typpi oletetaan inertiksi, polttoainehapen oletetaan vähentävän palamisen hapentarvetta ja kaikkien muiden aineiden oletetaan reagoivan reaktioyhtälöiden R1 – R3 mukaisesti.



Savukaasujen koostumus on laskettu polttoaineen alkuaine-analyysistä, joka on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Mäntypyrolyysiöljyn alkuainekoostumus(Oasmaa et al. 2010)

Alkuaine	Osuus[p-%]
Hiili	40,6
Vety	7,6
Rikki	0,01
Happi	51,7
Typpi	<0,1
Tuhka	0,03

Tarkastellaan yhtä kiloa (1 kg) pyrolyysiöljyä. Lasketaan palavat ainemäärät (yhtälö 1). Lasketaan reaktioyhtälöiden kertoimien perusteella syntyvät savukaasumäärät ja tarvittava hapen ainemäärä eri aineille taulukkoon 2. Jätetään palamisilman ja polttoaineen vesi tarkastelematta, koska käsittelemme yksinomaan kuivien savukaasujen päästöpitoisuuksia.

$$N_a = \frac{m_a}{M_a} \quad (1)$$

Taulukko 2. Polttoainekilosta syntyvien kuivien savukaasujen ainemäärätaulukko.

Aine	M, g/mol	m, kg	N, mol	O ₂ -tarve mol	N ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
C	12,011	0,4060	33,80	33,80		33,80	0,00	0,00	0,00
H ₂	2,016	0,0760	37,70	18,85		0,00	37,70	0,00	0,00
S	32,064	0,0001	0,00	0,003		0,00	0,00	0,00	0,003
O ₂	31,999	0,5170	16,16	-16,16		0,00	0,00	0,00	0,00
N ₂	28,013	0,0010	0,04	0,00		0,00	0,00	0,04	0,00
Summa		1,00	87,70	36,50		33,80	37,70	0,04	0,003

Polttoprosessista jää savukaasuihin happea valitun ilmakertoimen ($\lambda = 1,15$) ilmoittama ylimäärä. Ilmakertoimen valinta ei vaikuta 3% O₂ -redusoituun hiukkaspitoisuuteen.

$$n_{O_2} = (\lambda - 1) * n_{O_2-tarve} \quad (2)$$

Polttoprosessiin tulee palamisilman mukana myös typpeä ilmakehän koostumuksesta johtuvan kertoimen 3,77 mukaisesti

$$n_{N_2} = \lambda * 3,77 * n_{O_2-tarve} \quad (3)$$

Kuivien savukaasujen koostumus ja määrä on koottu taulukkoon 3. Ainemäärät kootaan taulukosta 1 ja lisätään palamisilman mukana tuleva happi ja typpi. Tärkein muuttuja hiukkaspäästön kannalta on kokonaissavukaasutilavuus.

Taulukko 3. Kuivien savukaasujen koostumus.

Aine	Moolimassa kg/kmol	Ainemäärä mol/kgPA	Massa kg/kgPA	Tilavuusosuus (kuivana) til-% = mol-%	Moolitilavuus m ³ n/kmol	Tilavuus, NTP m ³ n
CO ₂	44,01	33,80	1,488	17,1	22,26	0,752
SO ₂	64,07	0,0031	0,0002	0,002	21,98	0,0001
N ₂	28,02	158,27	4,435	80,1	22,40	3,55
O ₂	32,00	5,475	0,175	2,8	22,39	0,123
Summa (kuivana)		197,55	6,098	100,0		4,420

Oletetaan, että kaikki systeemiin tuleva nestemäinen aine reagoi täydellisesti yksinkertaistettujen reaktioyhtälöiden mukaisesti systeemiin tulevan palamisilman kanssa. Reagoimattoman kiintoaineen ei oleteta vähentävän oleellisesti savukaasumäärää. Oletetaan ettei palamisilmassa ole merkittävästi kiintoainehiukkasia. Palamisprosessi tuottaa tietyn määrän kaasumaista reaktiotuotetta, joka sekoittuu täydellisesti kiintoainehiukkasiin poistuen kattilan jälkeen savukaasukanavien kautta savupiipusta ulos. Hiukkasten depositio kattilan seinämille ja sedimentaatio savukaasukanavassa ennen mittauspistettä on huomioitu termillä η . Herkkyysanalyysiä varten palamattomille hiukkasille (hehkutushäviö, TOC/LOI) on varattu termi x_{TOC} , mutta perustarkastelussa oletetaan kaksin ja noen täydellinen palaminen. Redusointi referenssipitoisuuteen 3 % -O₂ tehdään standardin SFS 5624 mukaan.

Perustarkastelussa oletetaan, että kattilan ja savukaasukanavien erotusaste on lähellä nollaa, sillä kattilan nuohoustarve on ollut vähäinen raskaalla polttoöljyllä ajettaessa – kattiloita ei ole nuohottu vielä kertaakaan. Toisaalta diffuusio kattilan-konvektio-osassa voi olla merkittävää ainakin alemmilla savukaasujen virtausnopeuksilla. Myös pyrolyysiöljyn savukaasun hiukkasten tarttumisominaisuudet ovat erilaiset kuin raskaan polttoöljyn ja täysin selkeää arviota ei voida tehdä.

Pyrolyysiöljyn sekä raskaan polttoöljyn laboratoriokokeissa on saavutettu pelkän tuhkan aiheuttama hiukkaspäästötaso, mutta energiantuotannossa nestemäisen polttoaineen hiukkaspäästössä on aina paljon palamatonta hiiltä, etenkin koksia. Palamattoman kaksin ja noen osuutta voitaisiin arvioida esim. polttimen takuuarvoista mitoituspolttoaineella lasketulla hehkutushäviöllä (= palamattoman hiilen osuus hiukkasissa), mutta luku ei välttämättä olisi sama polttoainetta pyrolyysiöljyyn vaihdettaessa.

$$C_{th} = \frac{1-\eta}{1-x_{TOC}} * \frac{m_{ash}}{V_{dn}} * \frac{20,9 - E_{ref}}{20,9 - E_{th}} \quad (4)$$

Näin saadaan tuhkapitoisuudella 0,03 % päästötasoksi n. 67mg/m³n. Kaavan 4 symbolit ovat selityksineen kappaleessa 5.1.

Raskas polttoöljy

Raskaan polttoöljyn savukaasujen laskenta noudattaa samoja periaatteita kuin pyrolyysiöljynkin.

Taulukko 4. Raskaan polttoöljyn alkuainekoostumus

Aine	Osuus[%]
Hiili	87,7
Vety	11,9
Rikki	0,96
Happi	<0,5
Typpi	0,5
Tuhka	0,04

Taulukko 5. Polttoainekilosta syntyvien kuivien savukaasujen ainemäärätaulukko.

Aine	M, g/mol	m, kg	N, mol	O ₂ -tarve N, mol	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
C	12,011	0,8770	73,02	73,02	73,02	0,00	0,00	0,00
H ₂	2,016	0,1190	59,03	29,51	0,00	59,03	0,00	0,00
S	32,064	0,0096	0,30	0,299	0,00	0,00	0,00	0,299
O ₂	31,999	0,0050	0,16	-0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
N ₂	28,013	0,0050	0,18	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00
Summa		1,02	132,68	102,67	73,02	59,03	0,18	0,30

Taulukko 6. Kuivien savukaasujen koostumus.

Aine	Moolimassa kg/kmol	Ainemäärä mol/kgPA	Massa kg/kgPA	Tilavuusosuus (kuivana) til-% = mol-%	Moolitilavuus m ³ n/kmol	Tilavuus, NTP m ³ n
CO ₂	44,01	73,02	3,213	13,7	22,26	1,625
SO ₂	64,07	0,2994	0,0192	0,056	21,98	0,0066
N ₂	28,02	445,32	12,478	83,4	22,40	9,98
O ₂	32,00	15,401	0,493	2,9	22,39	0,345
Summa (kuivana)		534,04	16,203	100,0		11,952

Saadaan 3-% jäännöshapessa päästötasoksi 33mg/m³n.

Kuumahöyrysuodatettu bio-öljy

Kuumahöyrysuodatettu pyrolyysiöljy on parempilaatuista kuin raaka bio-öljy etenkin tuhka- ja alkalimetallipitoisuuksia vertailtaessa.

Taulukko 7. Kuumahöyrysuodatetun poppeliöljyn alkuainekoostumus (Oasmaa & Czernik 1999)

Alkuaine	Osuus[m-%]
Hiili	46,5
Vety	7,2
Rikki	0,02
Happi	46,1
Typpi	0,15
Tuhka	0,01

Taulukko 8. Polttoainekilosta syntyvien kuivien savukaasujen ainemäärätaulukko.

Aine	M, g/mol	m, kg	N, mol	O ₂ -tarve mol	N,	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂
C	12,011	0,4650	38,71	38,71		38,71	0,00	0,00	0,00
H ₂	2,016	0,0720	35,71	17,86		0,00	35,71	0,00	0,00
S	32,064	0,0002	0,01	0,006		0,00	0,00	0,00	0,006
O ₂	31,999	0,4610	14,41	-14,41		0,00	0,00	0,00	0,00
N ₂	28,013	0,0015	0,05	0,00		0,00	0,00	0,05	0,00
Summa		1,00	88,90	42,17		38,71	35,71	0,05	0,01

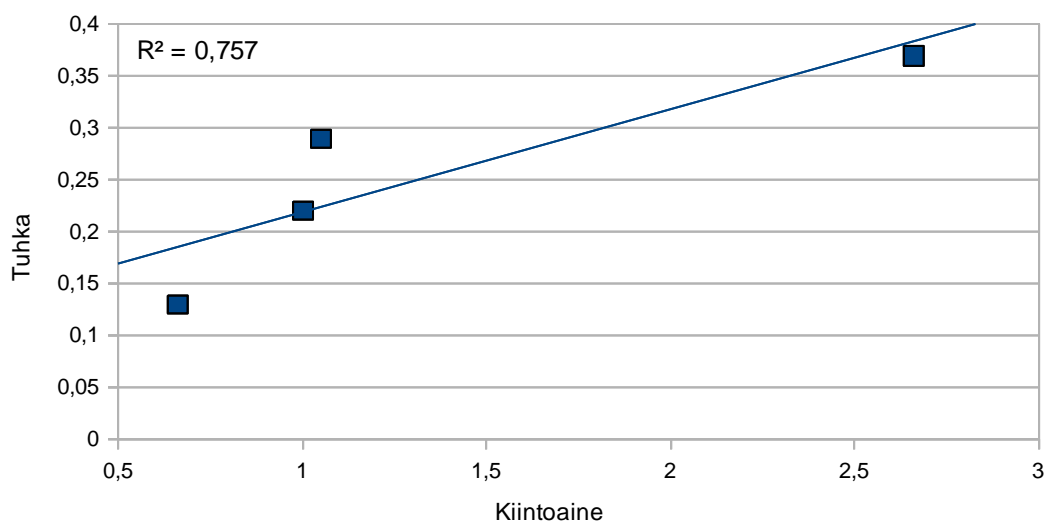
Taulukko 9. Kuivien savukaasujen koostumus.

Aine	Moolimassa kg/kmol	Ainemäärä mol/kgPA	Massa kg/kgPA	Tilavuusosuus (kuivana) til-% = mol-%	Moolitilavuus m ³ n/kmol	Tilavuus, NTP m ³ n
CO ₂	44,01	38,71	1,704	17,0	22,26	0,862
SO ₂	64,07	0,0062	0,0004	0,003	21,98	0,0001
N ₂	28,02	182,89	5,124	80,2	22,40	4,10
O ₂	32,00	6,326	0,202	2,8	22,39	0,142
Summa (kuivana)		227,93	7,031	100,0		5,100

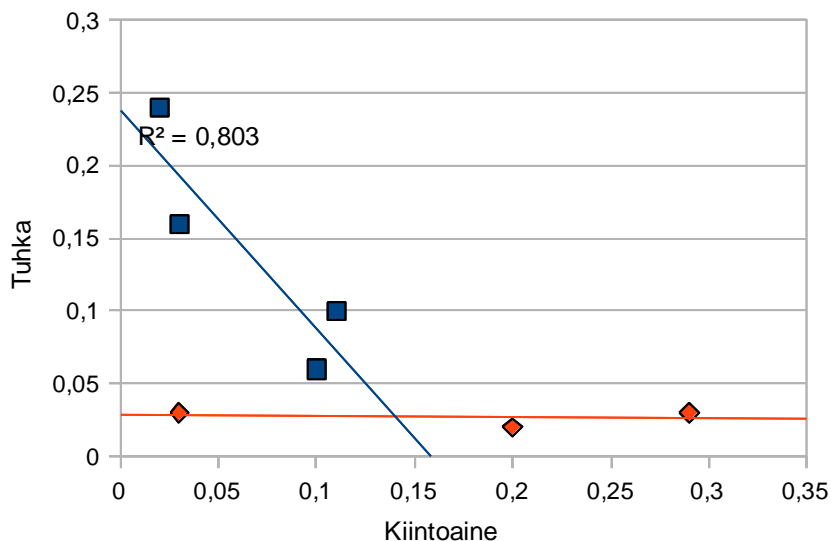
Hiukkaspäästötasoksi saadaan 19 mg/m³n.

Liite 2 Kiintoainepitoisuus vs. tuhkapitoisuus

Tuhka- ja kiintoainepitoisuudet eivät ole aina keskenään positiivisessa korrelaatiossa. Ts. korkea kiintoainepitoisuus ei välttämättä tarkoita korkeaa tuhkapitoisuutta, vaikka molemmat ominaisuudet ovat korkeina epätoivottuja ja tuhkan sanotaan kerääntyvän hiiltojäännöspartikkeleihin (Zhu et al. 2009) ja kiintoainetta pyritään erottamaan syklonein tai sentrifugein. Kuvissa 1 ja 2 näkyy lähteestä Oasmaa et al. 2003 otettujen datapisteiden kiintoaine- ja tuhkapitoisuuden (p- %) riippuvuus keskenään.



Kuva 1. Vihreästä hakkuutähteestä valmistetun pyrolyysiöljyn yläfaasi



Kuva 2. Vihreästä hakkuutähteestä valmistetun pyrolyysiöljyn alafaasi(neliö) ja mäntyöljy (vinoneliö)

Kyseinen vaikutus voi olla seurausta yläkerroksen suodattavasta vaikutuksesta, koska tyypillisesti hakkuutähteistä valmistetuilla pyrolyysiöljyillä (alafaasi on 80 – 90 % koko saannosta) kiintoainepitoisuus on pienempi kuin sahanpuruöljyillä. Tarkoituksena oli tutkia, voisiko hakkuutähteöljyn yläfaasia käyttää raskaana bio-öljynä tässä sovelluksessa. Matala kiintoainepitoisuus ei luultavasti olisi niin tärkeä kuin paineöljyhajoitteisissa polttimissa, mutta sen sijaan matala tuhkapitoisuus mahdollistaisi ajon ilman savukaasun puhdistuslaitteita. Kuitenkin aineiston ollessa niin suppea, mitään lopullista johtopäätöstä ei voida tehdä.

Liite 3 Hiilidioksidipäästöt

Jos pyrolyysiöljy on valmistettu turpeesta tai siinä on osuuksia fossiilisista polttoaineista, ei voida käyttää päästökerrointa 0 t/TJ.

Muuttuja	arvo	yksikkö	lähde
POR-kulutuksen korvaus	1950	t/a	Ympäristölupa, lasku: $0,5 \cdot 3900 \text{ t/a}$
Lämpöarvo, POR	41,1	GJ/t	tilastokeskus 2010
Lämpöenergia	80,15	TJ	lasku: $1950 \text{ t/a} \cdot 41,1 \text{ GJ/t}$: 1000GJ/TJ
POR-päästökerroin	78,8	t/TJ	tilastokeskus 2010
Hiilidioksidivähennys	6315,43	t/a	lasku: $80,135 \text{ TJ} \cdot 78,8 \text{ t/TJ}$
Päästöoikeuden hinta	15	€/t	Point carbon
Säästö	94 731,39	€/a	Lasku: $6315,43 \cdot 15 \text{ €/t}$