

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
LUT School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma

*Mikko Poutiainen*

**PYROLYYSIÖLJYN POLTINLAITTEISTO**

Työn tarkastajat:   Professori Esa Vakkilainen  
                          Tutkimusjohtaja Ari Puurtinen

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Mikko Poutiainen

## **Pyrolyysiöljyn poltinlaitteisto**

Diplomityö

2017

78 sivua, 19 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen  
Tutkimusjohtaja Ari Puurtinen

Hakusanat: pyrolyysiöljy, polttoainekäyttö, poltinjärjestelmä, käyttöönotto, liekki

Tässä diplomityössä on esitelty pyrolyysiöljyn valmistusta nopealla pyrolyysillä sekä pyrolyysiöljyn ominaisuuksia ja käyttöä polttoaineena energiantuotannon sovelluksissa. Pyrolyysiöljyn käyttö polttoaineena on ollut hyvin vähäistä, mutta tavoitteet uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämiseksi ovat kasvattaneet pyrolyysiöljyn polttoainekäytön kiinnostavuutta. Energiantuotannossa pyrolyysiöljyn etuina on etenkin nestemäinen olomuoto ja CO<sub>2</sub>-päästöjen neutraalisuus. Pyrolyysiöljyjen ominaisuudet kuitenkin asettavat tiettyjä vaatimuksia sekä vaikeuksia niiden hyödyntämisessä energiantuotannossa.

Tämän työn tavoitteena oli Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän käyttöönotto. Käyttöönoton kohteena ollut poltinjärjestelmä koostui kahden yrityksen toimittamista laitekokonaisuuksista jotka olivat pyrolyysiöljylle suunniteltuja pilottijärjestelmiä. Käyttöönotossa ilmeni monia ongelmia jotka vaikeuttivat ja viivästyttivät käyttöönottoa. Osa ongelmista johtui pyrolyysiöljyn ominaisuuksista, ja osa käytössä olleesta laitteistoista. Lopulta poltinjärjestelmä siirtyi jatkokehitykseen jossa järjestelmään toteutetaan käyttöönotossa ilmenneitä muutostarpeita ja parannuksia. Tarkoitus oli myös suorittaa poltinjärjestelmällä polttokokeita ja sisällyttää polttokokeista saatavia tuloksia tähän työhön. Polttokokeita ei kuitenkaan pystytty suorittamaan tämän työn aikana.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Degree Programme in Energy Technology

Mikko Poutiainen

### **Pyrolysis oil combustion system**

Master's thesis

2017

78 pages, 19 figures, 4 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Esa Vakkilainen  
Research Director Ari Puurtinen

Keywords: pyrolysis oil, fuel use, combustion system, commissioning, flame

Production of pyrolysis oil via fast pyrolysis, pyrolysis oil properties and use of pyrolysis oil as a fuel in energy applications are presented in this thesis. The use of pyrolysis oil as fuel has been very limited, but efforts to increase the use of renewable energy sources has increased interest in using pyrolysis oil as fuel. In energy applications the benefits of pyrolysis oil are especially its liquid form and neutrality of CO<sub>2</sub> emissions. However, the properties of pyrolysis oils poses certain requirements and difficulties when utilizing them in energy applications.

The aim of this work was to carry out commissioning of a pyrolysis oil combustion system in Savonia University of Applied Sciences' Energy Research Center. Combustion system consisted of assemblies that were provided by two companies, and used assemblies were pilot systems for pyrolysis oil. During the commissioning of the combustion system emerged several problems that complicated and delayed the commissioning. Some of the problems were caused by the properties of pyrolysis oil, and some of the problems were due to equipment used. Eventually the combustion system went into further development, where needed changes and improvements that came up during the commissioning are implemented to the combustion system. Carrying out combustion tests and including the test results in this thesis was also intended, but combustion tests could not be performed during this thesis.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa loppuvuoden 2016 ja syksyn 2017 välisenä aikana. Työn ohjaajana toimi DI Valtteri Laine. Työ on tehty yliopiston Varkauden yksikössä yhteistyössä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa.

Haluan kiittää työn ohjaajaa Valtteri Lainetta hyvästä opastuksesta ja neuvoista, yliopistoa ja ammattikorkeakoulua tämän työn mahdollistamisesta sekä myös tätä työtä koskevan projektin vetäjää Jukka Huttusta hyvästä ohjauksesta ja avusta. Kiitokset kuuluvat myös Savonia-ammattikorkeakoulun Varkauden kampuksella hyvälle työyhteisölle niin yliopiston kuin ammattikorkeakoulunkin puolella. Haluan myös kiittää perhettäni saamastani tuesta sekä kannustuksesta opiskeluni aikana.

Lappeenrannassa 26. lokakuuta 2017

*Mikko Poutiainen*

Mikko Poutiainen

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
1.1 TYÖN TAVOITTEET	15
1.2 TYÖN SISÄLTÖ	16
<b>2 PYROLYYSIÖLJYN VALMISTUS</b>	<b>17</b>
2.1 PYROLYYSIÖLJYN VALMISTUSPROSESSIT	22
<b>3 PYROLYYSIÖLJYN OMINAISUUDET</b>	<b>27</b>
3.1 VESIPITOISUUS	28
3.2 KIINTOAINEEET JA TUHKA	30
3.3 HAPPIPITOISUUS	31
3.4 STABIILISUUS	31
3.5 HOMOGEENISUUS	35
3.6 TIHEYS, VISKOSITEETTI, PINTAJÄNNITYS JA JÄHMEPISTE	36
3.7 LÄMPÖARVO JA SYTTYMISOMINAISUUDET	39
3.8 PYROLYYSIÖLJYJEN STANDARDISOINTI	40
<b>4 PYROLYYSIÖLJYN POLTTOAINEKÄYTTÖ</b>	<b>42</b>
4.1 POLTTOAINEKÄYTÖSSÄ SYNTYVÄT PÄÄSTÖT	46
4.2 PYROLYYSIÖLJYN POLTINJÄRJESTELMÄN EROT PERINTEISIIN JÄRJESTELMIIN	48
<b>5 TUTKIMUSYMPÄRISTÖ</b>	<b>51</b>
5.1 PYROLYYSIÖLJYN POLTINJÄRJESTELMÄ	52
5.2 POLTINJÄRJESTELMÄN VAARAT JA RISKIT	58
<b>6 POLTINJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖÖNOTTO</b>	<b>60</b>
6.1 ÖLJYLINJASTON KÄYTTÖÖNOTTO	63
6.2 POLTTIMEN KÄYTTÖÖNOTTO	65
6.3 POLTINJÄRJESTELMÄN JATKOKEHITYS	69
6.4 TERVEYSVAIKUTUKSET JA SUOJAVÄLINEET	70
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>72</b>
<b>LÄHDELUETTELO</b>	<b>75</b>

Litteet

Liite I Savukaasujen PI-kaavio

## **SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**

### **Alaindeksit**

e	sähkö
i	ilma
n	normaalitila
pa	polttoaine

### **Lyhenteet**

k-m <sup>3</sup>	kiintokuutiometri
p-%	painoprosentti
PAH	polysykliset aromaattiset hiilivedyt
ppm	miljoonasosa

## 1 JOHDANTO

Globaaleista ympäristöongelmista yksiä suurimpia haasteita on ilmastonmuutos, ja sen hillitseminen. Ajan kuluessa tiedostus ja huomion kiinnittäminen ilmastonmuutokseen ja ilmanpäästöihin on kasvanut huomattavasti. Nykypäivänä yksiä tärkeimpiä energiapoliittisia tavoitteita onkin fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen niistä muodostuvien hiilipäästöjen seurauksena. Tämä on nostanut ympäristöystävällisemmät polttoaineet tärkeämpään asemaan energiantuotannossa, samalla korvaten fossiilisten polttoaineiden osuutta.

Ihmiskunnan aiheuttamalla ilmastonmuutoksella tarkoitetaan globaalia ilmaston lämpenemistä. Tarkemmin kuvattuna kyseessä on viime vuosikymmeninä tapahtunut alailmakehän ja merien keskilämpötilan nousu. Ilmastonmuutos on seurausta lähinnä kasvihuonekaasujen lisääntymisestä ilmakehässä. Erityisesti hiilidioksidilla on suuri osuus ihmiskunnan aiheuttamasta ilmakehän kasvihuonekaasujen lisääntymisestä. Kasvihuonekaasujen lisääntymisellä ihmiskunta on nopeasti voimistamassa ilmakehän kasvihuoneilmiötä ja siten aiheuttamassa maapallon lämpenemistä jos ihmiskunnan toimintatapoihin ei tehdä riittäviä muutoksia.

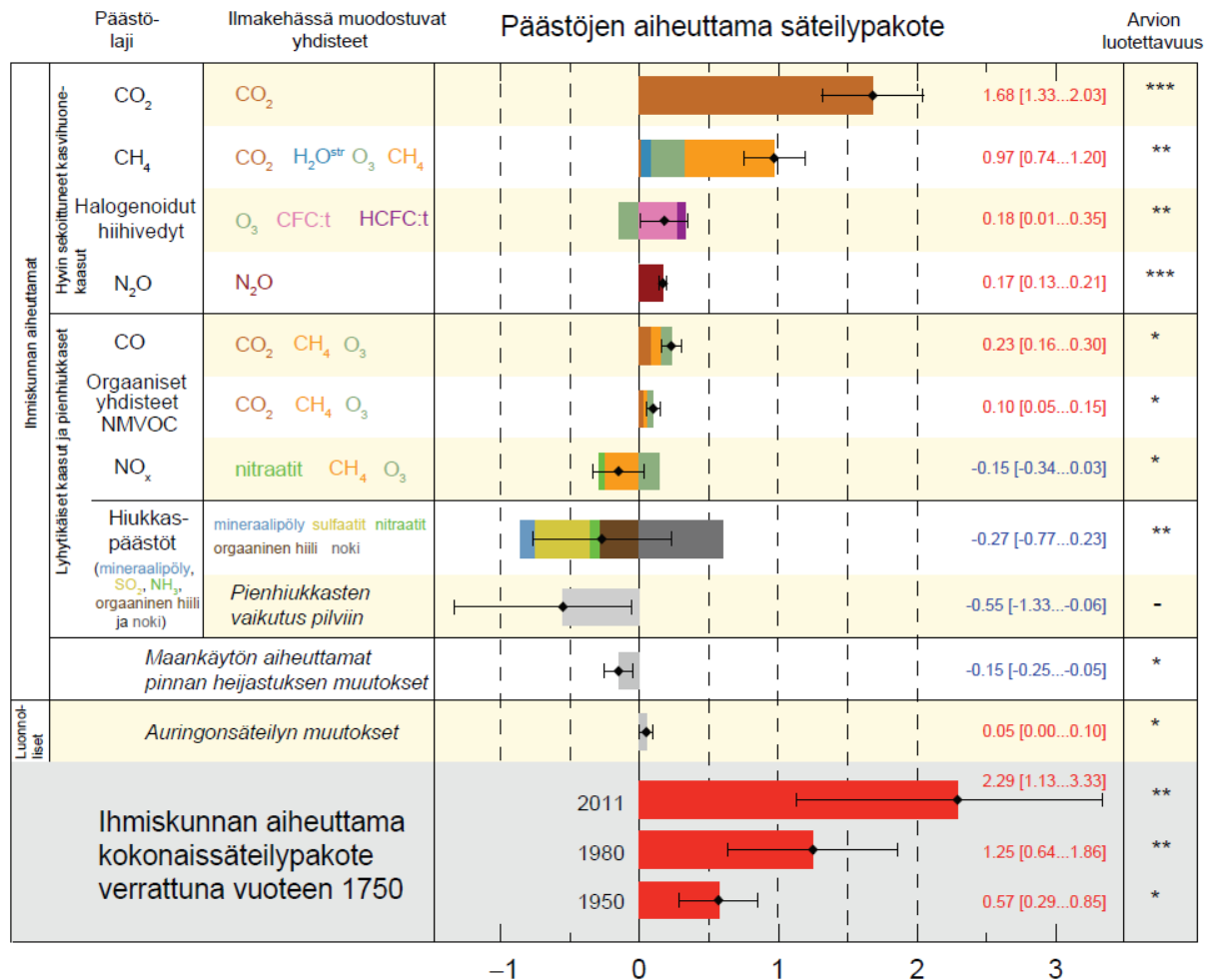
Maapallon ilmakehä aiheuttaa luonnollisen kasvihuoneilmiön joka mahdollistaa elämälle suotuisan lämpötilan: ilmakehä päästää auringon säteilyn maan pinnalle, mutta estää samalla maapallon lämpösäteilyä karkaamasta avaruuteen. Kasvihuoneilmiön seurauksena maapallon pintalämpötila on noin 15 °C, ja ilman kasvihuoneilmiötä maapallon pintalämpötila olisi noin -18 °C. Maahan saapuvasta auringon säteilystä noin 30 % heijastuu takaisin avaruuteen ja loput noin 70 % imeytyy maahan, merien pintakerrokseen sekä ilmakehään. Tällöin säteilyn energia muuttuu lämmöksi, ja seurauksena maan pinnan ja alimpien ilmakerrosten lämpötila on suhteellisen korkea. Ilmakehän kasvihuonekaasut estävät noin 90 % maanpinnan ja merien lähettämästä lämpösäteilyä karkaamasta avaruuteen, vaikka kasvihuonekaasujen pitoisuus ilmankehässä on pieni verrattuna ilmakehän valtaasuuihin, kuten typpeen ja happeen. (Nevanlinna 2008, 43–45.)

Kasvihuonekaasuilla on molekyylien rakenteista riippuvien ominaisuuksien seurauksena kyky sitoa lämpösäteilyä tietyillä aallonpituuksilla. Maahan tulevan auringonsäteilyn sijasta kasvihuonekaasut sitovat maasta ulospäin lähtevää säteilyä, koska maanpinnan lähettämä



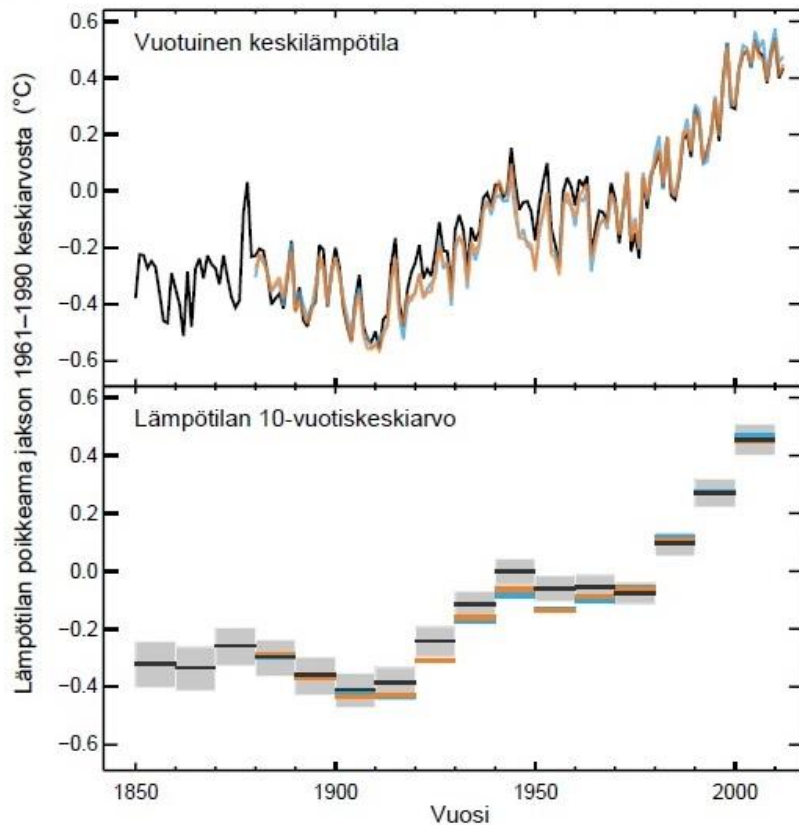
säteily on aallonpituudeltaan pienempää kuin auringon lähettämä säteily. Kasvihuonekaasujen molekyylit pystyvät myös muuttamaan vastaanottamansa energian uudelleen säteilyksi. Tällöin osa maanpinnan lähettämän säteilyn energiasta palaa takaisin. Tärkeimmät ilmakehässä luonnostaan esiintyvät kasvihuonekaasut ovat vesihöyry ( $\text{H}_2\text{O}$ ), hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), metaani ( $\text{CH}_4$ ), dityppioksidi ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sekä otsoni ( $\text{O}_3$ ). Ilmakehässä vallitsevat valta-kaasut typpi ja happi eivät aiheuta kasvihuoneilmiötä. Ilmakehässä luonnostaan esiintyvien kasvihuonekaasujen lisäksi ihmiset ovat myös tuottaneet ilmakehään luonnostaan esiintymättömiä kaasuja, kuten halogenoituja hiilivetyjä. (Nevanlinna 2008, 45.)

Luonnollisen kasvihuoneilmiön kannalta merkittävin kasvihuonekaasu on vesihöyry, ja se kattaa yli puolet luonnollisen kasvihuoneilmiön aiheuttamasta maapallon lämmityksestä (Nevanlinna 2008, 45). Ihmiskunnan tuottamista kasvihuonekaasuista tärkein on  $\text{CO}_2$ , josta aiheutuu kasvihuonekaasujen päästöistä suurin yksittäinen säteilypakote. Säteilypakotteella ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ilmaistaan kunkin tietyn pakotetekijän aiheuttamaa muutosta maan ja ilmakehän muodostaman järjestelmän säteilytaseessa, eli maapallolle saapuvan ja lähtevän säteilyn erotuksessa. Positiivinen säteilypakote vaikuttaa ilmastoon lämmittävästi ja negatiivinen vaikuttaa ilmastoon jäädyttävästi. Kuvassa 1.1 on esitetty eri ilmasto muuttavien tekijöiden säteilypakotteita maailmanlaajuisina keskiarvoina. Kuvassa on merkittynä eri päästöjen pylväisiin paras arvio mustalla pisteellä, ja epävarmuusväli mustalla janalla. Hyvin pieniä pakotetekijöitä ei ole huomioitu. Kuvan alaosassa esitetty säteilypakotteen kasvu verrattuna vuoteen 1750. Ihmiskunnan päästöjen säteilypakotteiden kokonaisarvo on kasvanut vuoden 1970 jälkeen nopeammin kuin edeltävinä vuosikymmeninä. (IPCC 2013, 13–14.)



Kuva 1.1. Ilmastoja muuttavien eri tekijöiden säteilypakotteita (IPCC 2013, 15).

Ihmiskunnan aiheuttamat kasvihuonekaasujen päästöt teollisen vallankumouksen alkamisen jälkeen ovat vaikuttaneet ilmastoon lämmittävästi, nostaen maapallon keskilämpötilaa. Kuvassa 1.2 on esitetty kolme eri tutkimuskeskuksissa laskettua maapallon keskilämpötilaa vuosittaisena sekä kymmenvuotisjaksoisena vaihteluna vuosien 1850–2012 välillä. Kuvatut keskilämpötilojen vaihtelut ovat poikkeamia referenssinä käytetystä vuosien 1961–1990 välisestä keskiarvosta. Kymmenvuotisjaksottaisessa kuvaajassa harmaalla merkitty alue kuvaa keskilämpötilan epävarmuusväliä laskettuna pisimmän käytössä olleen havaintosarjan mukaan. Viimeisimmät kolme vuosikymmentä ovat kaikki olleet lämpimämpiä kuin yksikään muu 1800-luvun puolivälin jälkeisistä vuosikymmenistä. Maapallon keskilämpötila lineaarisena trendinä laskettuna on noussut vuosien 1880–2012 välillä noin 0,85 °C. (IPCC 2013, 4–5.)



**Kuva 1.2.** Maapallon keskilämpötilan vaihtelu 1850–2012 (IPCC 2013, 5).

Useat skenaariot odottavat maapallon keskilämpötilan nousevan vuoteen 2100 mennessä yli 1,5 °C verrattuna 1800-luvun loppupuolen tilanteeseen (IPCC 2013, 23). Laskentamallien kautta ilmaston lämpenemisestä on odotettavissa monenlaisia seurauksia. Vaikutukset vaihtelevat alueittain, ja joillekin alueille niistä voi olla jopa hyötyäkin. Voimakkaalla ilmaston lämpenemisellä uskotaan kuitenkin olevan kokonaisvaltaisesti haitallinen vaikutus. Ihmiskunnan näkökulmasta haitat kohdistuisivat erityisesti köyhiin alueisiin joissa on vähemmän varaa sopeutua muuttuvaan ilmastoon ja sen vaikutuksiin. (Nevanlinna 2008, 7.)

Lämpötilojen nousun ohella muutoksia odotetaan esimerkiksi globaalisti veden kiertokulkuun joka esiintyy alueittain vaihtelevina haihdunnan ja sademäärien muutoksina. Toisaalla sateet lisääntyisivät, mutta toisaalla vähentyisivät. Kokonaisvaltaisesti runsassateisten ja kuivien alueiden erojen oletetaan kasvavan. (IPCC 2013, 23.) Laskentamallit antavat viitteitä trooppisten myrskyjen voimistumisesta, mutta samalla on kuitenkin päätelty että niiden esiintyminen voi vähentyä. Keskimääräisen ilmanpaineen oletetaan nousevan keskileveysasteilla ja laskevan napojen lähetyvillä, aiheuttaen tuulisuuden muutoksia jonka seurauksena kovat tuulet yleistyisivät joillain alueilla ja toisaalla harventuisivat. Muutoksia

odotetaan myös tapahtuvan kausittaisten ilmastoilmiöiden ajoituksissa. Ilmaston lämpötilan nousu sulattaa jäätiköitä joista vapautuva vesi nostaa meren pintaa. Lisäksi meriveden lämpeneminen nostaa meren pintaa lämpölaajenemisen johdosta. Ilmaston lämpeneminen aiheuttaa myös muutoksia merivirtoihin. Ilmastojärjestelmän muuttuminen vaikuttaa vastaavasti luontoon sekä ihmisten ja eläinten elinehtoihin monella tapaa. Vaikutuksina voi olla esimerkiksi kasvien kehityksen ja levinneisyyden muutokset, eläinlajien sukupuuttoja, sekä ihmisten elämänlaadullisia muutoksia luonnonelinkeinojen, puhtaan juomaveden saatavuuden ja tartuntatautien leviämisen kautta. (Nevanlinna 2008, 127–182.)

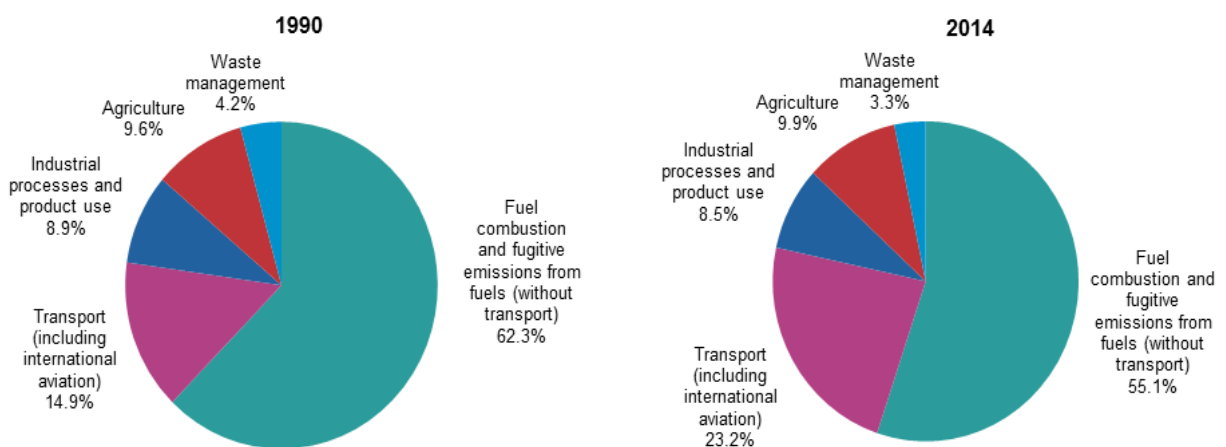
Ilmastonmuutosta ei pystytä enää pysäyttämään, mutta vaihtoehtona on kuitenkin sen hillitseminen. Jos ilmastonmuutosta ei pyritä hillitsemään, kasvavat riskit koko ilmastojärjestelmän muuttumiseksi nykyisestä tilastaan. Edellytyksenä ilmastonmuutoksen hillitsemiselle on tuntuva ja pitkäjänteinen kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, mutta päästöjen tuottajilla ei ole välttämättä omia kannustimia ja intressejä toteuttaa vähennyksiä. Asiaan kuitenkin vaikutetaan poliittisesti käyttämällä erilaisia ohjauskeinoja jotka ajavat tuottajia päästöjen vähentämiseen. Ohjauskeinot voivat olla taloudellisia, lainsäädännöllisiä tai vapaaehtoisia. Esimerkiksi taloudellinen kannustin voi olla tuet päästöttömälle energiantuotannolle, päästökauppa tai verotus. Lainsäädännölliset keinot ovat tehokkaita tavoitteiden ajamiseksi, mutta ne eivät ole välttämättä kustannustehokkaita. Vapaaehtoiset ohjaustoimet eivät ole sitovia, mutta ne voivat olla poliittisesti ja markkinoinnin näkökulmasta kannattavia.

Kasvihuonekaasujen päästöistä ja ilmastonmuutoksesta on muodostunut oma poliittinen haara. Ilmastopolitiikalla pyritään pitämään maapallon ilmastojärjestelmä vakaana siten, että ihmiskunnan toiminnat eivät aiheuttaisi ilmastojärjestelmässä vaarallisia häiriintymisiä. Toinen ilmastopolitiikan pyrkimys on saada mahdollisimman hallittu sopeutuminen ilmaston jo välttämättömään muuttumiseen. YK on kansainvälisesti tärkein ilmastopolitiikan tavoitteiden määrittäjä, ja YK:n ilmastosopimus on globaalissa mittakaavassa merkittävin ilmastopoliittinen sopimus. Vuonna 2015 sovitulla YK:n ilmastosopimusta täydentävällä Pariisin ilmastosopimuksella tavoitteena on esimerkiksi pitää maapallon keskilämpötilan nousu alle 2 °C:n verrattuna esiteolliseen aikaan, saavuttaa kasvihuonekaasupäästöjen huippu mahdollisimman nopeasti sekä vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä siten että päästöt ja nielut olisivat tasapainossa tämän vuosisadan jälkipuoliskolla. (Ympäristöministeriö 2016.) Lisäksi eritasoiset tahot sopivat ilmastopolitiikastaan tarkemmin sekä vastaavat tavoitteiden ja toimien

toteuttamisesta. Esimerkiksi EU:lla on oma jäsenmaitaan koskeva ilmastopolitiikka jonka pohjalta Suomi toteuttaa omaa valtiokohtaista ilmastopolitiikkaa.

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi on monia erilaisia keinoja, ja niitä voidaan kohdistaa esimerkiksi energiantuotantoon, -kulutukseen, -säästöön ja energiatehokkuuteen. Lisäksi kasvihuonekaasujen päästöjä voidaan ehkäistä vaikuttamalla liikenteeseen, rankentamiseen, teollisuuteen, maa- ja metsätalouteen sekä myös jätehuoltoon. EU ohjaa päästövähennyksiä esimerkiksi säädöksillä, lainmuutoksilla, päästökaupalla sekä asettamalla jäsenmailleen tavoitteita vuosittaisille kasvihuonekaasujen päästöille alueilla jotka eivät kuulu päästökaupan piiriin.

Kuva 1.3 esittää sektoreittain EU:n kasvihuonekaasupäästöjen lähteitä. Kuvattu data osoittaa että polttoaineiden käytöstä ilman liikenteen osuutta on aiheutunut yli puolet päästöistä. Liikenne kuvattuna omana päästöjen lähteenä oli toiseksi suurimpana noin 23 %:n osuudellaan. Liikenteen osuus on kasvanut merkittävästi vuoden 1990 tasoon verrattuna, samalla kun muu polttoainekäyttö on pienentänyt osuuttaan muodostuneista päästöistä. Tilasto ei sisällä maankäyttöä, maankäytön muutoksia ja metsätaloutta. Kokonaisuudessaan energiankulutus vastasi 78 % EU:n kasvihuonekaasujen päästöistä vuonna 2014. Samalla kasvihuonekaasujen päästöt olivat EU:ssa lähes 23 % alemmat verrattuna vuoteen 1990. EU on ylittämässä tavoitteensa 20 %:n kasvihuonekaasujen päästövähennyksestä vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon. Seuraava tavoite EU:lla on vuoteen 2030 mennessä saada vähennettyä kasvihuonekaasujen päästöjä 40 % vuoden 1990 tasosta. (Eurostat 2016.)



**Kuva 1.3.** EU:n kasvihuonekaasupäästöjen lähteet sektoreittain vuosina 1990 ja 2014 (Eurostat 2016).

Kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset ovat aiheutuneet osittain esimerkiksi uusiutuvien energialähteiden ja vähemmän hiili-intensiivisten polttoaineiden käytön kasvun sekä energiatehokkuuden kehityksen seurauksena. EU:n kasvihuonekaasujen päästöt ovat vuosien 1990 ja 2014 välillä vähentyneet suurimmassa osassa päästölähteitä. Suurin yksittäinen vähennys on muodostunut sähkön ja lämmön tuotannossa. Seuraavaksi suurimmat vähennyksessä ovat muodostuneet teollisuudessa sekä asumisessa. Suurin osa kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksistä muodostui suoraan CO<sub>2</sub>-päästöjen vähennyksistä, mutta myös esimerkiksi N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub> -päästöt ovat vähentyneet huomattavasti verrattaessa vuoteen 1990. Kaikkein merkittävimmässä asemassa on CO<sub>2</sub>, joka kattoi vielä 81 % kasvihuonekaasujen päästöistä EU:ssa vuonna 2014. Vuoteen 1990 verrattuna CO<sub>2</sub>-päästöt ovat vähentyneet 22 %. Vuosien 2013 ja 2014 välillä lasku oli 5 %. (EEA 2016, 6–10.)

Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen ja sen kautta fossiilisten polttoaineiden osuuden vähentäminen on hyvin potentiaalinen ja tehokas keino kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. EU:lla on tavoitteena kattaa energiankulutuksesta uusiutuvilla energialähteillä 20 % vuoteen 2020 mennessä ja 27 % vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2014 uusiutuvan energian osuus oli lähes 16 % EU:n energiankulutuksesta. Uusiutuvista energialähteistä bioenergia on hyvin tärkeässä roolissa EU:n ilmastonmuutokseen liittyvien tavoitteiden saavuttamisessa, ja bioenergian käytössä odotetaan vuoteen 2020 mennessä yli 30 %:n kasvua vuoden 2014 tasosta. Bioenergia on EU:ssa eniten käytetty uusiutuva energianlähde kattaen 10 % energian kokonaiskulutuksesta vuonna 2014. Uusiutuvan energialähteen tuoman ympäristöystävällisyyden lisäksi bioenergialla saadaan myös vähennettyä energiariippuvuutta tuontilähteistä. Vuonna 2014 EU:n energiariippuvuuden taso tuontilähteistä oli noin 53 % josta fossiiliset polttoaineet käsittivät yli 99 %. Esimerkiksi Yhdysvalloissa energiariippuvuus tuontilähteistä on noin 14 %. Käyttämällä bioenergiaa laajemmilla käyttöalueilla saadaan myös monipuolistettua energiantuotantoa sekä hyödynnettyä paremmin paikallisia raaka-ainepotentiaaleja. (AEBIOM 2016, 7–15.)

Bioenergia käsittää laajan alueen raaka-aineita ja muunnosteknologioiden kautta myös laajan käyttökohteiden alueen. Käyttökohteiltaan bioenergia onkin monipuolisin uusiutuva energialähde, sillä uusiutuvista energialähteistä ainoastaan biomassasta pystytään tarjoamaan polttoaineita kiinteässä, nestemäisessä sekä kaasumaisessa muodossa. Tämä antaa biopolttoaineiden käytölle energialähteenä sekä myös fossiilisten polttoaineiden korvaajana monia potentiaalisia puolia, sillä biomassan käyttöä voidaan laajentaa perinteisimpien

teollisuuden, energiantuotannon ja lämmityksen käyttökohteiden ulkopuolelle. Esimerkiksi biokaasulla sekä nestemäisillä biopolttoaineilla kuten biodieselillä, bioetanolilla ja pyrolyysiöljyllä bioenergian käyttöä voidaan laajentaa esimerkiksi maakaasun tai polttoöljyn korvaajaksi sekä autojen voimanlähteeksi.

Biomassan muuntaminen arvokkaampiin energiamuotoihin tapahtuu erilaisten prosessien avulla, kuten biologisilla, mekaanisilla ja lämpökemiallisilla prosesseilla. Lämpökemiallisista muunnosprosesseista etenkin pyrolyysi on kasvattanut huomattavasti kiinnostavuuttaan. Nopealla pyrolyysillä saadaan biomassasta tuotettua korkealla saannolla pyrolyysiöljyä jota voidaan suoraan varastoida, kuljettaa ja käyttää erilaisissa käyttökohteissa polttoaineena, energiantantajana tai kemikaalien lähteenä. Pyrolyysiöljyn suurimmat edut ovat sen nestemäinen olomuoto ja valmistus uusiutuvista raaka-aineista. Pyrolyysiöljyjen käyttö polttoaineena on vielä tänä päivänä hyvin vähäisessä asemassa. Pyrolyysiöljyt nähdään potentiaalisena polttoaineena etenkin raskaan ja kevyen polttoöljyn käytön korvaamisessa. Pyrolyysiöljyt ovat kuitenkin ominaisuuksiltaan täysin erilaisia verrattuna fossiilisiin polttoöljyihin, ja pyrolyysiöljyjen omintakeiset sekä poikkeavat ominaisuudet luovat ongelmia niiden hyödyntämisessä. Pyrolyysiöljyjen ominaisuudet ovat luoneet tarpeen kehittää uusia teknologioita ja järjestelmiä jotta pyrolyysiöljyjä pystytään käyttämään tehokkaasti sekä luotettavasti polttoaineena erilaisissa energiantuotannon sovelluksissa.

## 1.1 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena oli suorittaa Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän käyttöönotto. Tavoitteena oli myös käyttöönoton jälkeen suorittaa polttokokeita sekä analysoida mittausdatan perusteella polttimen toimintaa, pyrolyysiöljyn palamista ja syntyviä savukaasuja. Pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmää oli tarkoitus pyrkiä optimoimaan hyvän palamisprosessin ja alhaisten päästötasojen aikaansaamiseksi. Varsinaisia polttokokeita ei kuitenkaan pystytty suorittamaan tämän työn aikana, sillä käyttöönotossa ilmenneiden vaikeuksien seurauksena poltinjärjestelmä lopulta siirrettiin jatkokehitykseen. Edellisen seurauksena tässä työssä keskityttiin energiatutkimuskeskuksen poltinjärjestelmän osalta ainoastaan käyttöönottoon.

Energiatutkimuskeskuksen pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmällä on tarkoitus hankkia tietoa sekä kokemusta pyrolyysiöljyn käytettävyydestä ja päästöistä etenkin pienen kokoluokan järjestelmässä. Lisäksi järjestelmällä on tarkoitus tehdä tulevaisuudessa muutakin tutkimustyötä. Tätä työtä aloittaessa energiutkimuskeskuksessa ei ollut muodostunut kokemusta pyrolyysiöljyn käytettävyydestä ja siihen liittyvistä ongelmista. Energiatutkimuskeskuksen pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmä oli tällöin vielä keskeneräinen mekaanisilta asennuksilta sekä ohjausjärjestelmän osalta.

## **1.2 Työn sisältö**

Tämän työn alussa on käsitelty teoreettisella tasolla pyrolyysiöljyn valmistusta nopealla pyrolyysillä. Myös pyrolyysiöljyn valmistusprosessin toteuttamista käytännössä on tarkasteltu lyhyesti. Pyrolyysiöljyn valmistuksen jälkeen luvussa 3 on syvennytty pyrolyysiöljyn ominaisuuksiin. Luku 4 keskittyy pyrolyysiöljyn polttoainekäyttöön, jossa tarkastellaan pyrolyysiöljyn palamiseen liittyviä ominaispiirteitä sekä syntyviä päästöjä lähinnä kattilakäytön näkökulmasta. Lopuksi luvussa 4 tarkastellaan lyhyesti pyrolyysiöljyn ominaisuuksien aiheuttamia vaatimuksia ja eroja poltinjärjestelmien toteutuksessa verrattuna fossiilisten polttoöljyjen poltinjärjestelmiin.

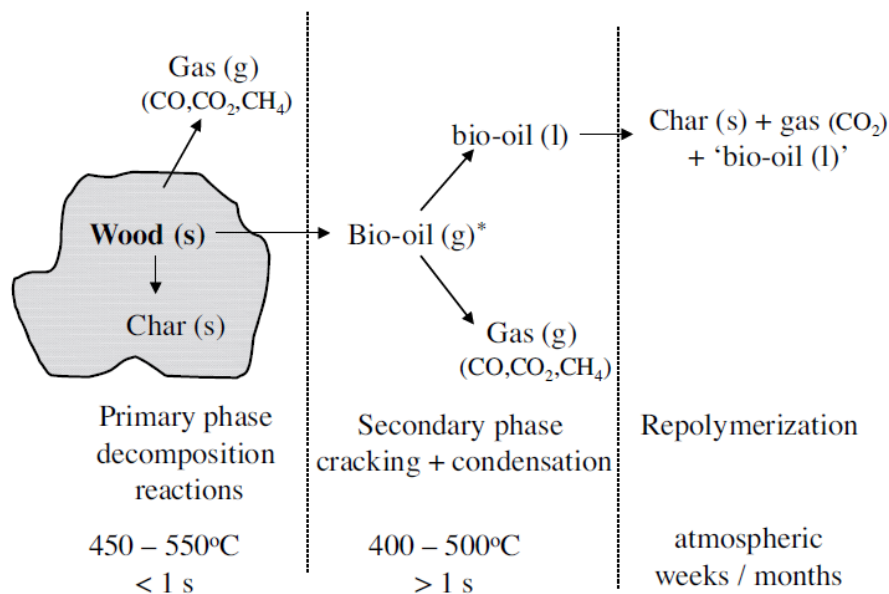
Luvussa 5 on esitelty tutkimusympäristönä toiminutta energiutkimuskeskusta sekä pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmää ja siihen liittyviä komponentteja. Käyttöön otettava poltin vaihtui tämän työn aikana luvussa 5 esitellystä polttimesta toiseen polttimeen jota ei tässä työssä esitellä yrityssalaisuuksien johdosta. Luku 6 keskittyy pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän käyttöönottoon, käyttöönotossa esiintyneisiin ongelmiin ja tarvittaviin muutoksiin poltinjärjestelmässä. Viimeinen luku kokoaa edelliset luvut yhteen.



## 2 PYROLYYSIÖLJYN VALMISTUS

Pyrolyysi tarkoittaa kuivatislausta, eli lämpökemiallista reaktiota jossa hapettomissa olosuhteissa kuumennettu orgaaninen kiinteä aine hajoaa. Biomassalle pyrolyysiprosessit tehdään ilmanpaineessa ja 300–600 °C:n lämpötila-alueella (Venderbosch & Prins 2011, 124). Biomassan pyrolyysissä muodostuu kiinteää hiilijäännöstä, höyryjä, aerosoleja sekä kondensoitumattomia kaasuja. Pyrolyysissä syntyneet höyryt voidaan kondensoida nesteeksi, eli pyrolyysiöljyksi.

Biomassan pyrolyysi voi olla endoterminen tai eksoterminen reaktio riippuen raaka-aineesta ja reaktiolämpötilasta. Esimerkiksi holoselluloosamateriaaleille pyrolyysi on endoterminen alle 450 °C:ssa, jonka jälkeen korkeammissa lämpötiloissa se muuttuu eksotermiseksi. Kuvassa 2.1 on esitetty yksinkertaisessa muodossa mahdollinen reaktioreitti biomassan pyrolyysille. Myös muitakin mekanismeja on esitetty kirjallisuudessa. Riittävän nopean lämmityksen seurauksena biomassapartikkeli hajoaa ensin kiinteäksi hiilijäännökseksi (hiiltä, tuhkaa, reagoimatonta biomassaa) ja pyrolyysihöyryiksi, jotka sisältävät pysyviä kaasuja (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) sekä kondensoitavia kaasuja. Kondensoitava osa pyrolyysihöyryistä sisältää myös biomassan sisältämän kosteuden sekä veden joka muodostuu kemiallisten reaktioiden seurauksena biomassapartikkelin hajoamisen aikana. Kuvan 2.1 toisessa asteessa kondensoitavista pyrolyysihöyryistä voi muodostua lisää kondensoitumattomia kaasuja sekundaaristen hajoamisreaktioiden kautta. (Venderbosch & Prins 2011, 127.)



**Kuva 2.1.** Reaktioreitit puupartikkelin pyrolyysissä (Venderbosch & Prins 2011, 127).

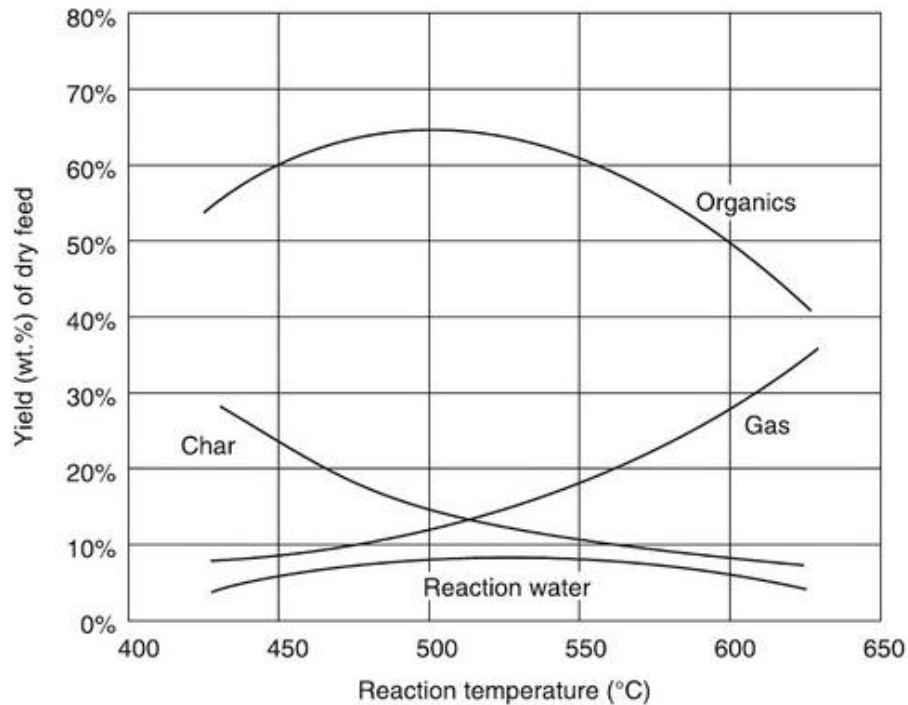
Monet tutkijat ehdottavat pyrolyysin mallintamiselle yksittäisen partikkelin malleja jotka perustuvat partikkelin sisällä tapahtuviin fundamentaalsiin kemiallisiin ja fysikaalisiin ilmiöihin. Ei tule kuitenkaan olettaa että yksikertainen kineettinen malli käsittäisi kaiken faktan hiilivetyjen pyrolyysikäyttäytymisestä, sillä todellisuudessa biomassan hajoaminen pyrolyysissä käsittää lämmön aiheuttaman monimutkaisen reaktioiden sarjan. Eri biomassojen välillä on laaja variaatio koostumuksessa sekä rakenteessa, ja raportoidut reaktionopeudet vaihtelevat laajasti jopa yksittäisillä biomassatyypeillä kuten puumateriaaleilla. Lisäksi biomassan pääkomponenteilla selluloosalla, hemiselluloosalla ja ligniinillä on erilaiset termiset hajoamiskäyttäytymiset jotka riippuvat lämmitysnopeudesta ja epäpuhtauksien läsnäolosta. Suurin osa selluloosasta konvertoituu kondensoitaviksi höyryiksi, mutta hemiselluloosa ja ligniini tuottavat hajotessaan merkittäviä määriä kiinteää hiilijäännöstä ja kondensoitumattomia kaasuja. (Venderbosch & Prins 2011, 125–128.)

Biomassan pyrolyysissä muodostuvien eri lopputuotteiden suhteisiin pystytään vaikuttamaan pyrolyysiprosessin parametrien kautta, kuten prosessilämpötilalla ja pyrolyysihöyryjen viipymäajalla. Pyrolyysissä tietyn lopputuotteen osuuden nostamiseksi mahdollisimman suureksi tulee prosessiin muodostaa biomassan hajoamiselle oikeanlaiset olosuhteet, koska lämpötilan kehittyminen raaka-ainepartikkelin sisällä sekä sitä vastaavat reaktiokinetiikat hallitsevat biomassan hajoamista ja lopputuotteiden osuuksien muodostumista. (Venderbosch & Prins 2011, 125.) 1980-luvulla tutkijat havaitsivat mahdollisuuden kasvattaa nestemäisen lopputuotteen saantoa pyrolyysissä toteuttamalla biomassan lämmitys nopeasti korkeaan lämpötilaan sekä nopeasti kondensoimalla syntyneet höyryt. Kyseistä tapaa kutsutaan nopeaksi pyrolyysiksi, ja se on optimaalinen ratkaisu biomassan konvertoimiseksi pyrolyysiöljyksi sillä sen avulla saadaan pyrolyysiöljylle korkea saanto. (Mohan et al. 2006, 848.)

Raaka-aineesta kondensoitavien höyryjen mahdollisimman suuren osuuden tuottamisen lisäksi nopeassa pyrolyysissä on tarkoitus myös höyryjen viipymäaika rajoittamalla estää biomassan primaaristen hajoamistuotteiden rikkoutuminen termisesti sekä katalyyttisesti sekundaarisiksi hajoamistuotteiksi. Tällöin primaarisista hajoamistuotteista muodostuisi pieniä kaasumolekyylejä joita ei voida enää kondensoida prosessissa. Viipymäaika höyryillä on prosessissa hyvin lyhyt, yleensä alle 2 sekuntia. Nopeassa pyrolyysissä tulee pyrkiä myös estämään primaarisia hajoamistuotteita yhdistymästä kiinteään hiilijäännökseen. (Venderbosch & Prins 2011, 125.) Nopeassa pyrolyysissä käytetään tarkasti hallittua lämpötilaa, ja biomassan nopea lämmitys hapettomissa olosuhteissa tapahtuu tyypillisesti noin 425–500 °C:seen. Tällöin

biomassan pääkomponentit hemiselluloosa, selluloosa ja ligniini hajoavat nopeasti. Muodostuneet höyry jäädytetään sekä kondensoidaan nopeasti, ja tällöin pyrolyysin lopputuotteista valtaosaksi muodostuu pyrolyysiöljyä. Prosessi pystyy toimimaan ilman raaka-ainehukkaa, sillä pyrolyysiöljyn lisäksi myös syntyneet kiinteä hiilijäännös ja kondensoitumattomat kaasut voidaan käyttää polttoaineena. (Mohan et al. 2006, 854–855.)

Jos pyrolyysissä biomassaa lämmitetään hitaasti nopeaa pyrolyysiä alhaisemmissa lämpötiloissa, muodostuu kiinteästä hiilijäännöksestä pääasiallinen lopputuote. Esimerkiksi ligniinin hajoaminen on vähäistä matalissa lämpötiloissa ja tällöin ligniiniä voi jäädä hajoamatta kiinteään ainekseen. Hidas lämmitys myös kasvattaa haihtuvien yhdisteiden sekundaarisia reaktioita takaisin kiinteään ainekseen. (Di Blasi 2008, 49.) Hyvin nopea lämmitys korkeisiin lämpötiloihin tuottaa paljon haihtuvia yhdisteitä joka minimoi hiilijäännöksen muodostumisen, ja tällöin pyrolyysin lopputuotteiden hallitseviksi osuuksiksi saadaan neste- ja kaasufraktiot. Tämä vaatii voimakkaan lämmönsiirtymisen raaka-ainepartikkelissa jolloin käytettävä raaka-aine tulee olla hienojakoista. (Mohan et al. 2006, 854–855.) Nopeaa lämmitystä ja korkeaa pyrolyysilämpötilaa käytettäessä höyryjen viipymäajan pidentäminen johtaa merkittävään vähennykseen nestemäisen lopputuotteen saannossa höyryjen sekundaaristen hajoamisreaktioiden seurauksena. Tällöin kondensoitumattomat kaasut muodostuvat hallitsevaksi lopputuotteeksi. Mitä pidempään pyrolyysihöyryt ovat korkeissa lämpötiloissa, sitä suurempaa on sekundaaristen hajoamisreaktioiden laajuus. (Oasmaa & Peacocke 2001, 11–12.) Kuvassa 2.2 on esitetty lämpötilan vaikutus haapapuun pyrolyysissä muodostuvien lopputuotteiden osuuksiin. Kuvassa 2.2 kemiallisissa reaktioissa syntyvä vesi on kuvattu erillisenä lopputuotteena vaikka kyseinen vesi päätyy kondensoinnin kautta pyrolyysiöljyyn.

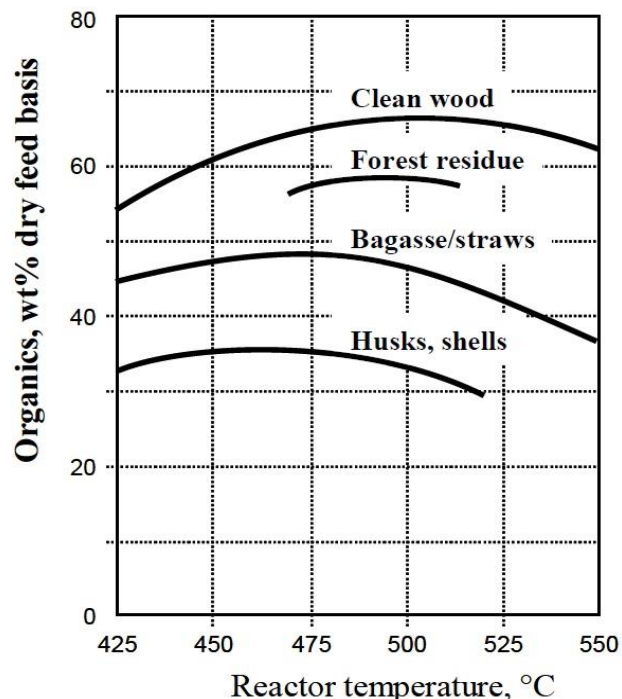


**Kuva 2.2.** Lämpötilan vaikutus haapapuun pyrolyysissä saatavien lopputuotteiden osuuksiin (Bridgwater 2013, 134).

Nopealla pyrolyysillä saadaan tuotettua biomassasta noin 60–75 p-% pyrolyysiöljyä, 15–25 p-% kiinteää hiilijäännöstä sekä 10–20 p-% kondensoitumattomia kaasuja (Mohan et al. 2006, 854-855). Venderbosch & Prins (2011, 126) esittävät että pyrolyysiöljyn saanto puuperäisestä raaka-aineesta on tyypillisesti 60–70 p-%:n välillä, ja yli 70 p-%:n saanto on poikkeuksellinen johon päästään vain tarkoin määritetyillä raaka-aineilla kuten selluloosalla. Vastaavasti Lehto et al. (2013, 14) esittävät nopeassa pyrolyysissä kuorettomalle puulle tyypillisiksi lopputuotteiden osuuksiksi noin 64 p-% orgaanista nestettä, 12 p-% orgaaniseen nesteeseen liuennutta vettä, 12 p-% kondensoitumattomia kaasuja ja 12 p-% kiinteää hiilijäännöstä.

Raaka-aineena pyrolyysiöljyn valmistamiseksi voidaan käyttää lähes mitä tahansa biomassaa. Raaka-aineella on kuitenkin vaikutus pyrolyysiöljyn saantoon. Kun nopea pyrolyysi toimii tyypillisillä toiminta-arvoilla, johtuvat vaihtelut pyrolyysiöljyn saannossa pääasiassa raaka-aineiden fysikaalisista ja kemiallisista koostumuksista sekä raaka-aineen epäorgaanisen aineksen määrästä ja koostumuksesta. (Lehto et al. 2013, 14.) Käytettävä raaka-aine vaikuttaa myös pyrolyysiöljyn ominaisuuksiin sekä laatuun, ja näiden huomiointi pyrolyysiöljyn valmistuksessa on tärkeää koska ne ovat merkittävässä roolissa pyrolyysiöljyn käytön kannalta. Erityisesti puubiomassa kuten puuaines, puun kuori sekä hakkuutähteet ovat potentiaalisia

raaka-aineita pyrolyysiöljylle. Puubiomassasta saadaan tuotettua pyrolyysiöljyä hyvällä saannolla, ja lisäksi puubiomassasta tuotettu pyrolyysiöljy tavallisesti myös parhaimman laatuista kun tarkastellaan lopputuotteen hiili-, vety- sekä vesipitoisuutta. (Butler et al. 2011, 4175.) Kuvassa 2.3 verrataan pyrolyysiöljyn saantoja lämpötilan funktiona käytettäessä muutamia eri raaka-aineita. Kuva 2.3 osoittaa että puhtaasta puuaineksesta ja hakkuutähteistä saadaan tuotettua pyrolyysiöljyä huomattavasti paremmalla saannolla kuin maataloustähteistä.



**Kuva 2.3.** Pyrolyysiöljyn saantoja puubiomassalla sekä maataloustähteillä (Lehto et al. 2013, 14).

Pyrolyysiöljyn hyvän saannon ja laadun takaaminen muodostaa raaka-aineelle tiettyjä vaatimuksia. Nopeassa pyrolyysissä käytettävälle raaka-aineelle optimaalisia ominaisuuksia ovat etenkin alhainen kosteuspitoisuus, pieni partikkelikoko, tasalaatuisuus ja alhainen epäorgaanisten yhdisteiden (tuhkan) pitoisuus. Pyrolysoitavalla raaka-aineella tulee olla alhainen kosteuspitoisuus koska raaka-aineen sisältämä kosteus päätyy valmistusprosessissa pyrolyysiöljyyn. Tällöin raaka-aineen kosteuspitoisuutta vähentämällä ennen nopeaa pyrolyysiä saadaan pienennettyä valmistetun pyrolyysiöljyn vesipitoisuutta. Koska biomassalla on pääsääntöisesti alhainen lämmönjohtavuus, tarvitsee nopea pyrolyysi tyypillisesti hyvin hienojakoisen raaka-aineen. Tällöin lämmönsiirto ja lämmitysnopeus raaka-aineelle saadaan riittävän suuriksi. Liian suurissa raaka-ainepartikkeleissa muodostuvat alhaiset lämmitysnopeudet johtavat hiilijäännöksen osuuden kasvamiseen. (Bridgwater 2012, 69–70.)

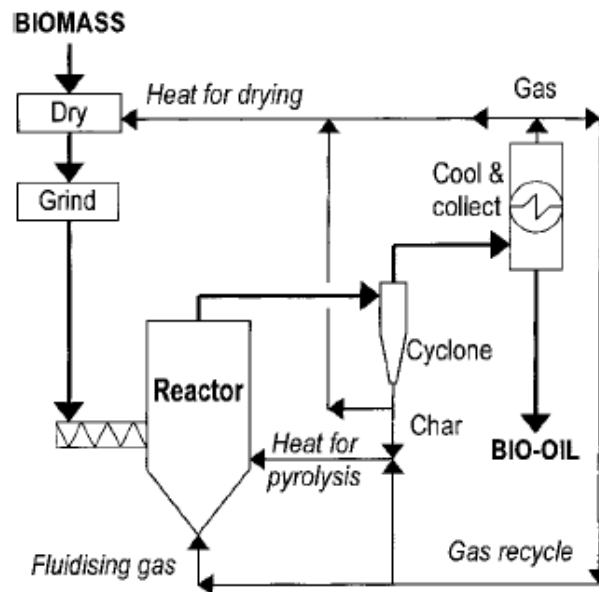
Raaka-aineen tuhkapitoisuudella on merkittävä vaikutus pyrolyysiöljyn saantoon ja laatuun. Biomassan tuhka sisältää hyvin aktiivisina katalyytteinä toimivia alkalimetalleja joiden seurauksena suorassa kosketuksessa pyrolyysihöyryjen kanssa tuhka katalysoi sekundaarisia hajoamisreaktioita heikentäen pyrolyysiöljyn saantoa sekä laatua. Käytettäessä nopeassa pyrolyysissä raaka-aineena biomassaa jolla on korkea tuhkapitoisuus, voi pyrolyysiöljyn saanto pudota jopa alle 50 p-%:n. Raaka-aineen tuhkapitoisuutta voidaan pienentää pesemällä raaka-ainetta vedellä tai laimealla hapolla. Raaka-aineen pesussa on noudatettava varovaisuutta, sillä raaka-aine alkaa menettämään hydrolyysin kautta hemiselluloosaa ja sen jälkeen selluloosaa jos pesuolosuhteet ovat tarpeeksi voimakkaita. Tämä vähentäisi pyrolyysiöljyn saantoa ja laatua. Jos pesussa käytetään happoa, tulee raaka-aineesta pyrkiä poistamaan happo mahdollisimman hyvin. Lisäksi pesun jälkeen märkä biomassa tulee kuivata. Raaka-aineen pesua pidetään yleensä toteuttamiskelpoisena vain epätavallisissa olosuhteissa. (Bridgwater 2012, 80; Venderbosch & Prins 2011, 128.)

Nopeassa pyrolyysissä lähes kaikki raaka-aineen sisältämä tuhka pidättäytyy kiinteässä hiilijäännöksessä. Hienot hiilipartikkelit kuitenkin kulkeutuvat helposti pyrolyysireaktorista kaasuvirran mukana ja kerääntyvät pyrolyysiöljyyn. Pyrolyysihöyryjen sekundaaristen hajoamisreaktioiden katalysoinnin lisäksi hiilipartikkelien mukana kulkeutuva tuhka aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia myös pyrolyysiöljyssä. Näiden seurauksena kaasuvirran mukana kulkeutuvien hiilipartikkelien nopea sekä mahdollisimman hyvä erotus on toivottavaa. Onnistunut hiilipartikkelien erottaminen myös poistaa lähes kaiken tuhkan. (Oasmaa & Peacocke 2010, 12–13.)

## 2.1 Pyrolyysiöljyn valmistusprosessit

Hitaaseen pyrolyysiin verrattuna nopea pyrolyysi tarvitsee useampia prosessivaiheita ja rakenteeltaan sekä olosuhteiltaan erilaisen pyrolyysireaktorin. Nopean pyrolyysin prosessikokonaisuus voidaan katsoa koostuvan seuraavista prosessivaiheista: biomassan esikäsitteleminen, biomassan pyrolyysi, kiintoaineen erotus, nesteen keräys sekä lämmöntuotanto raaka-aineen kuivaukseen ja pyrolyysiin. Kuvassa 2.4 on esitetty konsepti leijupetireaktoriin perustuvan nopean pyrolyysin prosessikaaviosta. Pyrolyysiprosessi voidaan toteuttaa niin ettei siitä muodostu jätettä. Sivutuotteena syntyneet kondensoitumattomat kaasut voidaan kierrättää

takaisin pyrolyysireaktoriin tai käyttää polttoaineena. Myös kiinteä hiilijäännös voidaan käyttää polttoaineena tai muissa tarkoituksissa, kuten maanparannusaineena. Kyseisten sivutuotteiden osalta on yleistä että niitä käytetään nopean pyrolyysin energiatarpeisiin. (Suopajarvi 2013, 51–52.) Nopean pyrolyysin tarvitsema energia vastaa noin 15 % raaka-aineena käytettävän biomassan energiasisällöstä (Bridgwater 2012, 76).



**Kuva 2.4.** Konsepti nopean pyrolyysin prosessikaaviosta (Bridgwater & Peacocke 2000, 4).

Raaka-aineen esikäsittely voi olla tarpeen ennen nopeaa pyrolyysiä. Etenkin kosteuspuitoisuuden ja partikkelikoon tulee olla sopivia pyrolyysin kannalta. Tyypillisesti raaka-aine kuivataan alle 10 %:n kosteuspuitoisuuteen (Bridgwater 2012, 69–70). Kuivaus ei ole välttämättä tarpeen kaikkien raaka-aineiden kohdalla, sillä jotkin raaka-aineet voivat olla luonnollisesti kuivia. Kuivaus voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä prosessin tuottamia hukkalämmön lähteitä, kuten savukaasujen sisältämää lämpöenergiaa. Raaka-aineen partikkelikoon vaatimukset riippuvat pyrolyysireaktorista. Pyörivään kartioon perustuvilla reaktoreilla vaadittava raaka-aineen partikkelikoko voi olla alle 200  $\mu\text{m}$ . Siirto- ja kiertoleijupetiin perustuvilla reaktoreilla partikkelikokona on alle 6 mm. Ablatioreaktoreilla voi olla hyväksyttävää käyttää raaka-aineena jopa kokonaisia hakepaloja. Erot raaka-aineelta vaadittavassa partikkelikoossa johtuvat erilaisista lämmönsiirron mekanismeista eri reaktorityyppien välillä. (Bridgwater & Peacocke 2000, 4.)

Nopean pyrolyysin keskeisenä osana on pyrolyysireaktori jonka ympärille on keskittynyt suurin osa nopean pyrolyysin tutkimuksesta ja kehityksestä (Bridgwater 2012, 70). Nopealle pyrolyysille on kehitetty monia erilaisia reaktortyyppisiä, ja useimmilla reaktoreilla saadaan puuperäisestä raaka-aineesta pyrolyysiöljyn saannoksi 65–75 %. Olennaisimmat ominaisuudet nopean pyrolyysin reaktorin toiminnalle ovat hyvin suuri lämmitysnopeus, tehokas lämmönsiirto, tarkoin hallittava pyrolyysilämpötila sekä nopea pyrolyysihöyryjen jäähtyminen. Nopealle pyrolyysille yleisimpänä reaktortyyppinä ovat leijupetiin perustuvat reaktorit johtuen niiden yksikertaisesta rakenteesta, helppokäyttöisyydestä ja teknologian valmiudesta kokoluokkaa kasvatettaessa. Leijupetireaktoreilla saavutetaan myös hyvä lämpötilan hallinta sekä hyvin tehokas lämmönsiirtyminen. Muita yleisiä nopean pyrolyysin reaktortyyppisiä ovat siirtopeti, pyörivä kartio, ablaatio sekä tyhjiö. (Bridgwater & Peacocke 2000, 3–4; Bridgwater et al. 1999, 1481.) Nopean pyrolyysin eri reaktortyyppien toimintaa ja ominaisuuksia on käsitelty laajasti seuraavissa artikkeleissa: Butler et al. (2011), Venderbosch & Prins (2010), ja Ringer et al. (2006).

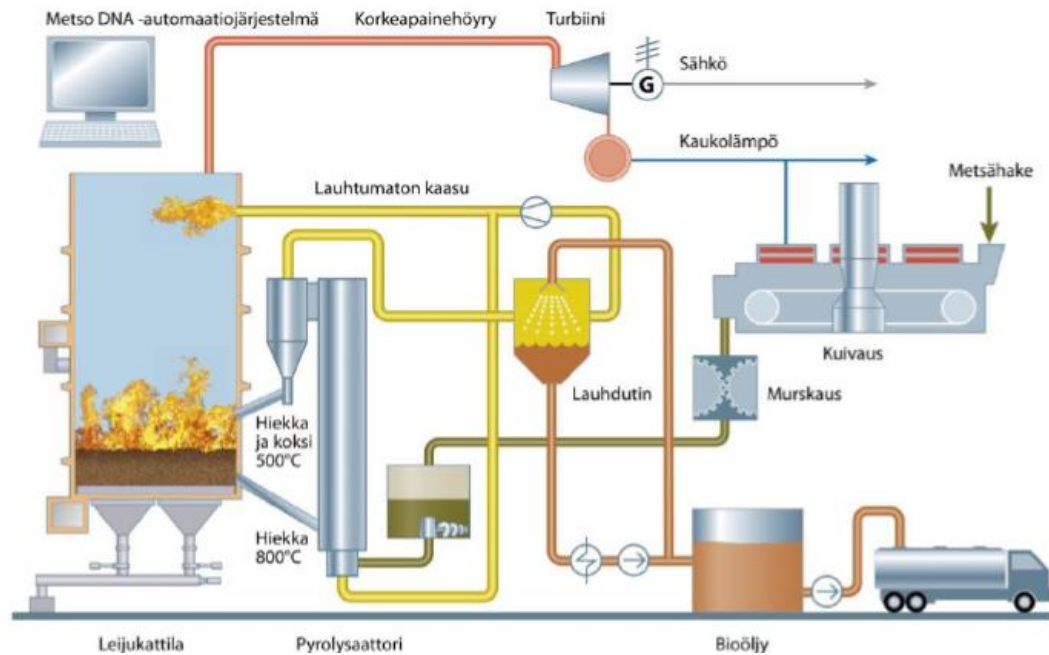
Useimmat pyrolyysijärjestelmät käyttävät sykloneja hiilipartikkelien ja tuhkan erottamiseen kuumasta kaasuvirrasta. Samalla saadaan poistettua muitakin mahdollisia epäpuhtauksia kuten hiekkaa. Kuitenkin jonkin verran hienoa kiintoainetta pääsee aina sykloneiden yli ja päätyy pyrolyysiöljyyn. Täydellisen kiintoaineen poiston saavuttaminen nopeassa pyrolyysissä onkin osoittautunut hyvin vaikeaksi. Vaihtoehtona kiintoaineen poistamiseksi sykloneiden lisäksi voi olla kuumien kaasujen suodatus sekä pyrolyysiöljyn suodatus ja sentrifugointi. Kuumien höyryjen suodatuksella on mahdollista saada poistettua lähes kaikki kiintoaine. Kuumien höyryjen suodatus on kuitenkin osoittanut huomattavia ongelmia esimerkiksi suodattimeen tarttuneen kiintoaineen puhdistamisessa jo suhteellisen lyhyen toiminta-ajan jälkeenkin. Tutkimuksissa on myös ilmennyt näyttöä hajoamis- ja polymeroitumisreaktioiden tapahtumisesta kun pyrolyysihöyryt läpäisevät hiilijäännöstä sisältävän suodattimen. Nämä reaktiot aiheuttivat pyrolyysiöljyn saannon vähentymisen 10–15 %:lla. Myös pyrolyysiöljyn suodatuksessa on esiintynyt ongelmia esimerkiksi suodattimien tukkeutumisen muodossa. Kiintoaineen poisto ei ole välttämättä tarpeen kaikkien pyrolyysiöljyn käyttökohteiden kannalta, kuten esimerkiksi valmistettaessa pyrolyysiöljyä kemikaalien tuottamiseksi. (Oasmaa & Peacocke 2010, 12–13; Ringer et al. 2006, 15.)

Pyrolyysiöljyn talteenotto kuumasta kaasuvirrasta on ollut haasteellista johtuen pyrolyysihöyryjen luonteesta. Jäähtyessään pyrolyysihöyryillä on taipumusta muodostaa



aerosoleja jotka ovat kokonsa puolesta hyvin vaikeita erottaa kaasuvirrasta. Talteenottoon on käytetty erilaisia tekniikoita joista märkäerottimet ovat mahdollisesti tehokkaimpia. Märkäerottimissa aerosolien talteenotto tehdään sumuttamalla nestettä kaasuvirtaan jolloin hyvin pienet pisarat törmäävät aerosoleihin erottaen ne kaasuvirrasta. Yksinkertaisia pesurikolonnejä sekä venturipesureita on käytetty onnistuneesti aerosolien talteenottamiseen kaasuvirrasta. Venturipesuria käytettäessä prosessissa ongelmaksi voi kuitenkin muodostua pesurissa syntyvä suuri painehäviö. Myös sähkösuodattimia on käytetty onnistuneesti, ja ne ovat osoittautuneet erittäin tehokkaiksi. Sähkösuodattimet kuitenkin voivat olla hankalia käytettävyydeltään sekä ne ovat kalliimpia kuin yksinkertaiset pesurit. Sarjassa olevilla putkilämmönsiirtimillä on toteutettu kondensointi vaiheittaisesti, mutta ne eivät ole niin tehokkaita kuin pesurit. Vaiheittainen kondensointi voi olla eduksi kuitenkin tapauksissa joissa tarkoituksena on pyrkiä erottamaan pyrolyysiöljystä tiettyjä yhdisteitä. (Ringer et al. 2006, 15.)

Lehto et al. (2013, 30) kertovat raportissaan vuoden 2013 tilanteesta että pyrolyysiöljy on tulossa saataville energiamarkkinoilla ja lisäksi eri konsortioilla Euroopassa sekä Pohjois-Amerikassa on suunnitelmia pyrolyysiöljyn kaupallisesta tuotannosta. Suomessa pyrolyysiöljyn kaupallisen mittakaavan tuotanto on aloitettu vuoden 2013 syksyllä Fortumin Joensuun sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokseen integroidulla bioöljylaitoksella. Kyseessä on maailman ensimmäinen CHP-voimalaitoksen yhteyteen integroitu pyrolyysiöljyn tuotantolaitos. Kuvassa 2.5 on esitetty Fortumin bioöljylaitoksen toiminta yhdessä leijupetikattilan kanssa. Teknologia on kehitetty yhteistyössä Metson, UPM:n sekä VTT:n kanssa. (Fortum 2016.)



**Kuva 2.5.** Fortumin pyrolyysiöljyn valmistusprosessi (Hämäläinen 2016, 7).

Fortumin bioöljylaitoksella vuosittainen tuotantokapasiteetti on 50 000 tonnia pyrolyysiöljyä jonka toteuttamiseen tarvitaan noin 225 000 k-m<sup>3</sup> puuperäistä raaka-ainetta. Fortumin bioöljylaitoksella raaka-aine kuivataan alle 10 %:n kosteuspitoisuuteen ja jauhetaan alle 5 mm partikkelikokoon. Nopean pyrolyysin integroinnilla leijupetikattilan yhteyteen saadaan leijupetikattilan leijutushiekasta pyrolyysiin tarvittava prosessilämpö. Tällöin nopealle pyrolyysille ei ole tarvittu rakentaa omaa prosessilämmön tuotantoa. Leijutushiekka kierrätetään takaisin leijupetikattilaan kiinteän hiilijäännöksen kanssa. Myös kondensoitumattomat kaasut ohjataan leijupetikattilaan. Nämä tekevät nopean pyrolyysin sivutuotteiden hyötykäytöstä helpompaa ja tehokasta. Nopean pyrolyysin integroimisella leijupetikattilan yhteyteen saavutetaan lisäksi korkeampi prosessihyötysuhde, pienemmät investointi-, käyttö- ja kunnossapitokustannukset sekä korkeampi voimalaitoksen käyttöaste. (Suopajarvi 2013, 53.)

### 3 PYROLYYSIÖLJYN OMINAISUUDET

Pyrolyysiöljy on öljymäistä nestettä ja väriltään pääsääntöisesti tummanruskeaa riippuen kemiallisesta koostumuksesta sekä hiilipartikkelien määrästä. Ominaisajultaan pyrolyysiöljy on savuinen sekä pistävä. Tyypillisesti pyrolyysiöljyt omaavat suuren vesipitoisuuden ja voivat sisältää myös huomattavia määriä kiintoainetta. Pyrolyysiöljyt ovat tiheämpiä fossiilisiin polttonesteisiin verrattuna ja lämpöarvoltaan alle puolet polttoöljyjen lämpöarvosta. Pyrolyysiöljyt lisäksi polymeroituvat kun niitä lämmitetään riittävästi. Kemiallisesti pyrolyysiöljyt ovat hyvin polaarisia, eivätkä pyrolyysiöljyt liukene polttoöljyihin tai muihin bioöljyihin kuten biodieseliin. Taulukossa 3.1 on listattu tyypillisiä ominaisuuksia pyrolyysiöljylle sekä raskaalle ja kevyelle polttoöljylle. (Lehto et al. 2013, 8.)

**Taulukko 3.1.** Pyrolyysiöljyn tyypillisiä ominaisuuksia (Lehto et al. 2013, 8).

Analysis	Typical bio-oil	HFO 180 / 420	LFO Motor/heating summer quality
Water, wt%	20–30	~ 0	~ 0
Water and sediment, vol%		0.5 max	0.02 max
Solids, wt%	Below 0.5		
Ash, wt%	0.01–0.1 <sup>a</sup>	0.08 max	0.01 max
Nitrogen, wt%	Below 0.4	0.4	0.02
Sulphur, wt%	Below 0.05	1.0 max	0.001 max
Stability	Unstable <sup>b</sup>		
Viscosity (40 °C), cSt	15–35 <sup>c</sup>	180 / 420 max @50 °C	2.0–4.5
Density (15 °C), kg/dm <sup>3</sup>	1.10–1.30 <sup>c</sup>	0.99 / 0.995 max	0.845 max
Flash point, °C	40–110 <sup>d</sup>	65 min	60 min
Pour point, °C	-9–36	15 max	-5 min
LHV, MJ/kg	13–18 <sup>c</sup>	40.6 min	42.6
pH	2–3		
Distillability	Non-distillable	Distillable	Distillable

<sup>a</sup> Note that metals form oxides during ashing, and may yield ash values that are larger than the total solids in the liquid. <sup>b</sup> Polymerizes when heated and for prolonged periods of time. <sup>c</sup> Depends on water content. <sup>d</sup> Flash point method unsuitable for pyrolysis oils. Pyrolysis oils do not sustain combustion.

Pyrolyysiöljyt voivat erota toisistaan huomattavasti koostumukseltaan ja siten myös ominaisuuksiltaan. Pyrolyysiöljyjen varsinainen koostumus on raaka-aineen, pyrolyysitekniikan, kiintoaineen poiston, kondensointijärjestelmän ja varastointiolosuhteiden monimutkainen funktio. Pääasiassa pyrolyysiöljyt ovat selluloosan, hemiselluloosan sekä ligniinin hajoamisprosessista muodostuneiden yhdisteiden monimutkaisia seoksia, ja

pyrolyysiöljyjen alkuainekoostumus mukailee raaka-aineena käytetyn biomassan alkuainekoostumusta. Kemiallisesti pyrolyysiöljyt sisältävät kiintoaineen ja suuren vesipitoisuuden lisäksi satoja orgaanisia yhdisteitä. Pyrolyysiöljyistä on identifioitu yli 300 erilaista orgaanista yhdistettä. Pääyhdisteitä pyrolyysiöljyissä ovat vesi, orgaaniset hapot, aldehydit, ketonit, fenolijohdannaiset, sokerityyppiset yhdisteet sekä muut erilaiset hiilihyaattien pilkkoutumistuotteet. Pyrolyysiöljyt eivät sisällä juurikaan hiilivetyjä. Pyrolyysiöljyn sisältämien yhdisteiden molekyylipainot vaihtelevat laajalla skaalalla. Yhdisteistä huomattava osa, tyypillisesti noin 25 p-%, on raskaita molekyyliä jotka ovat lähinnä ligniiniperäisiä. Yksittäisistä yhdisteistä vedellä on kaikista suurin osuus. Pyrolyysiöljyjen sisältämät orgaaniset hapot aiheuttavat niiden happaman luonteen (pH 2–3). Tämän seurauksena pyrolyysiöljyillä on korrosoiva vaikutus joitain materiaaleja kohtaan. (Lu et al. 2009, 1376–1377; Alakangas et al. 2016, 183.)

Pyrolyysiöljyt ovat kemialliselta koostumukseltaan sekä fysikaalisilta ominaisuuksiltaan täysin erilaisia verrattuna fossiilisiin polttonesteisiin. Koska eroavaisuus on suuri, eivät fossiilisille polttonesteille määritetyt laatustandardit ja perinteiset käyttömenetelmät välttämättä sovi pyrolyysiöljyille. Hiilivedyllisille polttoaineille suunnitelluilla laitteistoilla pyrolyysiöljyä käytettäessä voikin esiintyä huomattavan suurta ongelmia. Siten on muodostunut tarve kehittää uusia teknologioita ja järjestelmiä jotta pyrolyysiöljyä saadaan hyödynnettyä polttoainekäytössä tehokkaasti ja luotettavasti. Tämä vaatii pyrolyysiöljyjen poikkeavien ominaisuuksien riittävää ymmärtämistä ja niiden huomioimista suunnittelussa loppukäytön lisäksi myös kuljetuksen ja varastoinninkin osalta. (Lehto et al. 2013, 8; Lu et al. 2009, 1376.) Seuraavissa kappaleissa syvennytään yksityiskohtaisemmin pyrolyysiöljyjen erinäisiin ominaisuuksiin sekä erityispiirteisiin etenkin polttoainekäytön näkökulmasta.

### **3.1 Vesipitoisuus**

Pyrolyysiöljyt sisältävät vettä noin 15–30 p-% riippuen raaka-aineesta sekä tuotantoprosessin ominaisuuksista. Vesi on pyrolyysiöljyissä joko liuenneena tai mikroemulsiona. Jos pyrolyysiöljyn valmistuksessa raaka-ainetta ei kuivata alle noin 10 p-%:n kosteuspitoisuuteen, voi pyrolyysiöljyn vesipitoisuudeksi muodostua jopa 30–45 p-%. Pyrolyysiöljyn sisältämä vesi muodostaa pyrolyysiöljystä vakaan yksifaasisen seoksen. Tosin pyrolyysiöljyillä on rajallinen

vesiliukoisuus, ja yleensä yli 30 p-%:n vesipitoisuudessa pyrolyysiöljyn homogeenisuus alkaa kärsimään jolloin voi tapahtua spontaania faasierottumista. Faasierottumisen tapahtuessa pyrolyysiöljy pyrkii erottumaan kevyeseen vesimäiseen faasiin ja raskaampaan orgaaniseen faasiin. Pyrolyysiöljyn vesipitoisuutta tulee pyrkiä hallitsemaan sillä se vaikuttaa myös muihin ominaisuuksiin kuten tiheyteen, viskositeettiin, lämpöarvoon ja stabiiliuteen. (Meier et al. 2013, 622; Venderbosch & Prins 2011, 130.)

Polttoainekäytössä vesipitoisuus on pyrolyysiöljyn yksiä oleellisimpia ominaisuuksia. Pyrolyysiöljyyn päätyntä raaka-aineen sisältämä kosteus ja pyrolyysireaktioiden seurauksena syntynyt vesi on haittana monien pyrolyysiöljyn potentiaalisten käyttökohteiden kannalta. Vesipitoisuus alentaa pyrolyysiöljyn energiatiheyttä, palamisliekin adiabaattista lämpötilaa, tulipesän lämpötilaprofiilia sekä palamisreaktioiden nopeutta. Lisäksi korkea vesipitoisuus aiheuttaa vaikeuksia syttymisessä ja kasvattaa syttymisviivettä pisaroiden alentuneen höyrystymisnopeuden seurauksen. Polttosovelluksissa korkea vesipitoisuus pyrolyysiöljyssä voi johtaa korkeampaan palamattomien partikkelien päästöihin. Korkea vesipitoisuus tuo polttoainekäytön kannalta kuitenkin myös joitain etujakin. Pyrolyysiöljyn sisältämä vesi laskee viskositeettia joka parantaa pyrolyysiöljyn pisaroitumisen ominaisuuksia. Lisäksi polttosovelluksissa vesipitoisuuden alentama palamisliekin lämpötila ja tulipesän lämpötilaprofiili vähentävät termisten NO<sub>x</sub>-päästöjen muodostumista. (Lehto et al. 2013, 21–22.)

Pyrolyysiöljyjen sisältämän veden erottaminen on vaikeaa, eikä vettä ei pystytä erottamaan perinteisillä keinoilla. Esimerkiksi tislaminen ei ole sopiva metodi veden erottamiseksi, sillä pyrolyysiöljyllä on taipumus polymeroitua kun sitä lämmitetään riittävästi. Tämä tarkoittaa sitä, että pyrolyysiöljyä ei voida kokonaan höyrystää enää sen jälkeen kun pyrolyysiöljy on kerätty valmistusprosessissa. Kyvyttömyys höyrystyä kokonaan on vahvasti sidoksissa pyrolyysiöljyjen monimutkaisen kemiallisen koostumuksen kanssa. Kun pyrolyysiöljyä yritetään tislata, höyrystyvät lämmityksen myötä ensin haihtuvat orgaaniset yhdisteet. Näiden jälkeen höyrystyy vesi, ja jäljelle jäävät yhdisteet alkavat polymeroitua. Tällöin pyrolyysiöljystä noin 50 p-% jää jäljelle kiinteänä aineksena. Tämän vuoksi on hyvin tärkeää hallita raaka-aineen kosteuspitoisuutta ennen nopeaa pyrolyysiä. (Ringer et al. 2006, 20–21; Meier et al. 2013, 622.)

### 3.2 Kiintoaineet ja tuhka

Pyrolyysiöljyt sisältävät vaihtelevia määriä kiintoainetta. Kiintoaine on valmistusprosessista pyrolyysiöljyyn päätyneitä hiilipartikkeleita sekä mahdollisesti muita epäpuhtauksia kuten hiekkaa leijupetireaktoria käytettäessä. Tyypillisesti kiintoaineen osuus pyrolyysiöljyissä on alle 0,5 p-% ja partikkelikoko keskimääräisesti 5–10 µm kun pyrolyysiöljyn valmistuksessa käytetään sykloneja kiintoaineen erottamiseksi. Kiintoaineen määrään pyrolyysiöljyssä vaikuttaa raaka-aineen tyyppi ja partikkelikoon jakauma, valmistusprosessin ominaisuudet sekä käytetyt kiintoaineen poistotekniikat. Kiintoainepartikkelit aiheuttavat negatiivisia vaikutuksia pyrolyysiöljyjen varastoinnissa ja polttoainekäytössä. Pyrolyysiöljyn varastoinnin aikana kiintoainepartikkelit pyrkivät hitaasti agglomeroitumaan muodostaen sakkaa öljysäiliön pohjalle. Kiintoainepartikkelit voivat myös edistää pyrolyysiöljyn ikääntymistä, jota käsitellään kappaleessa 3.4. Polttosovelluksissa pyrolyysiöljyn kiintoaineet voivat aiheuttaa eroosiota polttoaineen syöttöjärjestelmissä sekä tukkia polttimien suuttimia. Kiintoaine voi myös vaikuttaa pyrolyysiöljyn pisaroitumisen laatuun ja palamiskäyttäytymiseen sekä aiheuttaa hiukkaspäästöjen kasvua. Kiintoainetta on vaikeaa poistaa kokonaan pyrolyysihöyryistä valmistusprosessin aikana. Myös pyrolyysiöljyn suodatus on ongelmallista kaiken kiintoaineen poistamiseksi. Pienimmät kiintoainepartikkelit pääsevät suodattimien läpi ja pieniä suodatintiheyksiä käyttävät suodattimet voivat tukkeutua nopeasti. (Oasmaa & Peacocke 2010, 26; Lehto et al. 2013, 22.)

Koska pyrolyysin aikana suurin osa tuhkasta pidättäytyy kiinteässä hiilijäännöksessä, on hiilipartikkelien tuhkapitoisuus 3–8 kertaa suurempi kuin raaka-aineella. Käytettäessä raaka-aineita joilla on korkea tuhkapitoisuus, voi pyrolyysissä syntyneiden hiilipartikkelien tuhkapitoisuus nousta jopa 50 p-%:iin. Tällöin hiilipartikkelien päätyminen pyrolyysiöljyyn valmistuksen yhteydessä tulee aiheuttamaan myös tuhkan päätyminen pyrolyysiöljyyn. Ajan kuluessa tuhkaa voi vapautua hiilipartikkeleista ja liueta pyrolyysiöljyyn. Hiilipartikkeleita sisältävän pyrolyysiöljyn poltosta vapautuu tuhkaa ja metalleja. Pyrolyysiöljyn polton aikana tuhkan sisältämien metallien uskotaan aiheuttavan lämpöpinnoille kerrostumia sekä merkittävää korroosiota korkeissa lämpötiloissa. Esimerkiksi alkalimetalleista kalium sekä natrium voivat muodostaa alhaisissa lämpötiloissa sulavia yhdisteitä jotka kiinnittyvät kuumiin komponentteihin ja korrosoivat niitä. (Bridgwater 2013, 152; Lu et al. 2009, 1378.)

### 3.3 Happipitoisuus

Pyrolyysiöljyillä on korkea happipitoisuus joka vaihtelee 35–60 p-%:n välillä johtuen happirikkaista yhdisteistä sekä suuresta vesipitoisuudesta. Vastaavasti fossiilisten polttoöljyjen happipitoisuudet ovat niin vähäisiä että ne ilmoitetaan ppm-yksikössä. Pyrolyysiöljyt sisältävät lähes kaiken raaka-aineen alkuperäisestä hapesta, ja happea on lähes kaikissa pyrolyysiöljyn orgaanisissa yhdisteissä. Pyrolyysiöljyn alkuainekoostumus muistuttaakin fossiilisten polttoöljyjen sijasta paljon enemmän raaka-ainetta josta se on valmistettu. (Lu et al. 2009, 1377.)

Pyrolyysiöljyjen happipitoisten yhdisteiden suuri määrä on pääasiallinen syy pyrolyysiöljyjen ja fossiilisten polttonesteiden ominaisuuksien sekä käyttäytymisen huomattaville eroille. Pyrolyysiöljyjen happipitoiset yhdisteet aiheuttavat myös pyrolyysiöljyjen korkean polaarisuuden, joka yhdessä pyrolyysiöljyjen hydrofiilisen luonteen kanssa tekevät pyrolyysiöljyistä liukenemattomia nestemäisiin hiilivetyihin kuten fossiilisiin polttonesteisiin. Tämä on heikkous pyrolyysiöljyjen hyödyntämisen kannalta. Pyrolyysiöljyt kuitenkin liukenevat polaarisiin liuottimiin, kuten etanoliin, metanoliin ja asetoniin. Lisäksi korkea happipitoisuus vaikuttaa alentavasti lämpöarvoon sekä aiheuttaa korroosioikykyä ja ongelmia stabiiliudessa. Toisaalta korkea happipitoisuus auttaa pyrolyysiöljyn poltossa, sillä korkean happipitoisuuden vuoksi poltossa tarvitaan vähemmän palamisilmaa. Tämä myös vähentää syntyvien savukaasujen määrää. (Lu et al. 2009, 1377.)

### 3.4 Stabiilius

Pyrolyysiöljyt ovat kemiallisesti ja termisesti fossiilisia polttonesteitä epävakaampia johtuen pyrolyysiöljyjen sisältämästä suuresta pitoisuudesta reaktiivisia happipitoisia yhdisteitä ja matalan kiehumispisteen haihtuvia yhdisteitä. Pyrolyysiöljyjen epävakaas voidaan havaita viskositeetin hitaana kasvuna ja mahdollisena faasierottumisena ajan myötä (ikäntyminen), nopeana viskositeetin kasvuna lämmitettäessä riittävästi, haihtuvien yhdisteiden höyrystymisenä sekä mahdollisina reaktioina ympäröivän ilman sisältämän hapen kanssa. Pyrolyysiöljyjen epävakauden vuoksi onkin pidettävä erityistä huolta niitä käsiteltäessä, kuljetettaessa, varastoitaessa sekä käytettäessä. Stabiiliutta voidaan pyrkiä parantamaan

polaaristen liuottimien lisäämisellä. Polaaristen liuottimien lisääminen alentaa viskositeettia, parantaa homogeenisuutta sekä stabilisoi pyrolyysiöljyjä jossain määrin. Myös veden lisäämisellä on samankaltainen vaikutus. (Oasmaa & Peacocke 2010, 49–51.)

On tärkeää kiinnittää huomioita pyrolyysiöljyjen ikääntymiseen, sillä ikääntymisreaktioiden seurauksena pyrolyysiöljyissä tapahtuu muutoksia kemiallisessa koostumuksessa ja fysikaalisissa ominaisuuksissa. Viskositeetin kasvun sekä mahdollisen faasierottumisen lisäksi pyrolyysiöljyjen ikääntymisen seurauksena on todettu tapahtuvan myös vesipitoisuuden kasvua ja hiilidioksidin muodostumista. (Venderbosch & Prins 2011, 128.) Koska pyrolyysiöljyjä tuotetaan nopeassa pyrolyysissä monimutkaisen hajoamisprosessin nopealla pysäyttämällä, eivät pyrolyysiöljyt ole termodynaamisessa tasapainossa. Tämän vuoksi pyrolyysiöljyt ovat luontaisesti epävakaita ja omaavat taipumuksen jatkaa reagoimista hitaiden sekundaaristen reaktioiden muodossa. Tällöin pyrolyysiöljyjen kemiallinen koostumus pyrkii muuttumaan kohti termodynaamista tasapainoa. (Diebold 2000, 3.)

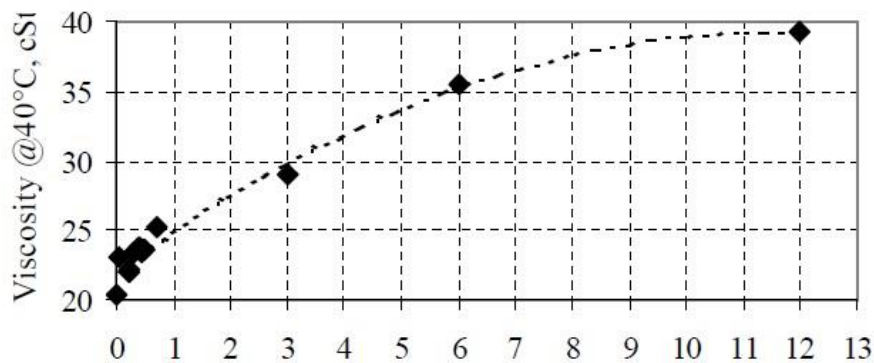
Pyrolyysiöljyssä tapahtuu ikääntymisen myötä polymeroitumisreaktioita sekä kemiallisia reaktioita jotka muuttavat pyrolyysiöljyn koostumusta. Esimerkiksi ikääntymisen aikana tapahtuvat esteröitymisreaktiot muuttavat korkeasti polaarisia happo- ja alkoholimolekyylejä suhteellisen alhaisen polaarisuuden omaaviksi estereiksi sekä erittäin korkeasti polaariseksi vedeksi. Tällöin pyrolyysiöljyn orgaanisen osan polaarisuus laskee samalla kun vesipitoisuus kasvaa. Lisäksi polymeroitumisreaktiot muodostavat raskaita molekyylejä. Siten pyrolyysiöljyn kevyiden sekä vesiliukoisten yhdisteiden määrä vähentyy ja raskaampien yhdisteiden määrä lisääntyy. Nämä muutokset vaikuttavat pyrolyysiöljyn sisältämien yhdisteiden keskinäiseen liukoisuuteen koska pääsääntöisesti kevyet yhdisteet ovat liukoisempia kuin raskaat, ja lisäksi yhdisteet joilla on samanlaiset polaarisuudet tai molekyyliarakenteet omaavat taipumuksen olla keskenään liukoisia. Pyrolyysiöljyn sisältämien yhdisteiden keskinäisen liukoisuuden muutos vaikuttaa pyrolyysiöljyn homogeenisuuteen. (Diebold 2000, 35–38; Lu et al. 2009, 1377.)

Lämpötilalla on suuri vaikutus pyrolyysiöljyn stabiiliuden ja ikääntymisen kannalta. Korkeammissa lämpötiloissa ikääntymisreaktiot nopeutuvat, sillä lämpötila vaikuttaa kemiallisten reaktioiden nopeuteen eksponentiaalisesti. Siten on suositeltavaa välttää pyrolyysiöljyn pitkäaikaista varastointia yli 50 °C:n lämpötiloissa. (Venderbosch & Prins 2011, 132.) Lämpötilalla on myös suora vaikutus pyrolyysiöljyn viskositeettiin, joka laskee nopeasti



lämpötilan kasvaessa. Lämmittämällä pyrolyysiöljyä noin 55 °C:seen, ovat muutokset vielä palautuvia. Tällöin pyrolyysiöljyn esilämmitys noin 50 °C:seen tai alhaisempaan lämpötilaan ei vielä tuo ole haitallisia vaikutuksia pyrolyysiöljyn laatuun tai käyttäytymiseen. Yli 55 °C:n tietämällä muutokset alkavat olemaan kasvavasti palautumattomia, ja pitkittynyt altistuminen korkeammille lämpötiloille lopulta johtaa viskositeetin kasvuun ja luo taipumusta faasierottumiselle. (Bridgwater 2011, 171.) Yli 80 °C:n lämpötiloissa pyrolyysiöljyn ominaisuudet muuttuvat täysin kiihtyneiden ikääntymisreaktioiden johdosta, ja tämä voi johtaa kasvaviin vaikeuksiin polttoainelinjoissa ja polttimien suuttimissa (Lehto et al. 2013, 50–51).

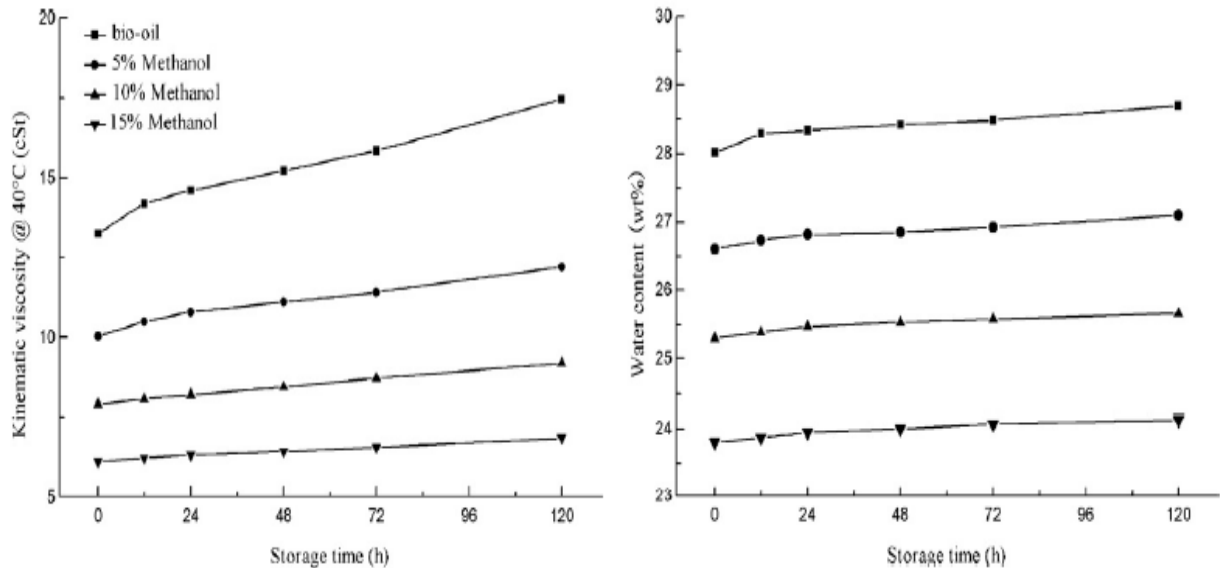
Huoneenlämmössä ikääntyminen tapahtuu kuukausien tai vuosien aikana, ja ikääntyminen riippuu pyrolyysiöljyn koostumuksesta (Oasmaa & Czernik 1999, 916). Pyrolyysiöljyä on onnistuneesti säilytetty useita vuosia teräs- ja muovisäiliöissä normaaleissa varastointiolosuhteissa ilman sellaista ominaisuuksien heikentymistä joka olisi estänyt loppukäytön erilaisissa sovelluksissa (Bridgwater 2012, 79). Ikääntyminen on nopeinta pyrolyysiöljyn valmistuksen jälkeen ensimmäisten viikkojen aikana ja hidastuu ajan myötä. Kuvassa 3.1 on esitetty hakkuutähteistä valmistetun pyrolyysiöljyn viskositeetin kasvu ensimmäisen vuoden aikana. Viskositeetin muutos vaihtelee eri pyrolyysiöljyjen välillä.



**Kuva 3.1.** Hakkuutähteistä valmistetun pyrolyysiöljyn viskositeetin kasvu ensimmäisen vuoden aikana (Oasmaa & Peacocke 2010, 50).

Lu et al. (2008, 196) tutkivat artikkelissaan riisin kuoresta valmistetun pyrolyysiöljyn ikääntymisen ominaisuuksia muiden pyrolyysiöljyn ominaisuuksien ohella. Artikkelissa tutkittiin myös metanolin lisäämisen vaikutuksia tiettyihin pyrolyysiöljyn ominaisuuksiin. Kuvassa 3.2 on esitetty artikkelissa tutkittujen pyrolyysiöljyn sekä pyrolyysiöljyn ja metanolin seoksien kinemaattisen viskositeetin sekä vesipitoisuuden muutoksia ajan myötä.

Tutkimuksessa näytteen säilytyslämpötila oli 50 °C, säilytysaika 120 tuntia ja viskositeetit määriteltiin 40 °C:ssa.



**Kuva 3.2.** Pyrolyysiöljyn sekä pyrolyysiöljyn ja metanolin seosten viskositeetin ja vesipitoisuuden muuttuminen ajan myötä (Lu et al. 2008, 196).

Tutkituilla näytteillä viskositeetin muutokset olivat suurempia kuin vesipitoisuuden muutokset. 120 tunnin pituisessa säilönnässä 50 °C:ssa pyrolyysiöljyn viskositeetti kasvoi 31,7 % ja vesipitoisuus kasvoi 2,5 p-%. Tutkimuksessa tutkittiin ikääntymistä myös säilömällä näytteitä 80 °C:ssa, ja 24 tunnin jälkeen viskositeetti oli kasvanut 36,3 % ja vesipitoisuus oli kasvanut 4,2 p-%. 48 tunnin jälkeen 80 °C:ssa pyrolyysiöljyssä havaittiin vähäistä faasierottumista. Tällöin viskositeetti oli kasvanut 87,3 % ja vesipitoisuus oli kasvanut 11,1 p-%. 72 tunnin jälkeen 80 °C:ssa pyrolyysiöljyssä esiintyi peruuttamaton faasierottuminen, eikä viskositeettia ja vesipitoisuutta pystytty enää määrittämään. Tutkimustulokset osoittivat metanolin lisäämisen hidastuttavan viskositeetin ja vesipitoisuuden kasvua merkittävästi. Esimerkiksi säilyttämällä näytteitä 120 tuntia 50 °C:ssa 10 %:n metanolin osuudella näytteen viskositeetti kasvoi 16,3 % ja vesipitoisuus kasvoi 1,42 p-%. Metanolin lisääminen myös viivästytti faasierottumisen tapahtumista, ja 10 % metanolia sisältänyt pyrolyysiöljy selvisi 120 tunnin säilönnästä 80 °C:ssa ilman faasierottumista. Lopuksi Lu et al. totesivat 10 %:n metanolin lisäämisen voivan olla tarpeellista pyrolyysiöljyn stabiloimiseksi.

Pyrolyysiöljyn stabiiliuteen vaikuttaa myös muitakin asioita lämpötilan ja lisäaineiden lisäämisen ohella. Kiintoaineella on vaikutus pyrolyysiöljyn stabiiliuteen, sillä kiintoaineesta

tyypillisesti löytyvät alkuaineet voivat toimia katalyytteinä ikääntymisreaktiolle. Pyrolyysiöljyt joilla on alhaisemmat kiintoainepitoisuudet omaavat taipumuksen alhaisempaan ikääntymiseen. Pyrolyysiöljyä varastoitaessa ei tulisi käyttää avoimia säiliöitä jolloin pyrolyysiöljy jää alttiiksi ympäröivälle ilmalle. Kevyiden yhdisteiden haihtuminen pyrolyysiöljystä aiheuttaa ympäristölle vahvaa hajuhaittaa sekä kasvattaa viskositeettia. Lisäksi ympäröivän ilman sisältämä happi hapettaa pyrolyysiöljyä ja muodostaa happoja sekä reaktiivisia peroksiedeja jotka katalysoivat polymeroitumisreaktioita. Suljettu astia jonka tilavuudesta 90 % on pyrolyysiöljyä ei ole osoittanut sisältävän tyhjässä tilassaan tarpeeksi suurta happipitoisuutta jotta happi vaikuttaisi ikääntymisen nopeuteen. Tarvittaessa antioksidantin lisääminen pienissä määrissä voi olla hyvä varotoimi estämään hapen vaikutuksia. (Diebold 2000, 41–42; Lu et al. 2009, 1379.)

### 3.5 Homogeenisuus

Useimmat pyrolyysiöljyt ovat olemukseltaan homogeenisiä seoksia. Pyrolyysiöljyä voidaan pitää mikroemulsiona, jossa vesi ja vesiliukoiset molekyylit muodostavat kantavan faasin johon veteen liukenemattomat osat ovat dispergoituneet miselleinä. Lisäksi pyrolyysiöljyissä on emulsioaineina toimivia yhdisteitä jotka stabiloivat rakennetta. (Lu et al. 2009, 1377.) On kuitenkin muutamia syitä jotka voivat aiheuttaa pyrolyysiöljyn jakautumisen kahteen tai useampaan faasiin, ja tällöin seurauksena voi aiheutua vakavia ongelmia pyrolyysiöljyn polttoainekäytön kannalta. Faasierottunut pyrolyysiöljy voidaan saada homogenisoitua suhteellisen helposti polaaristen liuottimien lisäämisellä. Kevyt lämmitys ja sekoitus voi myös palauttaa homogeenisuuden jossain määrin. (Bridgwater 2013, 152.)

Pyrolyysiöljyssä ikääntymisen myötä tapahtuva yhdisteiden keskinäisen liukoisuuden muutos kasvattaa todennäköisyyttä pyrolyysiöljyn mikroemulsiorakenteen rikkoutumiselle ja faasierottumiselle. Tällöin pyrolyysiöljy erottuu kevyeseen vesimäiseen faasiin sekä raskaampaan orgaaniseen faasiin. Vesimäinen faasi on polaarisuudeltaan hyvin korkea, ja raskaampi faasi on polaarisuudeltaan alhainen. (Diebold 2000, 38.) Veden lisääminen pyrolyysiöljyyn riittävän suurena määränä aiheuttaa myös saman lopputuloksen. Tällöin veden lisääminen lopulta laimentaa pyrolyysiöljyn mikroemulsiorakennetta ylläpitävien yhdisteiden pitoisuuden niin alhaiseksi ettei niiden vaikutus ole enää riittävä rakenteen ylläpitämiseksi.

Pyrolyysiöljyn mikroemulsiorakenne voi myös rikkoutua muidenkin tekijöiden kautta, kuten esimerkiksi jäähtymisen, lämmityksen ja rakennetta rikkovien lisäaineiden lisäämisen vaikutuksesta. (Bridgwater 2011, 171.)

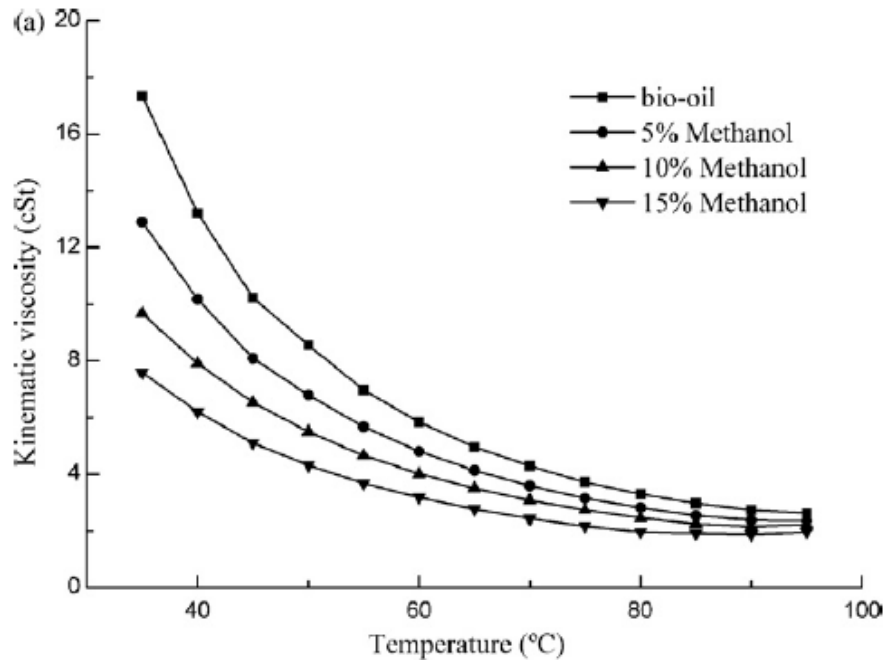
Koska pyrolyysiöljyn koostumus vaikuttaa sen homogeenisuuteen, voi ongelmia aiheutua homogeenisuudessa jo raaka-aineen ja valmistusprosessin ominaisuuksien kautta. Näitä ominaisuuksia ovat etenkin raaka-aineen korkea kosteus- ja tuhkapitoisuus, epäpuhtaudet, pyrolyysihöyryjen pitkä viipymäaika sekä heikko kiintoaineen poisto. (Bridgwater 2013, 133.) Kosteus- ja tuhkapitoisuuden lisäksi raaka-aineen koostumus voi myös muiltakin osin johtaa pyrolyysiöljyn homogeenisuuden heikentymiseen ja useamman faasin esiintymiseen. Esimerkiksi uuteainerikkaista raaka-aineista tuotetuilla pyrolyysiöljyillä on taipumus erottua runsaasti uuteaineita sisältävään yläfaasiin sekä enemmän normaalia pyrolyysiöljyä muistuttavaan alafaasiin. Uuteaineet pyrkivät erottumaan pyrolyysiöljyssä johtuen niiden eroista happipitoisuudessa, liukoisuudessa, polaarisuudessa ja tiheydessä verrattuna pyrolyysiöljyn polaarisiin yhdisteisiin. Tällöin yläfaasin osuus pyrolyysiöljyssä voi olla jopa 20 p-%, ja sen pääkomponentit ovat uuteaineet, pyrolyyttinen ligniini sekä vesiliukoiset yhdisteet. Monet biomassat sisältävät uuteaineita, mutta pienissä määrissä ne kuitenkin pystyvät sekoittumaan pyrolyysiöljyyn. (Lu et al. 2009, 1377; Mohan et al. 2006, 872.)

### **3.6 Tiheys, viskositeetti, pintajännitys ja jähmepiste**

Pyrolyysiöljyn polttoainekäytössä tiheys, viskositeetti ja pintajännitys ovat tärkeässä asemassa, sillä ne vaikuttavat esimerkiksi pumppujen sekä putkilinjastojen suunnitteluun. Kyseisillä ominaisuuksilla on lisäksi pyrolyysiöljyn sumutuksessa merkittävä vaikutus etenkin pisaroiden kokojakaamaan. Nestemäistä polttoainetta sumutettaessa pieniksi pisaroiksi nesteen pinta-alan suhde massaan kasvaa huomattavasti, jolloin lämmön- sekä massansiirto pisaroiden ja ympäröivän kuuman kaasun välillä tehostuu oleellisesti. Siten kyseisillä ominaisuuksilla on myös oleellinen vaikutus pisaroiden höyrystymiseen, syttymiseen ja palamiseen. Nämä puolestaan vaikuttavat palamisen laatuun sekä syntyviin päästöihin. Pisaroiden tulisi olla pieniä jotta pystytään takaamaan pyrolyysiöljyn täydellinen palaminen sekä hyvä liekin muoto ja pituus. Pisarakoko kasvaa kun tiheys, viskositeetti ja pintajännitys kasvavat. (Lehto et al. 2014, 180; Oksanen 2002, 164–167.)

Pyrolyysiöljyjen tiheys (noin  $1,2 \text{ kg/dm}^3$ ) on suhteellisen korkea verrattuna kevyen polttoöljyn tiheyteen (noin  $0,85 \text{ kg/dm}^3$ ). Etenkin kiinteään biomassaan verrattuna pyrolyysiöljyn tiheys on huomattavasti suurempi, sillä kiinteän biomassan tiheys voi olla jopa vain  $0,10\text{--}0,15 \text{ kg/dm}^3$ . Pyrolyysiöljyillä energiasisältö painon perusteella tarkasteltuna on lähes sama kuin kiinteällä biomassalla. Polttoöljyjen energiasisällöstä painon perusteella pyrolyysiöljyt sisältävät vain noin 42 %. Tilavuuden perusteella pyrolyysiöljyt sisältävät noin 61 % polttoöljyjen energiasisällöstä. (Bridgwater 2012, 79; Bridgwater 2013, 145.)

Myös pyrolyysiöljyjen viskositeetti on suhteellisen korkea, ja viskositeetti muuttuu ajan kuluessa ikääntymisreaktioiden seurauksena. Kinemaattinen viskositeetti pyrolyysiöljyillä on  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ :ssa pääsääntöisesti  $15\text{--}35 \text{ cSt}$  (taulukko 3.1). Korkea viskositeetti johtuu pyrolyysiöljyn koostumuksesta, josta viskositeettiin vaikuttaa etenkin vesipitoisuus ja kevyiden yhdisteiden määrä. Pyrolyysiöljyn koostumuksen kautta viskositeettiin lopulta vaikuttaa esimerkiksi raaka-aineen ja valmistusprosessin ominaisuudet sekä ikääntymisen aste. Pyrolyysiöljyn polttoainekäytössä viskositeettia alennetaan varovaisella esilämmityksellä käytettävälle poltinjärjestelmälle sopivaksi pumpattavuuden ja pisaroitumisen helpottamiseksi. Viskositeettia voidaan alentaa myös lisäämällä pyrolyysiöljyyn vettä tai polaarisia liuottimia. (Mohan et al. 2006, 856–857.) Suositeltava viskositeetti pyrolyysiöljyä sumutettaessa on  $4\text{--}25 \text{ cSt}$ . Pienempien polttojärjestelmien (alle 5 MW polttoaineteholta) tulisi pyrkiä alhaiseen viskositeettiin, kun taas suuren kokoluokan järjestelmät pystyvät toimimaan jopa  $25 \text{ cSt}$ :n viskositeetilla. (Lehto et al. 2013, 50.) Kuvassa 3.3 on esitetty riisin kuoresta valmistetun pyrolyysiöljyn sekä pyrolyysiöljyn ja metanolin seosten kinemaattisten viskositeettien muutoksia  $35\text{--}95 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötila-alueella. Metanolin lisääminen pyrolyysiöljyyn on tehokas keino viskositeetin alentamiseksi, mutta lämpötilan kasvaessa erot tasaantuvat pyrolyysiöljyn ja metanolia sisältävien seosten välillä.



**Kuva 3.3.** Pyrolyysiöljyn sekä pyrolyysiöljyn ja metanolin seosten viskositeetin muuttuminen lämpötilan funktiona (Lu et al. 2008, 194).

Nesteen pintajännitys vastustaa ulkoisia voimia, ja se on oleellinen ominaisuus nestemäisten polttoaineiden sumutuksen kannalta. Huoneenlämmössä pyrolyysiöljyjen pintajännitys on noin 28–40 mN/m, joka on korkeampi kuin fossiilisilla polttoöljyillä. Pyrolyysiöljyjen korkeampi pintajännitys aiheutuu osittain niiden vesipitoisuudesta, sillä veden pintajännitys 25 °C:n lämpötilassa on 72 mN/m. Veden korkea pintajännitys johtuu veden vahvoista vetysidoksista. Useimmilla pyrolyysiöljyillä pintajännitys laskee hieman lämpötilan kasvaessa. (Lu et al. 2009, 1379.)

Jähmepisteellä kuvataan nesteen juoksevuutta alhaisissa lämpötiloissa, ja sitä voidaan käyttää osoittamaan alhaisinta lämpötilaa jossa nestemäistä polttoainetta voidaan pumpata. Suositeltu yläraja pumpattavuudelle on noin 600 cSt. (Oasmaa & Peacocke 2010, 35.) Puusta valmistettujen pyrolyysiöljyjen jähmepisteet ovat pääasiassa -12 ja -33 °C:n välillä. Muista raaka-aineista valmistetut pyrolyysiöljyt voivat olla jähmepisteeltään kyseisen rajan ulkopuolella. Esimerkiksi oljesta valmistetulle pyrolyysiöljylle on mitattu jähmepisteeksi -36 °C. (Lu et al. 2009, 1378–1379.)

### 3.7 Lämpöarvo ja syttymisominaisuudet

Alempi lämpöarvo pyrolyysiöljyillä on tyypillisesti 14–18 MJ/kg, joka on samaa tasoa kuin kiinteillä biomassoilla mutta huomattavasti alhaisempi kuin fossiilisilla polttoöljyillä (41–43 MJ/kg). Pyrolyysiöljyjen alhainen lämpöarvo on seurausta korkeasta vesi- ja happipitoisuudesta. (Oasmaa & Czernik 1999, 915.) Alhainen lämpöarvo luo rajoitteita pyrolyysiöljyjen käytölle, mutta siitä huolimatta pyrolyysiöljyt ovat osoittaneet polttokokeiden kautta pystyvänsä korvaamaan raskaan sekä kevyen polttoöljyn käyttöä teollisuuden käyttökohteissa. (Venderbosch & Prins 2011, 144.) Fossiilisten polttoöljyjen käytön korvaamisen kannalta pyrolyysiöljyn alhaisemman lämpöarvon tuomista seurauksista tärkein on halutun tehon tuottamiseksi tarvittava suurempi polttoaineen virtaus. Tämän seurauksena voi muodostua tarve toteuttaa muutoksia esimerkiksi poltinjärjestelmän suuttimiin sekä polttokammion suunniteluun. Lisäksi myös putkiston sekä varastoinnin mitoitus joudutaan suunnittelemaan pyrolyysiöljyn käytön näkökulmasta. (Lehto et al. 2014, 181.)

Pyrolyysiöljyt syttyvät vaikeammin kuin hiilivedylliset polttoaineet. Pyrolyysiöljyille on pyritty määrittämään setaanilukua, jota käytetään ilmaisemaan dieselöljyn syttymisherkkyyttä. Samalla setaaniluku kuvastaa dieselöljyn laatua. Korkea setaaniluku tarkoittaa alhaista syttymisviivettä kun polttoaine ruiskutetaan moottorissa palotilaan. Setaanilukua on kuitenkin vaikea määrittää pyrolyysiöljylle jonka vuoksi tutkijat ovat käyttäneet setaaniluvun määrittämiseen pyrolyysiöljyn ja dieselöljyn emulsioita vaihtelevilla pyrolyysiöljyn osuuksilla. Lopputuloksena tutkijat saivat pyrolyysiöljylle setaaniluvuksi 5,6. Vastaavasti dieselöljyn setaaniluku on noin 48. (Lu et al. 2009, 1378–1380.)

Myös pyrolyysiöljyn leimahduspisteen määrittämisessä on esiintynyt ongelmia. Leimahduspiste nestemäiselle polttoaineelle määritetään alhaisimpana lämpötilana jossa polttoaineesta haihtuu niin paljon höyryä, että ne muodostavat palamiskelpoisen seoksen nestepinnan yläpuolelle. Riippuen haihtuvien yhdisteiden määrästä pyrolyysiöljyjen leimahduspiste vaihtelee 40–70 °C:n tai yli 100 °C:n lämpötila-alueella. Pyrolyysiöljyille on tyypillisesti vaikea määrittää leimahduspistettä 70–100 °C:n välillä johtuen veden haihtumisesta joka haittaa pyrolyysiöljyn höyryjen syttymistä. Leimahduspiste on tärkeä polttoaineen käsittelyn sekä syttymisvaaran kannalta, ja pyrolyysiöljyjen korkea leimahduspiste mahdollistaa sen turvallisen säilytyksen huoneenlämmössä. (Lu et al. 2009, 1378–1380.)

### 3.8 Pyrolyysiöljyjen standardisointi

Pyrolyysiöljyille on muodostunut tarve luoda polttoainekäyttöä koskevat laadulliset standardit. Tarve laatustandardeille on seurausta pyrolyysiöljyjen täysin erilaisista ominaisuuksista verrattuna perinteisiin nestemäisiin polttoaineisiin sekä muihin bioöljyihin. Lisäksi laatustandardien tarvetta on tukenut eri pyrolyysiöljyjen koostumuksen ja ominaisuuksien mahdollinen vaihtelu laajalla skaalalla. Laatustandardien olemassaolo antaa paremmat lähtökohdat luotettavien sekä korkealla hyötysuhteella toimivien pyrolyysiöljyn polttojärjestelmien suunnittelulle sekä rakentamiselle.

Yhdystavaltalainen ASTM International (aiemmin the American Society for Testing and Materials) on luonut pyrolyysiöljyille ensimmäisen laatustandardin ASTM D7544. Standardissa määritellään fysikaaliset ja kemialliset vaatimukset biomassasta valmistetuille pyrolyysiöljyille jotka ovat tarkoitettu polttoaineeksi poltinkäyttöön teollisuudessa. Standardin määrittelyt eivät koske esimerkiksi kotitalouksien lämmityksiä, pieniä kaupallisia kattiloita, moottoreita tai merisovelluksia. Standardissa pyrolyysiöljylle on määritelty kaksi laatua joiden ominaisuudet ovat esitetty taulukossa 3.2. Laadut eroavat toisistaan sallittujen kiintoaine- ja tuhkapitoisuuksien osalta. (ASTM International 2012.)

**Taulukko 3.2.** ASTM D7544 -standardissa pyrolyysiöljylle määriteltyjä ominaisuuksia (ASTM International 2012).

Property	Test Method	Grade G	Grade D
Gross Heat of Combustion, MJ/kg, min	D240	15	15
Water Content, % mass, max	E203	30	30
Pyrolysis Solids Content, % mass, max	D7579	2.5	0.25
Kinematic Viscosity at 40 °C, mm <sup>2</sup> /s, max	D445A	125	125
Density at 20 °C, kg/dm <sup>3</sup>	D4052	1.1–1.3	1.1–1.3
Sulfur Content, % mass, max	D4294	0.05	0.05
Ash Content, % mass, max	D482	0.25	0.15
pH.	E70	Report	Report
Flash Point, °C, min	D93, Procedure B	45	45
Pour Point, °C, max	D97	–9	–9



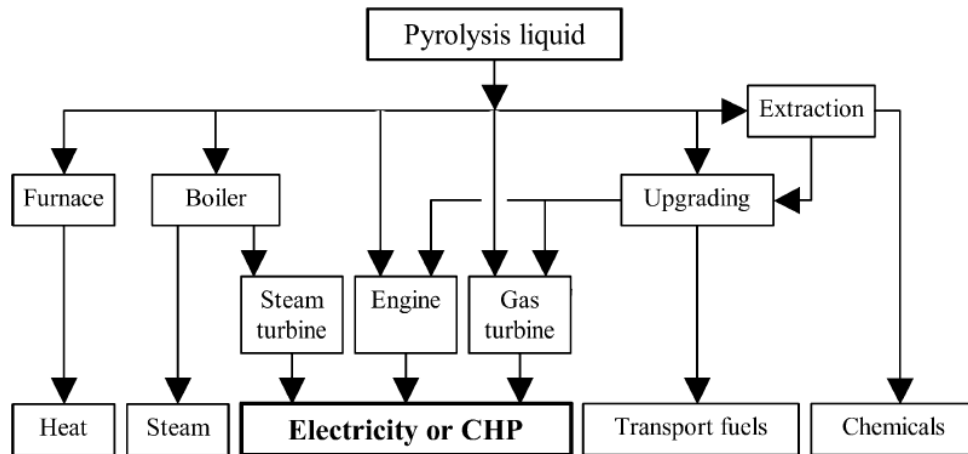
Yhdysvaltojen ja Euroopan lainsäädäntö sekä päästörajoitukset eroavat toisistaan, joten on ollut tarpeen luoda myös Eurooppalainen EN-standardi koskien pyrolyysiöljyjen polttoainekäyttöä. Eurooppalainen standardisoimisjärjestö CEN on julkaissut pyrolyysiöljyyn liittyvän standardisoinnin vuoden 2017 aikana. Standardissa (EN 16900:2017) määritellään pyrolyysiöljylle laatuvaatimukset sekä testausmenetelmät teollisuuden kokoluokan kattilakäyttöön (teho yli 1 MW). Standardi sisältää pyrolyysiöljyille kaksi laatumääritelmää sekä myös ohjeita varastoinnille, näytteenotolle ja materiaalien yhteensopivuudelle. (CEN 2017.)

## 4 PYROLYYSIÖLJYN POLTTOAINEKÄYTTÖ

Pyrolyysiöljyt ovat heikkolaatuisempia polttoaineita verrattuna fossiilisiin öljyperäisiin polttoaineisiin. Heikkoja polttoaineominaisuuksia pyrolyysiöljyillä ovat alhainen lämpöarvo ja pH, korkea viskositeetti ja pintajännitys sekä suuri happi- ja vesipitoisuus. Pyrolyysiöljyt voivat sisältää myös suuren kiintoaine- ja tuhkapitoisuuden. Lisäksi pyrolyysiöljyjen polttoaineominaisuuksia heikentää niiden kemiallinen ja termien epävakaus sekä heikot syttymisen ja palamisen ominaisuudet. (Lu et al. 2009, 1382.) Pyrolyysiöljyillä on näistä huolimatta myös lupaavia ominaisuuksia, ja pyrolyysiöljyjen on todettu omaavan potentiaalia korvaamaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä energiantuotannon sovelluksissa. Etuina pyrolyysiöljyn käytölle on etenkin biomassaperäisten polttoaineiden CO<sub>2</sub>-neutraalisuus sekä hyvin alhaiset rikkipitoisuudet. Lisäksi koska pyrolyysiöljy on nestemäinen polttoaine, on sitä helppo kuljettaa sekä varastoida. (Czernik & Bridgwater 2004, 592.)

Pyrolyysiöljyä voidaan käyttää polttoaineena itsenäisesti sekä samanaikaisesti öljyperäisten polttoaineiden kanssa. Pyrolyysiöljyä voidaan myös käyttää sekoituksina esimerkiksi metanolin tai etanolin kanssa sekä surfaktanttien avulla dieselöljyn kanssa. (Lu et al. 2009, 1381.) Pyrolyysiöljyn käyttöä polttoaineena on tutkittu ainakin kattiloissa, dieselmootoreissa, kaasuturbiineissa ja Stirling-mootoreissa. Pyrolyysiöljyn polttoainekäytössä kiinnostusta on kohdistunut etenkin raskaan polttoöljyn korvaamiseen kaukolämmön tuotannossa. Pyrolyysiöljy on näyttäytynyt sopivaksi polttoaineeksi etenkin kattilakäyttöön silloin kun pyrolyysiöljy on ominaisuuksiltaan tasalaatuinen, päästöt ovat hyväksyttävällä tasolla ja sen käyttö on taloudellisesti kannattava vaihtoehto. Kaupallisille suuren kokoluokan sovelluksille onkin tärkeää hyvän ja tasaisen laadun omaavan pyrolyysiöljyn saatavuus houkuttelevaan hintaan. (Czernik & Bridgwater 2004, 592–593.)

Kattiloissa pyrolyysiöljyä on käytetty onnistuneesti hyvillä tuloksilla, ja lisäksi pyrolyysiöljy on vaikuttanut lupaavalta polttoaineelta myös dieselmootoreille sekä kaasuturbiineille sähkön tuotannossa. Pyrolyysiöljyn jatkojalostaminen liikenteen polttoaineeksi omaa useita teknillisiä haasteita, eikä se ole vielä osoittanut taloudellisesta houkuttelevuutta. (Czernik & Bridgwater 2004, 592–598.) Pyrolyysiöljyillä on monia mahdollisia käyttökohteita polttoaineiden, kemikaalien, lämmön sekä sähkön tuottamiseksi. Pyrolyysiöljyn mahdollisia käyttökohteita ja niiden kautta saatavia lopputuotteita on esitetty kuvassa 4.1.



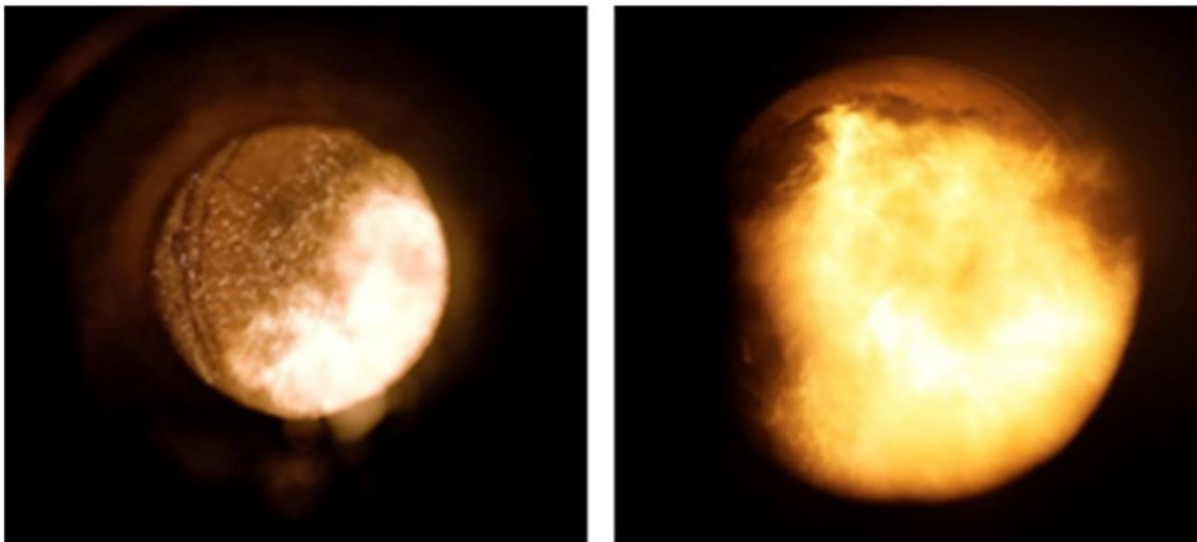
**Kuva 4.1.** Pyrolyysiöljyn polttoainekäytön mahdollisuuksia (Bridgwater et al. 2002, 187).

Pyrolyysiöljyä käytettäessä fossiilisille polttoaineille suunnitelluissa järjestelmissä, kuten kattiloissa, moottoreissa ja kaasuturbiineissa, voi esiintyä huomattaviakin ongelmia pyrolyysiöljyjen poikkeavien ominaisuuksien seurauksena. Pyrolyysiöljyjen ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus niiden palamiskäyttämiseen, ja pyrolyysiöljyjen ominaisuuksien vaihtelevuus aiheuttaa vaihtelevuutta myös palamiskäyttämiseen. Tämä hankaloittaa omalta osaltaan pyrolyysiöljyjen käyttöä energiantuotannon sovelluksissa. Lisäksi aiemmin ongelmana on ollut laatustandardien puuttuminen, jotka ovat tarpeellisia pyrolyysiöljyn kaupallisten sovellusten kannalta. (Czernik & Bridgwater 2004, 591–592.) Osa ongelmista on voitu ratkaista vaikuttamalla pyrolyysiöljyn ominaisuuksiin, mutta osa ongelmista voi vaatia modifikaatioita polttojärjestelmiin sekä käyttöolosuhteisiin. Huonolaatuinen pyrolyysiöljy ja ongelmat polttojärjestelmän soveltuvuudessa sekä säädöissä vaikeuttavat palamisen hallintaa. Tällöin seurauksena voi aiheutua esimerkiksi epätäydellistä palamista, kohonneita päästöjä sekä kattilapintojen nopeaa likaantumista. Esimerkiksi pienissä polttokammioissa voi olla haastavaa saada säädettyä liekkiä muotoa oikeanlaiseksi sekä saavuttaa hyvä palaminen heikkolaatuisella pyrolyysiöljyllä. Tällaisissa tapauksissa suhteellisen suuri osa sumutetusta pyrolyysiöljystä ei välttämättä pala täydellisesti. Kun pyrolyysiöljy on hyvälaatuista, palamisolosuhteet ovat hyvät ja polttojärjestelmä on säädetty hyvin, saadaan pyrolyysiöljy palamaan tasaisesti. Tällöin liekki on yhtenäinen ja symmetrinen. Myös päästöt ovat alhaisia, eikä poltossa tarvita apuliekkiä tai tukipolttoainetta. (Lehto et al. 2014, 182.)

Kun pyrolyysiöljyä käytetään polttoaineena teollisessa mittakaavassa, voidaan liekki jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe käsittää kevyiden yhdisteiden höyrystymisen sekä

palamisen, ja toinen vaihe sisältää raskaampien yhdisteiden palamisen. Teollisen mittakaavan sovelluksissa nämä molemmat tasot täytyy yhdistyä yhtenäiseksi liekiksi jotta pystytään saavuttamaan vakaa palamisprosessi. Tämä voi luoda haasteita, sillä pyrolyysiöljyt sisältävät eri yhdisteitä joilla on erilaiset haihtuvuudet. (Lehto et al. 2014, 182.) Pyrolyysiöljyä poltettaessa liekki on hyvin valaiseva, joka viittaa voimakkaasti säteilevien partikkeleiden suureen määrään (Lu et al. 2009, 1381). Pyrolyysiöljyjen huomattava vesipitoisuus alentaa liekin adiabaattista lämpötilaa, joka on noin 1700–2000 K. Vastaavasti polttoöljyillä liekin adiabaattinen lämpötila on 2200–2300 K. Eroavaisuus liekkien adiabaattisissa lämpötiloissa on huomattavasti pienempi kuin lämpöarvojen perusteella voisi olettaa. Tämä pieni eroavaisuus johtuu eroista palamiseen tarvittavista stökiometrisistä ilmamääristä, joka on pyrolyysiöljyille huomattavasti pienempi. Stökiometrinen ilmantarve pyrolyysiöljyille on noin 7 kg/kg<sub>pa</sub>, kun polttoöljyillä tämä on noin 14 kg/kg<sub>pa</sub>. Pyrolyysiöljyjen alhaisempi ilmantarve palamisessa johtuu niiden korkeasta happipitoisuudesta. (Czernik & Bridgwater 2004, 592.)

Pyrolyysiöljyillä pisaroiden palamisnopeudet ovat hitaampia kuin fossiilisilla polttoöljyillä. Tämä johtuu pääasiassa pyrolyysiöljyjen suuresta massatiheydestä ja pyrolyysiöljyjen sisältämän veden suuresta höyrystymisen latenttilämmöstä. Tämän seurauksena pyrolyysiöljyn liekin koko on tyyppillisesti fyysisesti suurempi kuin fossiilisilla polttoöljyillä. Suunnittelussa onkin tarpeen mahdollistaa pyrolyysiöljyn pisaroille korkeammat viipymäajat kuin fossiilisilla polttoöljyillä jotta pisarat palaisivat täydellisesti. (Lehto et al. 2014, 185–186.) Pyrolyysiöljyä poltettaessa pisaroita voi poistua liekin alueelta. Tämä esiintyy liekistä syntyvinä kipinäinä jota on havainnollistettu kuvassa 4.2. Näillä kipinöillä on taipumusta kasvattaa hiukkaspäästöjä sekä pahimmassa tapauksessa aiheuttaa tulipesän seinämien ja lämpöpintojen likaantumista. Näiden kipinöiden esiintyminen voidaan minimoida hyvällä polttimen suunnittelulla sekä säädöillä. Myös sumutustekniikka ja pyrolyysiöljyn vesipitoisuus vaikuttavat syntyvien kipinöiden määrään. (Lehto et al. 2013, 41–43.)



**Kuva 4.2.** Vasemmalla pyrolyysiöljyn liekistä esiintyviä kipinöitä ja oikealla hyvin säädetyn polttimen liekki (Lehto et al. 2013, 41).

Syttyäkseen pyrolyysiöljyt tarvitsevat suuren määrän energiaa. Vaikeudet syttymisessä aiheutuvat pääasiassa pyrolyysiöljyjen huomattavasta vesipitoisuudesta, sillä veden höyrystyminen vaatii paljon energiaa veden korkean höyrystyslämmön seurauksena. Lehto et al. (2013, 185) suosittelevat pyrolyysiöljyn poltinkäyttöön kaasukäyttöistä sytytintä, ja he pitävät sitä poltinkäytössä sopivimpana sekä luotettavimpana pyrolyysiöljyn sytyttämiseksi. Kaasusytyttimellä saadaan aikaiseksi jatkuva liekki joka on helppo kohdentaa sumutettavaa pyrolyysiöljyyn. Pyrolyysiöljy voi tarvita apuliekin tai tukipolttoaineen käyttämistä kylmäkäynnistyksessä tai vakaan palamisen ylläpitämiseksi tapauksissa joissa pyrolyysiöljy on heikkolaatuista.

Palamisen laadun parantamiseksi palamisilman esilämmitys on suositeltavaa. Myös hajotusilman esilämmitys on suositeltavaa jos käytössä on ilmahajotteinen sumutustekniikka. Hajotusilman lämpötilan kasvattaminen vähentää sen tiheyttä joka johtaa suuttimessa ilman sekä pyrolyysiöljyn välisen nopeuseron kasvuun, ja siten parantaa sumutusta. Palamisilman esilämmittäminen parantaa pisaroiden höyrystymistä sekä nostaa liekin ja savukaasujen lämpötilaa. Tämä johtaa polttoaineen perusteellisempaan palamiseen sekä hiilivety- ja hiilimonoksidipäästöjen alentumiseen. (Lehto et al. 2014, 184.)

Palamisilman ja hajotusilman esilämmityksen lisäksi voi olla myös tarpeen lisätä pyrolyysiöljyyn pieni määrä lisäaineita, sillä pyrolyysiöljyn palamista voidaan parantaa

sekoittamalla pyrolyysiöljyyn kevyempiä polttoaineita kuten palavia polaarisia liuottimia. Palavia polaarisia liuottimia on käytetty pyrolyysiöljyjen homogenisoimiseksi ja viskositeetin alentamiseksi, mutta niiden lisääminen on myös tehokas keino pisaroitumisen ja lämpöarvon parantamiseksi. Lisäksi niiden lisääminen alentaa pyrolyysiöljyn pintajännitystä sekä tiheyttä ja kasvattaa pyrolyysiöljyn haihtuvuutta. Kuitenkin useimmissa tapauksissa kevyempien polttoaineiden lisääminen ei ole taloudellisesti kannattavin ratkaisu. (Lehto et al. 2013, 51.) Pyrolyysiöljyjen polttoainekäytön kannalta ominaisuuksia voidaan parantaa myös muullakin jatkojalostuksella kuin lisäaineiden lisäämisellä, kuten esimerkiksi suodatuksella, emulsifioinnilla, vetykäsittelyllä, zeoliitin lisäämisellä sekä erilaisilla muilla fysikaalisilla, kemiallisilla ja katalyyttisillä metodeilla. Näiden erilaisten jatkojalostusten avulla pyrolyysiöljyä voidaan pyrkiä muokkaamaan soveltuvaksi polttoaineeksi jo olemassa oleville teknologioille, joille pyrolyysiöljyjen kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet luovat merkittäviä vaikeuksia. (Bridgwater 2012, 80–84.)

#### **4.1 Polttoainekäytössä syntyvät päästöt**

Pyrolyysiöljyn polttoainekäytössä muodostuvat päästöt ovat pääasiassa hyvin riippuvaisia pyrolyysiöljyn kiintoaineen, tuhkan, veden sekä typen pitoisuuksista. Päästötasot vaihtelevat myös pyrolyysiöljyn laadun, käytetyn polttojärjestelmän sekä käyttöolosuhteiden perusteella. Taulukossa 4.1 on esitetty pyrolyysiöljylle modifioidulla 2,5 MW<sub>e</sub> kaasuturbiinilla muodostuneita päästöjä käytettäessä eri polttoaineita. Päästöt ovat mitattu ajettaessa kaasuturbiinia maksimiteholla, ja päästöt ovat redusoitu 15 %:n happipitoisuuteen. Vastaavasti taulukossa 4.2 on esitetty pyrolyysiöljyn kattilakäytössä muodostuneita päästöjä. Tyypillisesti pyrolyysiöljyn polttoainekäytössä päästötasot ovat kevyen ja raskaan polttoöljyn päästöjen välillä. Hiukkaspäästöt voivat olla suuremmat, mutta toisaalta pyrolyysiöljyn poltosta ei juurikaan muodostu SO<sub>x</sub>-päästöjä sillä pyrolyysiöljyt sisältävät enintään vähäisiä määriä rikkiä. Pyrolyysiöljyllä CO-päästöt voivat olla korkeampia kuin polttoöljyillä, mutta CO-päästöt ovat kuitenkin pääasiassa hyväksyttävällä tasolla. (Lehto et al. 2013, 54–55.)

**Taulukko 3.1.** Pyrolyysiöljylle modifioidulla 2,5 MW<sub>e</sub> kaasuturbiinilla muodostuneita päästöjä käytettäessä eri polttoaineita (Oasmaa et al. 2005, 2161).

fuel	Emissions (%) <sup>b</sup>			
	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
No. 2 diesel oil	4.2	1	321	7
biofuel <sup>c</sup>	4–6	49–55	58–60	1–2
crude oil blend	4.4	14.8	326	421
biodiesel	4.3	4.1	321	1.4
ethanol	4.5	3	101	2
Ontario emissions limit	60	189	86	

**Taulukko 4.2.** Pyrolyysiöljyn kattilakäytössä muodostuneita päästöjä (Oasmaa & Meier 2005, 8).

Liquid Source	Ensyn		Union Fenosa <sup>1</sup>		Ensyn			Ensyn	Dynamotive	Fortum
Feedstock	Hardwood		Eucalyptus		Hardwood			Hardwood	Pine	Spruce
Solids	0.5		0.7					~0.4	0.17	0.01
Boiler	Arimax Eetta 200 kW boiler		Arimax Eetta 200 kW boiler		Water-wall utility boiler 10 MW <sub>th</sub>			10 MW <sub>th</sub> boiler, Oilon Lenox GRT-5L	10 MW <sub>th</sub> boiler, Oilon Lenox GRT-5L	200 kW <sub>th</sub> LFO boiler
Experimental period, h										
O <sub>2</sub> (vol%)	4	6	5	6	--	--	--	3.3-3.6	3.3-3.4	
CO (ppm)	32	28	40	20	32	32	67	1-2	10-25	
NO <sub>x</sub> (ppm)	142	137	170	150	195	198	208	159-164	108	
THC	--	--	--	--	0.8	1.0	1.4			
Particulate (mg/MJ)	--	--	--	--	105	144	161	15	92	
Bacharach No.	5	5	2.5	2.8	--	--	--	2	2.8	
Reference	Gust 1997		Gust 1997		Huffman 1997			Oasmaa 2001	Oasmaa 2001	Gust 2004

Pyrolyysiöljyihin sitoutunut typpi korreloi voimakkaasti pyrolyysiöljyjen NO<sub>x</sub>-päästöjä. Pyrolyysiöljyt voivat sisältää merkittäviä määriä typpeä joka vastaavasti voi johtaa korkeisiin NO<sub>x</sub>-päästöihin. Palamisprosessiin polttoaineen mukana typpeä tulee määrällisesti vähemmän kuin palamisilman mukana, mutta polttoaineen sisältämä typpi on reaktiivisempaa. Pyrolyysiöljyjen alhaisempi palamislämpötila kuitenkin vähentää termisten NO<sub>x</sub>-päästöjen muodostumista. Tämä tekee polttoaineeseen sitoutuneesta typestä NO<sub>x</sub>-päästöjen

muodostumisen päämekanismin. Typpimonoksidi käsittää suurimman osan  $\text{NO}_x$ -päästöistä. (Lehto et al. 2013, 54–55.)

Vaiheistetun polton toteuttaminen  $\text{NO}_x$ -päästöjen vähentämiseksi voi olla suositeltavaa myös pyrolyysiöljylle. Vaiheistettu poltto  $\text{NO}_x$ -päästöjen vähentämiseksi on toteutettu onnistuneesti maakaasulle sekä raskaalle ja kevyelle polttoöljylle.  $\text{NO}_x$ -päästöjen muodostumiseen voidaan vaikuttaa myös käyttöolosuhteiden kautta.  $\text{NO}_x$ -päästöt voivat kasvaa kun pyrolyysiöljyn poltossa minimoidaan CO:n ja palamattomien partikkelien päästöt, käytetään suurta yli-ilman määrää, maksimoidaan tulipesän kuorma sekä kun pyrolyysiöljy sisältää alhaisen vesipitoisuuden tai korkean lämpöarvon. (Lehto et al. 2014, 186.)

Pyrolyysiöljyjen polttokokeissa on hiukkaspäästöjen osalta esiintynyt suhteellisen suurta vaihtelua. Hiukkaspäästöt voivat olla korkeitakin, riippuen pyrolyysiöljyn palamattomien kiintoaineiden pitoisuudesta. On suositeltavaa pyrkiä vähentämään pyrolyysiöljyjen kiintoainepitoisuus alle 0,1 p-%:n pitoisuuteen sekä varmistaa että raaka-aineesta peräisin olevaa epäorgaanista ainesta olisi mahdollisimman vähän. Tällöin hiukkaspäästöjen vähentymisen lisäksi saadaan vähennettyä myös lämmönsiirtopintojen likaantumisen sekä eroosiota suuttimissa, venttiileissä ja pumpuissa. Hyvissä käyttöolosuhteissa hiukkaspäästöt voivat koostua pääasiassa vain tuhkasta. Optimoidulla polttojärjestelmällä keskilaatuista pyrolyysiöljyä käytettäessä on mahdollista saavuttaa 100 mg/m<sup>3</sup>n hiukkaspäästöjen taso kun savukaasut redusoidaan 3 %:n O<sub>2</sub>-pitoisuuteen. Tosin erilaisissa olosuhteissa myös 300 mg/m<sup>3</sup>n hiukkaspäästöjen esiintyminen on mahdollista. Tyypillisesti hiukkaset ovat pienikokoisia (alle 10 µm) ja palamiskelpoisen materiaalin pitoisuus hiukkaspäästöjen joukossa on alhainen. (Lehto et al. 2013, 55–56.)

## 4.2 Pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän erot perinteisiin järjestelmiin

Pyrolyysiöljyjen poikkeavat ominaisuudet aiheuttavat haasteita sekä muutostarpeita poltinjärjestelmien suunnitteluun. Kuitenkin hyvällä suunnittelulla pyrolyysiöljyjen rajoitteet huomioiden, on mahdollista toteuttaa pyrolyysiöljylle teollisuuden kokoluokan poltinjärjestelmiä joilla saavutetaan luotettava toiminta, pyrolyysiöljyn perusteellinen palaminen, hyvä palamisen laatu sekä alhaiset päästöt. (Lehto et al. 2013, 54.) Jos pyrolyysiöljyä suunnitellaan käytettäväksi esimerkiksi fossiilille polttoöljylle rakennetuilla



polttinjärjestelmillä, on hyvin todennäköistä että järjestelmät tarvitsevat joitakin muutoksia koska ne ovat suunniteltu ja optimoitu toimimaan polttoaineilla joilla on erilaiset ominaisuudet kuin pyrolyysiöljyllä. Tarvittavien muutosten kokonaisinvestointi voi kuitenkin pysyä maltillisena. (Green Fuel Nordic 2013, 10.)

Polttimena tulisi käyttää pyrolyysiöljylle modifioitua öljypoltinta tai pyrolyysiöljylle suunniteltua poltinta. Lisäksi pumppaus, putkilinjat, esilämmitys ja muut järjestelmän osat tulisi suunnitella erityisesti pyrolyysiöljylle. Polttinjärjestelmässä pyrolyysiöljyn kanssa kosketuksissa olevat osat, kuten öljylinjasto ja sen komponentit, tulee olla materiaaleista jotka kestävät hyvin matalaa pH:ta. Pyrolyysiöljyn käyttö voi vaikuttaa käytettävän polttimen sumutustekniikan valintaan sekä suuttimen suunnitteluun. Pyrolyysiöljyn sumutus tavallisesti toteutetaan paineilman avulla ilmahajotteisena sumutuksena. Tällöin öljylinjastossa voidaan käyttää pienempää painetta. Fossiilisten polttoöljyjen kohdalla ilmahajotteista sumutusta käytetään esimerkiksi poltettaessa öljyjä joiden viskositeetti on hyvin korkea. Ratkaisuna sumutukselle fossiilisia polttoaineita käytettäessä voi olla paineöljyhajoitteinen sumutus jossa öljynpaine nostetaan riittävän korkeaksi öljyn sumuuntumiseksi suuttimessa. Pyrolyysiöljyllä tämä on osoittautunut ongelmalliseksi, ja sumutuksen vaatiman korkean öljynpaineen tuottaminen on haastavaa pumpun toiminnalle. Pienempää öljynpainetta käyttämällä saadaan pyrolyysiöljyn sovelluksissa myös pidennettyä eri komponenttien, kuten öljypumpun ja öljyvirtauksen säätöventtiilin, käyttöikä. Sumutustekniikan vaihtoehtona voi olla myös rotaatiosumutus. Rotaatiosumutusta on käytetty pyrolyysiöljyn polttamiseksi, mutta tavallisesti ne tarvitsevat enemmän huoltoa kuin muut sumutusratkaisut. Lisäksi rotaatiosumuttimet ovat herkkiä polttokammion olosuhteille. Pyrolyysiöljyn käyttö rotaatiosumuttimilla voi kasvattaa huoltotarvetta verrattuna fossiilisiin polttoöljyihin. (Lehto et al. 2014, 184–185.)

Hyvän sumutuksen aikaansaamiseksi pyrolyysiöljyä ei voida esilämmittää yhtä korkeaan lämpötilaan kuin fossiilisia polttoöljyjä, sillä pyrolyysiöljyn liian korkea esilämmitys voi johtaa vaikeuksiin kuten öljylinjaston ja suuttimen tukkeutumiseen. Polttoainekäytössä suositellaan esilämmittämään pyrolyysiöljy sen ominaisuuksista riippuen 40–80 °C:n lämpötilaan. (Lehto et al. 2014, 184.) Fossiilisia polttoöljyjä käytettäessä polttoaine voidaan pitää esilämmitettynä öljysäiliössä. Pyrolyysiöljyä ei kuitenkaan tule pitää esilämmitettynä öljysäiliössä johtuen sen ikääntymisreaktioiden kiihtymisestä. Tämän seurauksena pyrolyysiöljyn esilämmitys tulee tehdä öljylinjastossa juuri ennen polttoa.

Perinteisissä raskaan polttoöljyn poltinjärjestelmissä polttoainevirtauksen paluukierto voidaan toteuttaa suuttimelta suoraan takaisin öljysäiliöön, ja virtauksen määränsäätö voidaan tehdä kuristamalla öljyn virtausta paluukiertolinjassa. Pyrolyysiöljyä ei kuitenkaan ole suositeltavaa kierrättää esilämmityksen jälkeen lämpimänä takaisin öljysäiliöön. Jos lämmitettyä pyrolyysiöljyä kierrätetään takaisin öljysäiliöön, voi se vaikuttaa varastoidun pyrolyysiöljyn homogeenisuuteen. Tämän seurauksena pyrolyysiöljyn virtauksen säätö tulisi toteuttaa kuristamalla virtausta polttimelle menevällä öljynlinjan osuudella. Paluukierto voidaan toteuttaa kierrättämällä pyrolyysiöljy öljysäiliön sijasta takaisin öljylinjastoon.

## 5 TUTKIMUSYMPÄRISTÖ

Tutkimusympäristönä toimi Savonia-ammattikorkeakoulun Varkauden kampuksella oleva energiatutkimuskeskus, joka keskittyy polttotekniikkaan. Varkaus kuuluu merkittävään energia-alan poltto- ja lämmönsiirtoteknologioihin keskittyvään klusteriin. Savonia-ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen tavoite on tarjota palveluita alan yrityksille sekä täydentää alueellista asiantuntijuutta ja osaamista energiatekniikassa. Tutkimusympäristöä on tarkoitus käyttää energiatekniikan koulutuksessa sekä tarjoamaan asiakaslähtöisiä energiatutkimuksen palveluita yrityksille ja julkiselle sektorille. (Savonia 2014, 2.)



**Kuva 5.1.** Energiatutkimuskeskus.

Kyseessä on teollisen kokoluokan energiateknologian tutkimusympäristö. Kokonaisuuden valmistuessa energiatutkimuskeskus tarjoaa valmiudet tutkia, kehittää sekä testata palamista, palamisesta muodostuvia savukaasuja sekä niiden hallintaa arina- ja leijupetikattilassa. Käytettäviä polttoaineita ovat esimerkiksi kierrätyspolttoaineet, hake, turve ja pyrolyysiöljy. Lisäksi mahdollisuutena on tutkia eri materiaalien korroosiokäyttämistä ja savukaasujen korroosio-ominaisuuksia. Tutkimuskeskus tarjoaa myös mahdollisuudet esimerkiksi

tuotetestaukseen, ajotapojen vaikutusten testaukseen, henkilöstön koulutukseen sekä polttoaineiden soveltuvuuden määrittämiseen eri polttoteknologioille.

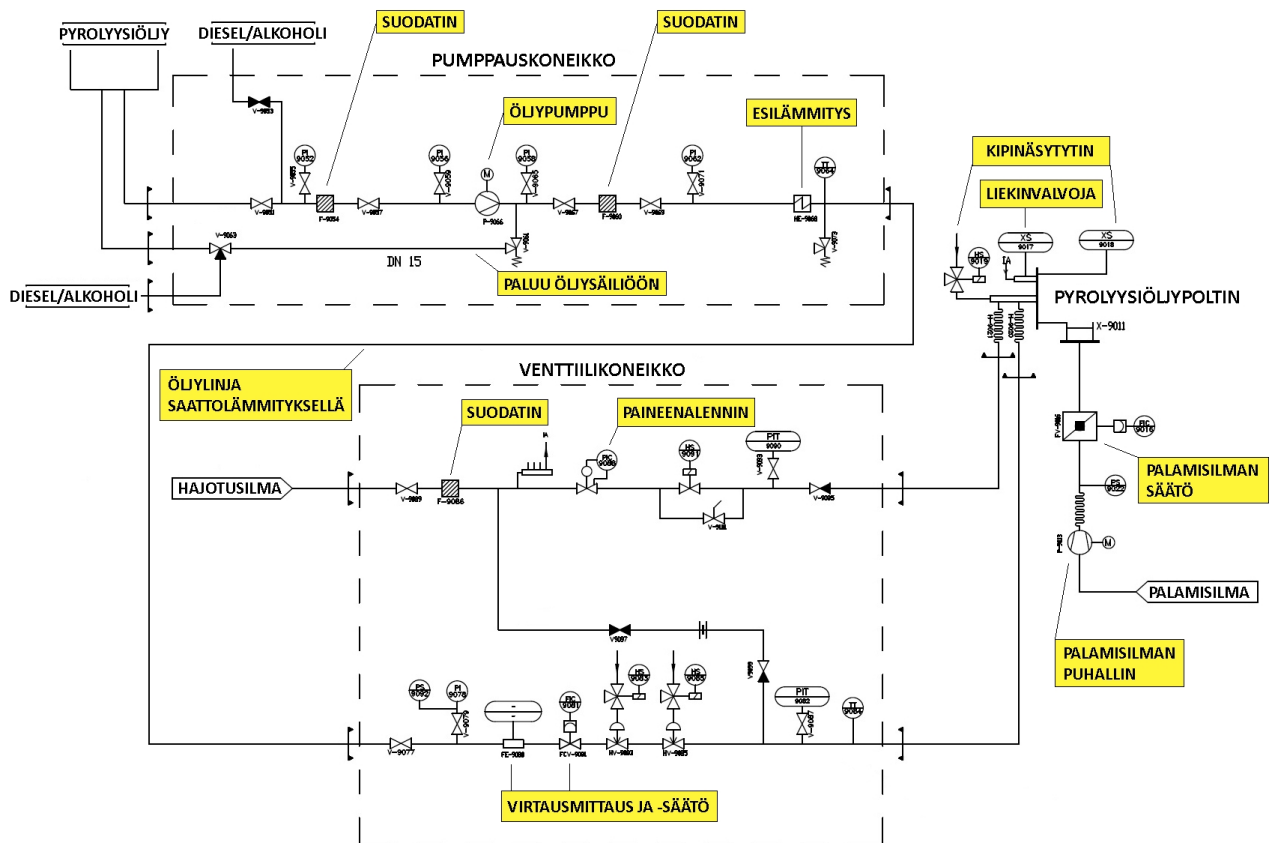
Pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmä on integroitu osaksi tutkimuskeskuksen suurempaa kokonaisuutta. Poltinjärjestelmän käyttöönotto liittyy Pyreus-hankkeeseen jossa Savonia-ammattikorkeakoulu on mukana yhdessä Itä-Suomen yliopiston kanssa. Pyreus-hankkeessa pyritään kehittämään ja arvioimaan pyrolyysiöljyihin perustuvia energiaratkaisuja. Hankkeen taustalla on puute tiedoista pyrolyysiöljyn käytettävyydestä ja päästöistä erityisesti pienten kattilalaitosten kohdalla. Tavoitteena hankkeella on saada tuotettua yritysten tarvitsemaa tietoa sekä osaamista pyrolyysiöljyn hyödyntämisestä energiantuotannossa. Tämä käsittää pyrolyysiöljyn käytettävyyden, päästöt ja savukaasujen puhdistusratkaisut. Hankkeella on myös tavoitteena vahvistaa Savonia-ammattikorkeakoulun ja Itä-Suomen yliopiston polttoprosesseihin sekä niiden savukaasuihin liittyvien kehitys- ja tutkimusympäristöjen toimintaa. (Savonia 2015.)

## 5.1 Pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmä

Polttotapahtumien lisäksi pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmällä on mahdollisuudet esimerkiksi tutkia pyrolyysiöljyn sakkautumiseen liittyviä ongelmia sekä pyrolyysiöljyn aiheuttamaa korroosiota ja kattilan likaantumista. Poltinjärjestelmällä voidaan myös suorittaa käynnistyskokeita. Pyrolyysiöljyä poltettaessa tutkimuskeskuksessa savukaasut voidaan ohjata kattilan jälkeen erilaisten puhdistimien läpi ja savukaasuille voidaan tehdä mittauksia sen koostumuksen määrittämiseksi. Pyrolyysiöljyn savukaasut voidaan ohjata myös korroosiotestauskammioon jossa pystytään tutkimaan erilaisten materiaalien, kuten kattila- ja lämmönsiirrinmateriaalien, likaantumista sekä korroosioikäytymistä.

Tutkimuskeskuksen poltinjärjestelmän suunnittelussa on kiinnitetty huomiota pyrolyysiöljyjen poikkeavien ominaisuuksien aiheuttamiin vaatimuksiin ja haasteisiin. Poltinjärjestelmä koostuu muutamista osa-alueista: pyrolyysiöljyn säilönnästä, pumppauskoneikosta, venttiilikoneikosta, poltinohjausautomaatiosta sekä biokattilaan liitetystä paineilmahajotteisesta polttimesta. Näitä poltinjärjestelmän eri osa-alueita käydään seuraavaksi läpi yksityiskohtaisemmin. Kuvassa 5.2 on esitetty poltinjärjestelmän PI-kaavio, johon on merkitty oleellisia tietoja järjestelmästä. Öljylinjasto öljysäiliöiltä polttimelle asti on valmistettu haponkestävästä teräksestä. Lisäksi

öljylinjasto on tehty modulaarisesti, jolloin öljylinjastosta voidaan irrottaa pienempiä osuuksia esimerkiksi puhdistettavaksi mahdollisen tukkeutumisen tapahtuessa.



Kuva 5.2. Pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän PI-kaavio.

Pyrolyysiöljy on säilöty kahdessa 1 m<sup>3</sup>:n kokoisessa muovisessa IBC-säiliöissä. Säiliöiden valinnassa on huomioitu pyrolyysiöljyn syövyttävä vaikutus joitain materiaaleja kohtaan. Nämä säiliöt ovat sijoitettu tutkimuskeskuksen ulkopuolelle erilliseen konttiin (kuvasa 5.3) josta on johdettu putkilinjat tutkimuskeskuksen sisätiloihin. Säiliöt on varustettu huohottimilla joilla estetään suuremmat säiliön sisäiset painenvaihtelut. Paineenvaihteluita aiheutuu esimerkiksi säiliöiden täytössä, pyrolyysiöljyä imettäessä säiliöistä sekä pyrolyysiöljyn palatessa pumppauskoneikolta takaisin säiliöihin. Varastointikontti on lämmitetty tila, ja tavoitteena on pitää kontin sisälämpötila 15–20 °C:ssa vuoden ympäri. Tällöin varastoitu pyrolyysiöljy pysyy pumpattavana myös talvella. Pyrolyysiöljyn varastoinnissa tavoitteena kuitenkin on ettei pyrolyysiöljylle aiheutuisi tarpeettomasti ikääntymisen nopeutumista. Toisessa säiliössä on jatkuvatoiminen sekoitin pyrolyysiöljyn homogeenisuuden ylläpitämiseksi. Myös toiseenkin säiliöön on tarkoitus asentaa jatkuvatoiminen sekoitin. Säiliöiden pinnankorkeuden

mittaukseen käytetään paine-erolähettä. Tutkimuskeskuksen pyrolyysiöljy on Fortumin hakkuutähteistä ja muusta puuperäisestä biomassasta valmistamaa pyrolyysiöljyä.



**Kuva 5.3.** Pyrolyysiöljyn varastointitila.

Pumppauskoneikolla (kuvassa 5.4) pääasiallisina tehtävinä on imeä pyrolyysiöljyä öljysäiliöistä, luoda syöttöpaine öljylinjastoon, epäpuhtauksien poisto sekä esilämmitys. Pumppauskoneikko sisältää kaksi suodattinta epäpuhtauksien poistamiseksi. Ensimmäisen suodattimen suodatusaste on 870  $\mu\text{m}$  ja se sijaitsee imulinjassa. Toisen suodattimen suodatusaste on 560  $\mu\text{m}$  ja se sijaitsee öljypumpun jälkeen painelinjassa. Pumppauskoneikolla esilämmitys tehdään kahdella sarjaan kytketyllä sähkökäyttöisellä esilämmittimellä. Näillä esilämmittimillä pyrolyysiöljy lämmitetään haluttuun lämpötilaan juuri ennen polttoa. Esilämmityksessä pyrolyysiöljyn lämpötila on suunniteltu nostettavan 40–70 °C:seen. Pumppauskoneikolta alkaa öljylinjaan liitetty saattolämmityskaapeli jolla ylläpidetään pyrolyysiöljyn esilämmitystä öljylinjan eri osissa. Pumppauskoneikossa on myös 7 baarin varoventtiili.





**Kuva 5.4.** Pumppauskoneikko.

Pumppauskoneikolta pyrolyysiöljy siirtyy venttiilikoneikolle, joka on esitetty kuvassa 5.5. Venttiilikoneikkoon on sijoitettu pyrolyysiöljyn virtausmittaus jonka perusteella säätöventtiili säätää pyrolyysiöljyn virtausta öljylinjassa. Lisäksi venttiilikoneikoissa on muitakin toimilaitteita kuten painekytkin, painemittaus, lämpötilamittaus sekä pikasulkuventtiileitä. Öljylinjan lisäksi venttiilikoneikon kautta kulkee myös hajotusilmalinja. Hajotusilmalinja tarjoaa paineilman jonka avulla pyrolyysiöljy saadaan sumutettua polttimen suuttimella. Venttiilikoneikossa öljylinja ja hajotusilmalinja on yhdistetty puhtaaksipuhalluslinjalla, jolla pystytään puhaltamaan öljylinjan loppupää polttimen kautta tyhjäksi. Puhtaaksipuhalluksella saadaan samalla puhdistettua polttimen öljylanssi. Hajotusilmalinja on yhteydessä tutkimuskeskuksen paineilmajärjestelmään. Paineilmajärjestelmään kompressorin luoma paine on maksimissaan 8 baaria. Hajotusilmalinjassa on 20  $\mu\text{m}$ :n suodatusasteen suodatin jolla paineilmapuhtaudesta poistetaan epäpuhtauksia kuten vettä, öljyä ja hiukkasia. Hajotusilmalinjassa on myös paineenalennin jolla säädetään polttimelle menevän hajotusilman paine haluttuun arvoon. Hajotusilmalinjaan sijoitetulla takaiskuventtiilillä varmistetaan että hajotusilma liikkuu vain polttimen suuntaisesti.



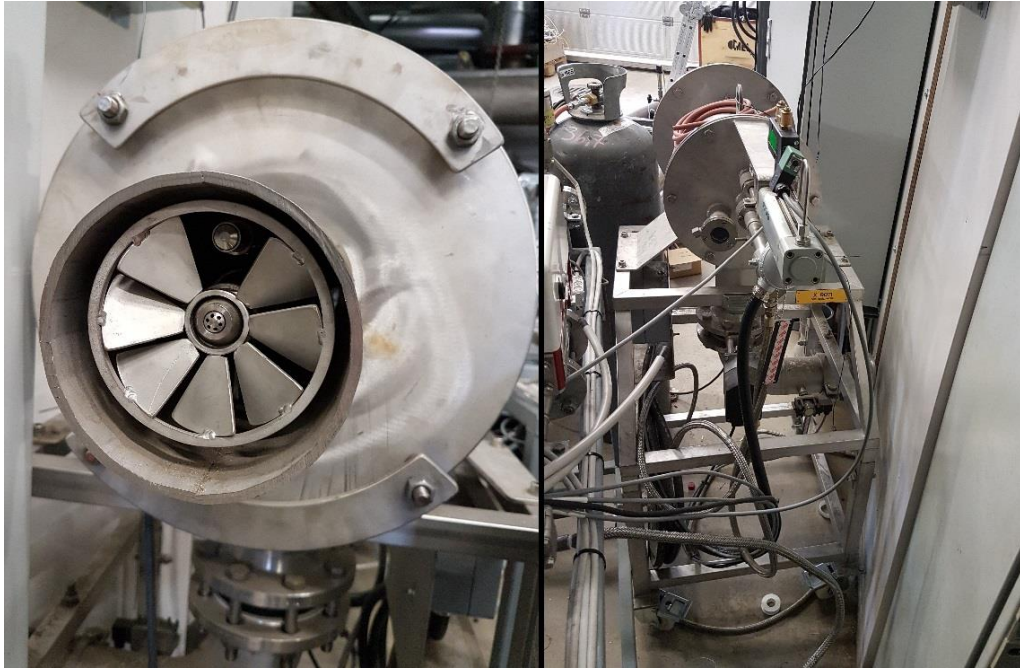
**Kuva 5.5.** Venttiilikoneikko.

Venttiilikoneikossa virtausmittauksen jälkeen öljylinjan haarautuu polttimelle meneväksi linjaosuudeksi sekä pumppauskoneikolle johtavaksi paluukiertolinjaksi. Paluukiertolinjan avulla pyrolyysiöljyä pystytään kierrättämään öljylinjastossa esimerkiksi niin kauan kun esilämmityksellä tavoiteltu pyrolyysiöljyn lämpötila on saavutettu koko öljylinjassa. Näin siis saadaan pyrolyysiöljyn lämpötila lähemmäksi samaa arvoa öljylinjan eri osissa ennen polttimen käynnistystä. Paluukiertolinjan avulla pyrolyysiöljyä ei myöskään tarvitse seisottaa öljylinjastossa. Paluukierron avulla öljylinjastossa voidaan lisäksi kierrättää polaarisia liuottimia öljylinjaston puhdistamiseksi.

Järjestelmän polttimena toimii nimellisteholtaan 500 kW:n pyrolyysiöljypoltin joka on sijoitettu pyörillä varustettuun kehikkoon. Tällöin poltin on siirrettävissä helposti pois paikaltaan esimerkiksi silloin kun biokattilassa käytetään muuta polttoainetta. Poltin on sumutustekniikaltaan paineilmahajotteinen, ja polttimessa käytetään öljylanssia joka on yleisesti käytössä paineilmahajotteisissa polttimissa. Pyrolyysiöljy ja hajotusilma syötetään öljylanssin takaosaan, ja ne kulkevat öljylanssia pitkin sen päässä olevalle suuttimelle. Pyrolyysiöljy ja hajotusilma sekoittuvat suuttimessa jolloin pyrolyysiöljyn virtaus hajoaa sumuksi. Öljylanssi sijaitsee liekkiputken ja liekkilevyn keskellä. Palamisilma syötetään liekkiputken josta palamisilma kulkeutuu liekkilevyn kautta polttokammioon. Liekkilevyllä palamisilma ohjataan pyörteiseen liikkeeseen joka tehostaa pyrolyysiöljyn pisaroiden ja



palamisilman sekoittumista. Kuvassa 5.6 on kuvattu pyrolyysiöljypoltin edestä ja takaa. Edestä olevassa kuvassa näkyy uloimpana osana liekkiputki, jonka sisällä on liekkilevy ja liekkilevyn keskellä öljylanssi.



**Kuva 5.6.** Pyrolyysiöljypoltin.

Poltin on varustettu kipinäsytyttimellä joka työnny ulos liekkiputkesta pneumaattisen sylinterin toimesta. Kipinäsytytin vetäytyy takaisin liekin syttymisen jälkeen. Paineilmalla jäähdytettävä liekinvalvoja tarkkailee polttimen liekin syttymistä, palamista sekä ohjaa kipinäsytyttimen toimintaa. Poltin on myös varustettu näkölaseilla joiden kautta voidaan seurata liekkiä. Palamisilma johdatetaan puhaltimella polttimen alaosasta liekkiputkelle tulevan ilmanakanavan kautta. Palamisilman toimilaitteita puhaltimen lisäksi ovat painekeytkin sekä sähköisen toimilaitteen ohjaama läppäventtiili jolla säädetään palamisilman määrää. Poltinjärjestelmän ohjauskeskus on sijoitettu biokattilan ja polttimen läheisyyteen. Automatiikka on toteutettu Siemens LMV 52 -poltinohjaimella, ja järjestelmää käytetään Fidelix Spider -käyttöliittymällä. Polttimen ohjausjärjestelmä on tarkoitus integroida tutkimuskeskuksen pääautomaatioon jotta poltinta pystyttäisiin ohjaamaan paikallisohjauksen ohella myös etänä tutkimuskeskuksen valvomosta. Lisäksi biokattilan ja savukaasujärjestelmän tiedot sekä ohjaus ovat käytettävissä vain tutkimuskeskuksen pääautomaation kautta.

Pyrolyysiöljyn poltinta käytetään 500 kW:n biokattilassa jossa on liikkuva arina. Biokattila toimii myös tutkimuskeskuksen leijupetiprosessin jätelämpökattilana, sillä leijupetikattilalla ei ole omaa vesipiiriä. Biokattilalta lämpöä siirretään vesivaraajan vesipiiriin lämmönsiirtimen kautta. Vesivaraajalla tilavuus on 3 m<sup>3</sup>, käyttölämpötila 5–95 °C ja korkein paine 1,5 baaria. Vesivaraajan lämpötila pyritään pitämään alle 80 °C:ssa ettei lämmönsiirto kattilan vesipiiristä alentuisi liikaa johtuen pienentyvästä lämpötilaerosta. Vesivaraajasta lämpöä voidaan siirtää maalämpöjärjestelmään ja radiaattorin glykolipiiriin. Radiaattori sijaitsee tutkimuskeskuksen ulkopuolella, joten jäähdyttävän ilman lämpötila voi vaihdella huomattavasti. Radiaattorin ilmoitettu jäähdytysteho on 85,1 kW, kun sisään- ja ulostulevan jäähdytysnesteen lämpötilaero on 6,5 °C. Jäähdytystehoa voidaan kasvattaa lämpötilaeroa kasvattamalla, ja noin 50 °C:n lämpötilaerolla jäähdytysteho on noin 600 kW.

Syntyneet savukaasut voidaan ohjata biokattilasta suoraan savupiippuun tai vaihtoehtoisesti materiaalitestauskammioon, sähkösuodattimeen sekä letkusuodattimeen. Savukaasujen PI-kaavio on esitetty liitteessä I. Sähkösuodattimen mitoitettu savukaasuvirran suuruus on 600 m<sup>3</sup>/h ja lämpötila enintään 250 °C. Sähkösuodattimesta poistuvien savukaasujen kiintoainepitoisuus on enintään 50 mg/m<sup>3</sup>n. Sähkösuodattimen jälkeen on letkusuodatin, jolla kiintoainetta erotetaan johdattamalla savukaasu tekstiilistä valmistetun letkun läpi. Letkusuodattimella savukaasujen suurin sallittu lämpötila 200 °C johtuen kiintoaineen erottamiseen käytettävän tekstiilin ominaisuuksista. Letkusuodattimen jälkeisen kiintoainepitoisuuden on arvioitu olevan alle 10 mg/m<sup>3</sup>n. Savukaasulinja on rakennettu niin, että edellä mainittuja savukaasujärjestelmän yksittäisiä osia pystytään kiertämään ohitusten kautta. Tämä voi olla tarpeellista etenkin jos savukaasujen lämpötilat ovat liian suuria sähkö- tai letkusuodattimelle.

## 5.2 Poltinjärjestelmän vaarat ja riskit

Energiatutkimuskeskuksessa poltinjärjestelmälle on tehty vaaranarviointi ulkopuolisen toimijan puolesta. Vaarojen arvioinnissa niiden tunnistamisen lisäksi on arvioitu vaarojen aiheuttamien riskien suuruutta ja merkitystä. Selvityksessä keskityttiin myös vaarojen mahdollisiin seurauksiin ja toimenpiteisiin joilla esiintyneitä vaaroja voidaan vähentää tai poistaa. Vaaranarvioinnissa tunnistettiin useita järjestelmään liittyviä vaaroja joista useimmat

ovat vaikutukseltaan vähäisiä sekä todennäköisyydeltään pieniä. Tunnistetuista vaaroista merkittävimmät liittyvät polttimen toimintaan. Vaaroja hallitaan ja pienennetään esimerkiksi manuaalisten toimintojen sekä automaation kautta.

Pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän käyttöä koskeva vaaranarviointi ei nostanut tutkimuskeskuksen ja pyrolyysiöljyn varastointikontin tilaluokituksia räjähdysvaarallisiksi tiloiksi. Tilojen pysymistä luokkitelemattomana on perusteltu pyrolyysiöljyn ominaisuuksien, pyrolyysiöljyn palamisen- ja syttymisen luokittelun, järjestelmien toimittajien arvioiden sekä olemassa olevien vertailukohteiden perusteella. Selvityksessä huomioitiin myös tutkimuskeskuksen ilmastoinnin olevan toteutettu asianmukaisesti. Jos tutkimuskeskus ja pyrolyysiöljyn varastointikontti olisi todettu räjähdysvaarallisiksi tiloiksi, olisi tilat luokiteltu Ex-tiloiksi. Tämä olisi vaikuttanut huomattavasti laitevalintoihin sekä poltinjärjestelmän osien sijoitteluun tutkimuskeskuksessa johtuen tilaluokituksen tuomista määräyksistä. Mahdollisista räjähdysvaaroista riskit rajoittuvat lähinnä polttimen toimintaan ja biokattilaan.

## 6 POLTINJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖNOTTO

Tätä diplomityötä aloittaessa energiatutkimuskeskuksen pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmä oli keskeneräinen monilta osin. Tutkimuskeskuksessa ei ollut vielä muodostunut käytännön kokemuksia pyrolyysiöljyn poikkeavien ominaisuuksien vaikutuksista ja mahdollisista ongelmista poltinjärjestelmässä. Lisäksi tutkimuskeskuksessa pyrolyysiöljyn polttoon liittyvät järjestelmät olivat niiden toimittaneiden yritysten pilottijärjestelmiä. Alkuperäinen tarkoitus tämän diplomityön kannalta oli kappaleessa 5 esitellyn poltinjärjestelmän käyttövalmiuteen tarvittavien asennusten loppuun saattaminen, järjestelmän käyttöönoton suorittaminen, pyrolyysiöljyn polttokokeiden ajaminen sekä tulosten analysointi. Poltinjärjestelmässä sekä pyrolyysiöljyn käytössä esiintyneiden ongelmien vuoksi poltinjärjestelmän käyttöönotto kuitenkin pitkittyi huomattavasti. Lisäksi varsinaisia pyrolyysiöljyn polttokokeita ei pystytty suorittamaan tämän työn aikana johtuen poltinjärjestelmän suunnitteluvaiheesta tehdyistä ratkaisuista. Tämän seurauksena polttokokeet ja mittausdata jäivät kokonaan pois tästä työstä, ja niiden sijasta tässä työssä on jouduttu keskittymään tutkimuskeskuksen poltinjärjestelmän osalta vain käyttöönottoon.

Tämän työn aikana myös alkuperäiset suunnitelmat tutkimuskeskuksessa käyttöönotettavasta polttimesta muuttuivat, ja käyttöönottoa ryhdyttiin lopulta suorittamaan toisella polttimella. Uuden polttimen ja sen omien ohjeisjärjestelmien kohdalla kyseessä oli Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa yhteistyössä toteutettu yrityksen tuotekehitysprojekti, joka valmistui käyttöönotettavaksi ennen tutkimuskeskuksessa valmiina olleen ja kappaleessa 5 esitellyn poltinjärjestelmän käyttöönottoa. Kyseinen tuotekehitysprojekti oli prioriteetiltaan tärkeämpi kuin tutkimuskeskuksessa valmiina ollut poltin, ja työskentely siirrettiin uuden polttimen käyttöönottamiseksi ja testiajojen suorittamiseksi.

Uuden polttimen taustalla oleva yritys tahtoi pitää tuotekehitysprojektinsa salassa. Yrityssalaisuuksien vuoksi tämän työn sisältö on rajoittunut, eikä tässä työssä esitellä tekstin tai kuvien muodossa tutkimuskeskuksessa käytettyä poltinta, sen ominaispiirteitä, sekä kyseisen polttimen omia ohjeisjärjestelmiä. Kappaleessa 5 esitellystä poltinjärjestelmästä käytettiin tuotekehitysprojektin järjestelmän osina pumppauskoneikkoa, venttiilikoneikkoa sekä palamisilmapuhallinta. Nämä järjestelmän osat integrointiin yhdeksi järjestelmäksi uuden polttimen, uusien ohjeisjärjestelmien ja poltinohjauksen kanssa.

Tätä työtä aloittaessa tutkimuskeskuksessa oli kappaleessa 5 esitellyn poltinjärjestelmän laitteistot paikallaan, mutta järjestelmä oli osittain keskeneräinen asennuksiltaan ja vailla käyttöönoton suorittamista. Ennen kuin kappaleessa 5 esitellyn järjestelmän käyttöönoton olisi pystynyt aloittamaan, olisi järjestelmä vaatinut seuraavien tehtävien suorittamista:

- öljylinjaston laippaliitosten välisten tiivisteiden vaihto grafiittitiivisteiksi
- öljylinjaston tiiviyden testaus
- saattolämmityskaapelin ja termostaatin asentaminen
- öljylinjaston lämpöeristäminen
- öljylinjaston liittäminen öljysäiliöihin sekä impulssiputkien liittäminen öljysäiliöiden pinnankorkeuksien mittaukseen
- Siemens LMV52 -poltinohjaimen alustus
- Fidelix Spider -näyttöyksikön päivittäminen toimintakuntoon
- virtausmittauksille sähkövastusten asentaminen.

Edellä luetellut tehtävät suoritettiin valmiiksi poislukien ohjausjärjestelmän toiminnan vaatimia töitä. Kappaleessa 5 esitellyn poltinjärjestelmän toimintakunnon vaatimat loput tehtävät keskeytettiin, kun tuotekehitysprojektin uuden polttimen ja siihen liittyvien oheisjärjestelmien valmistuminen sekä asentaminen alkoivat olla ajankohtaisesti lähellä.

Kun uusi poltin oli riittävän lähellä valmistumista, toimitettiin tutkimuskeskukseen uuden polttimen ohjauskeskus. Ulkopuolisen yrityksen asentajat tekivät eri toimilaitteiden sähköistuksen, signaalikaapelin asennukset sekä liittivät tutkimuskeskuksessa valmiina olleesta poltinjärjestelmästä käytettävät toimilaitteet osaksi uutta poltinjärjestelmää. Tämän työvaiheen aikana saapuivat myös uuteen polttimeen liittyvät toimilaitteet sekä uusi poltin. Laitteiden sähköistysten ja signaalikaapelin lisäksi uusi poltin toi mukanaan ohjausjärjestelmän asennuksen sekä myös uusia mekaanisia asennuksia, kuten polttimen asentaminen paikoilleen, polttimen tukeminen poltinkoneikkoon sekä putki- ja letkuliitosten kiinnitykset.

Edellä mainittujen töiden jälkeen käyttöönottoa saapui avustamaan ulkopuolinen automaatioasentaja jonka työtehtäviksi kuuluivat:

- yksittäisten toimilaitteiden laitesignaalien sekä toiminnan tarkistaminen

- toimilaitteiden parametrisointi
- poltinjärjestelmän ohjauksen ohjelmointi ja toiminnan varmistaminen
- poltinjärjestelmän ohjauksen kommunikaatio tutkimuskeskuksen pääautomaation kanssa.

Pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmä tahdottiin integroida kommunikoimaan tutkimuskeskuksen pääautomaation kanssa. Ilman järjestelmien integrointia osa polttotapahtuman tiedoista poltinjärjestelmää käytettäessä näkyisi vain poltinjärjestelmän ohjauskeskukselta ja osa tutkimuskeskuksen valvomosta. Valvomosta seurattavia tietoja poltinjärjestelmää käytettäessä ovat esimerkiksi tulipesän paine sekä päästömittaukset. Lisäksi poltinjärjestelmän ohjauskeskukselta hallinta loppuu polttimeen, ja loput polttotapahtumaan liittyvät osat tulee ohjata pääautomaation kautta tutkimuskeskuksen valvomosta. Näitä osia ovat esimerkiksi savukaasujen puhdistusjärjestelmät sekä savukaasupuhallin. Ilman integrointia järjestelmät eivät olisi myöskään tietoisia toistensa hätätiloista. Poltinjärjestelmä ei itsessään sisällä datan keruuta. Tämänkin vuoksi poltinjärjestelmä tuli integroida kommunikoimaan pääautomaation kanssa, jotta polttotapahtumien aikana poltinjärjestelmästä tarvittavan datan tallentamiseksi pystyttäisiin käyttämään pääautomaation omaa historiakantaa. Aluksi järjestelmien integroimisessa ilmaantui ongelmia molempien järjestelmien ollessa master-järjestelmiä niiden sisältämien turvatoimintojen vuoksi. Siten järjestelmät eivät pystyneet toimimaan yhdessä suoralla yhteydellä ilman ongelmien aiheutumista. Ongelma ratkaistiin lisäämällä järjestelmien välille linkkilaite joka siirtää tietoa master-järjestelmien välillä ilman että järjestelmien välinen toiminta häiriintyisi toisen järjestelmän vaikutuksesta.

Käyttöönoton edetessä eri toimilaitteiden toiminnan tarkastamisella, parametrisoinnilla sekä ohjausjärjestelmän ohjelmoinnilla, ilmaantui järjestelmässä useita ongelmia jotka pitkittivät käyttöönottoa. Osa ongelmista olivat aiheutuneita muutamien laitteiden kohdalla mitoitukselta sekä laitevalinnoista. Osa ongelmista oli myös seurausta asennusvirheistä. Esiintyneitä ongelmia olivat esimerkiksi öljylinjassa väärin asennettu painekeytkin sekä uuden polttimen palamisilman säätölaitteiden ylimitoitus ajatellen ilmamäärien säätöaluetta. Tämä palamisilman säätölaitteiden ylimitoitus vaikeutti huomattavasti niiden toimintaa sekä toiminnan ohjelmointia, sillä säätölaitteilla oli vaikeuksia pystyä säätämään ilmavirtoja vaaditulla tarkkuudella. Laiteasennusten valmistuttua, järjestelmässä esiintyneiden ongelmien

ratkettua ja kun mittaukset, venttiilit sekä muut toimilaitteet toimivat järjestelmässä halutulla tavalla, päästiin tutkimuskeskuksessa suorittamaan öljylinjaston käyttöönottoa.

## 6.1 Öljylinjaston käyttöönotto

Ennen kuin pyrolyysiöljyä syötettäisiin polttimelle, oli öljylinjaston käyttöönotolla testattava öljylinjaston yksittäisten toimilaitteiden toiminta käyttötilanteessa. Samalla selvitettiin öljylinjaston toimivuus kokonaisuutena sekä kuinka luotettavasti pyrolyysiöljy virtaa öljysäiliöiltä polttimelle asti. Öljylinjaston käyttöönotossa myös saatiin tietoja mahdollisesti tarvittavista erityisjärjestelyistä joilla pystytään takaamaan öljylinjaston luotettava toiminta. Käyttöönotossa tarkoituksena oli kierrättää pyrolyysiöljyä öljylinjastossa paluukiertolinjan avulla. Kun pyrolyysiöljyn on todettu virtaavan luotettavasti öljylinjastossa sekä kaikkien öljylinjaston toimilaitteiden on todettu toimivan käyttötilanteessa tarkoituksenmukaisesti, siirryttäisiin polttimen käyttöönottoon.

Öljylinjaston käyttöönotto pysähtyi nopeasti ongelmiin öljypumpun sähkökytkennöissä. Sähkökytkentöjen muutosten jälkeen seuraavana ongelmana ilmaantuivat öljypumpun ja palamisilmapuhaltimen huomattavasti alimitoitettut virtasuojat jotka katkaisivat virran heti öljypumpun ja palamisilmapuhaltimen käynnistyksen jälkeen. Pyrolyysiöljyn syöttäminen öljylinjaan päästiin aloittamaan uusien virtasuojien asentamisen jälkeen.

Pyrolyysiöljyn syöttäminen öljylinjastoon aloitettiin imemällä pyrolyysiöljyä sekoittimella varustetusta öljysäiliöstä. Tällöin pyrolyysiöljyn virtauksen reitti oli venttiilikoneikolta ohjattu takaisin pumppauskoneikolle paluukiertolinjan kautta. Pyrolyysiöljyn etenemistä pumppauksen aikana pystyi tarkastelemaan öljylinjaston eri osiin liitettyjen ulostuloyhteiden avulla. Pyrolyysiöljyn kierrättäminen öljylinjastossa kuitenkin epäonnistui ensimmäisellä kerralla öljylinjan tukkeutuessa suhteellisen lyhyessä ajassa. Pyrolyysiöljyn eteneminen luultavasti pysähtyi lopulta venttiilikoneikolla olevaan virtausmittariin, eikä pyrolyysiöljyä virrannut paluukiertolinjalle asti. Öljylinjaston tukkeutumisen on oletettu aiheutuneen pääasiassa öljysäiliön pohjalle kerrostuneesta raskaammasta aineksestä jota on imeytynyt ensin öljylinjastoon. Samalla myös öljysäiliön imulinja oli tukkeutunut.

Pyrolyysiöljyn kierrätystestin aikana pumppauskoneikon esilämmittimet olivat käytössä pyrolyysiöljyn viskositeetin alentamiseksi. Esilämmittimillä pyyntinä pyrolyysiöljyn lämpötilaksi oli säädetty 50 °C. Öljylinjan tukkeutumisen ja virtauksen tyrehtymisen myötä pyrolyysiöljy pääsi ylikuumentumaan esilämmittimissä. Lopulta noin 70–80 °C:ssa laukesivat esilämmittimien lämpöreleet pysäyttäen niiden toiminnan. Esilämmittimien tehoa säädetään pyrolyysiöljyn lämpötilamittauksen perusteella, eikä tällöin pyrolyysiöljyn virtauksen pysähtyessä järjestelmälle ole tullut tietoa pyrolyysiöljyn liiallisesta kuumentumisesta esilämmittimissä. Tehon säädöstä huolimatta pyrolyysiöljyn ylikuumentumisen välttäminen vaatii silti riittävän suuren pyrolyysiöljyn virtauksen esilämmittimien läpi. Tähän syynä on esilämmittimien portaittain toimivan tehonsäätö. Esilämmittimien ollessa päällä, on käytössä vähintään pohjateho joka riittää ylikuumentamaan pyrolyysiöljyn jos virtaus esilämmittimien läpi ei ole riittävän suuri. Tämän vuoksi riittävän suuren pyrolyysiöljyn virtauksen varmistaminen on erityisen tärkeää silloin kun esilämmittimet ovat käytössä. Myöhemmin poltinjärjestelmässä käytettiin vain toista esilämmitintä, sillä molempia käytettäessä esilämmittimillä oli portaittaisen säädön vuoksi vaikeuksia pystyä saavuttamaan tasainen toiminta. Yhden esilämmittimen käytöllä myös pienennettiin vaaraa pyrolyysiöljyn ylikuumentumisesta.

Öljylinjaston käyttöönotto jouduttiin keskeyttämään tukosten avaamiseksi ja öljylinjaston tyhjentämiseksi. Tällöin oli tärkeää ettei öljylinjastosta ajettaisi pyrolyysiöljyä enää takaisin öljysäiliöön. Tukosta yritettiin ensin avata pumpun tuottamalla paineella joka osoittautui riittämättömäksi. Öljylinjastoon saatiin tuotettua pumppua korkeampi paine käyttämällä paineilmaa, ja tällöin tukos saatiin avattua ja öljylinjasto ajettua tyhjäksi. Öljysäiliön imulinjan tukos jouduttiin painamaan takaisin öljysäiliöön. Lopuksi öljylinjasto huuhdeltiin isopropanolin kierrätyksellä. Myöhemmin seuraavalla pyrolyysiöljyn kierrätystestillä öljysäiliöstä imetty pyrolyysiöljy saatiin kiertämään öljylinjastossa, ja öljylinjaston toimilaitteet saatiin testattua.

Öljylinjaston tukoksien avaamiseksi käytetyt korkeat paineet avasivat pumppauskoneikon varoventtiilin, jonka kautta poistui osa pyrolyysiöljystä. Tämän myötä varoventtiilin toiminta vioittui, ja varoventtiili alkoi laskemaan myöhemmin pyrolyysiöljyä ulos järjestelmästä jo varoventtiilin toimintapainetta huomattavasti alhaisemmilla paineilla. Tämä vaikeutti omalta osaltaan jatkossa poltinjärjestelmän käyttöönottoa, sillä varoventtiili päästi pyrolyysiöljyä ulos aina järjestelmää käytettäessä.



Tutkimuskeskuksessa pyrolyysiöljyn käytettävyyden kannalta ongelmalliseksi muodostui öljysäiliöiden pohjalle ajan kuluessa kerrostuva raskaampi aines. Tällä on vaikutus erityisesti tutkimuskeskuksen poltinjärjestelmään, sillä pienen kokoluokan seurauksena käytössä olevat pienet putkikoot tukkeutuvat erityisen helposti. Vaikka öljysäiliössä oli käytössä jatkuvatoiminen sekoitin, ei se kuitenkaan ole riittävä ratkaisu saamaan kaikkea säiliön sisältöä liikkeelle. Tällöin sekoittimesta huolimatta öljysäiliön pohjalle pääsee kerääntymään raskaampaa ainesta. Tutkimuskeskuksen öljysäiliöissä imuyhteet ovat lisäksi aivan öljysäiliöiden alaosassa jolloin öljysäiliön pohjalle kerrostunut raskaampi aines pääsee imeytymään öljylinjastoon. Tämä raskaampi aines voi aiheuttaa öljylinjaston tukkeutumisen lisäksi myös suodattimien ja suuttimen tukkeutumisen.

Öljylinjaston laitetestit ja käyttöönotto tarjosivat osaltaan tutkimuskeskukselle haluttavaa tietoa järjestelmän toimivuudesta, pyrolyysiöljyn käytettävyydestä ja pyrolyysiöljyyn liittyvistä ongelmista etenkin pienen kokoluokan järjestelmässä. Tämä oli myös yksiä pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän takana olevan hankkeen tavoitteista. Öljylinjaston käyttöönoton perusteella saadun uuden tiedon ja monien huomioiden lisäksi järjestelmälle löydettiin käyttöönotosta parannustarpeita toiminnan helpottamiseksi. Tutkimuskeskuksessa pyrolyysiöljyn pumppaaminen sekä virtaus öljylinjastossa osoittautui käytetyllä järjestelmällä vaikeammaksi kuin oli oletettu. Pyrolyysiöljy voi tarvita monimutkaista järjestelmää jotta saadaan varmistettua öljylinjastolla pyrolyysiöljyn pumppauksen toimintavarmuus. Käytetyn poltinjärjestelmän pienen kokoluokan seurauksena oli öljylinjaston pienet putkikoot, ja etenkin tällöin öljylinjasto on tukkeutumisvaarassa jos öljylinjastoon pääsee öljysäiliöön kerrostunutta raskaampaa ainesta tai jos pyrolyysiöljy pääsee ylikuumentumaan esilämmittimissä.

## **6.2 Polttimen käyttöönotto**

Tutkimuskeskuksessa siirryttiin tuotekehitysprojektin polttimen käyttöönottoon kun öljylinjaston osalta järjestelmätestit oli tehty ja öljylinjaston eri toimilaitteiden oli todettu toimivan vaaditulla tavalla. Tämän kappaleen osalta on tärkeää huomioida että käyttöönoton kohteena ollut uusi poltin oli rakenteeltaan ja toiminnaltaan hyvin erilainen kuin kappaleessa 5 esitelty poltin joka oli alun perin käyttöönoton kohteena. Lisäksi tämän kappaleen osalta on

syitä vielä painottaa että uuden polttimen tietoja ja sen myötä myös osa polttimen käyttöönottoon liittyneistä asioista on jätetty tuomatta esille yrityssalaisuuksien johdosta.

Samoin kuin öljylinjaston kohdalla, myös polttimenkin käyttöönotossa osoittautui yllättäviä vaikeuksia. Syyt käyttöönoton vaikeutumiseen ja myös pitkittymiseen johtuivat jälleen osittain poltinjärjestelmästä sekä osittain pyrolyysiöljyn polttoainekäyttöä hankaloittavista ominaisuuksista. Erityisesti polttimen käyttöönoton kannalta ongelmia muodostui pyrolyysiöljyn syttymisessä. Polttimen käynnistyksessä sumutettavan pyrolyysiöljyn sytyttämiseksi käytettiin kaasusytytintä joka oli nimellisteholtaan vain 2 kW. Kaasusytyttimen osalta epäiltiin ettei se välttämättä olisi poltinta käynnistettäessä tarpeeksi tehokas sytyttämään pyrolyysiöljyä. Ennen kuin kaasusytytintä käytettiin pyrolyysiöljyn sytyttämiseen, viritettiin sen teho noin 5–6 kW:iin. Kappaleessa 5 esitelty poltin oli varustettu kipinäsytyttimellä, ja tämän osalta lopulta oletettiin ettei se olisi riittävän tehokas pyrolyysiöljyn sytyttämiseksi.

Polttimen käyttöönotto aloitettiin kierrättämällä pyrolyysiöljyä öljylinjastossa paluukiertolinjan avulla. Näin lämmitettiin kylmää öljylinjastoa ja tavoiteltiin esilämmittimiltä tulevan pyrolyysiöljyn lämpötilan pysymistä mahdollisimman tasaisena koko öljylinjan matkalla. Esilämmitetyn pyrolyysiöljyn lämpötilan tavoitearvoksi asetettiin 45 °C. Pyrolyysiöljyn syöttö polttimelle aloitettiin kun pyrolyysiöljyn lämpötila öljylinjassa todettiin vakaaksi ja järjestelmä oli valmis polttimen käynnistämiseksi. Ensimmäisellä yrityksellä polttimen liekki ei syttynyt, ja käynnistys keskeytyi polttimen suuttimen tukkeutumiseen. Tällöin polttimelle menevä öljylinja suljettiin venttiilikoneikolta pikasulkuventtiilillä ennen puhtaaksipuhalluslinjaa. Suuttimen tukosta yritettiin saada avattua ajamalla paineilmaa puhtaaksipuhalluslinjasta öljylinjaan. Paineilmalla suuttimen tukoksen avaamisen epäonnistuessa jouduttiin suutin lopulta purkamaan polttimesta sen puhdistamiseksi. Suuttimen saattoi tukkia poltinjärjestelmän valmistuksessa sekä asennuksessa öljylinjastoon mahdollisesti jääneet epäpuhtaudet. Mahdollisuutena tukoksen aiheutumiselle voi olla myös pyrolyysiöljyn raskaampi aines joka on voinut olla peräisin öljysäiliön pohjalta tai öljylinjaston käyttöönotossa tapahtuneesta pyrolyysiöljyn ylikuumentumisesta.

Polttimen ensimmäisessä käynnistysyrityksessä ennen suuttimen tukkeutumista huomioitiin että pyrolyysiöljyn virtaus ei riittänyt kattamaan polttimen tavoitetehoa. Ennen seuraavaa polttimen käynnistysyritystä suuttimeen porautettiin hieman suurempi aukko jotta suutin ei tukkeutuisi yhtä herkästi ja pyrolyysiöljyn virtaus suuttimen läpi kasvaisi. Suutinaukon

suurentamisessa kuitenkin huomioitiin että tehtävä muokkaus ei saisi vaikuttaa oleellisesti pyrolyysiöljyn pisaroitumiseen sekä siten haitata polttimen toimintaa ja pyrolyysiöljyn palamista. Tutkimuskeskuksessa uuden suutinaukon koon valintaan käytettiin laskentaa jolla arvioitiin suutinaukkojen eri kokojen vaikutusta pyrolyysiöljyn virtaukseen suuttimen läpi sekä pisarakokoon. Laskenta sisälsi kuitenkin epävarmuustekijöitä. Vaihtelevuus pyrolyysiöljyjen pisaroitumiseen vaikuttavissa ominaisuuksissa on ongelmallista, eikä näiden ominaisuuksien tarkkoja arvoja ollut tiedossa. Lisäksi myös pyrolyysiöljyn esilämmityksen suuruus vaikuttaa sen pisaroitumisen ominaisuuksiin.

Suutinaukon suurentamisen jälkeen polttimen käynnistysyrityksissä pyrolyysiöljy virtasi suuttimen läpi ongelmitta, mutta kaasusytytin ei onnistunut sytyttämään pyrolyysiöljyä. Kaasusytytintä yritettiin suunnata paremmin pyrolyysiöljyn sumuun, mutta polttimen sisäinen rakenne rajoitti kaasusytyttimen sijoittamista. Tällöin kaasusytytintä ei saatu sijoitettua haluttuun kohtaan. Tämän seurauksena polttimen käynnistysyritykset keskeytettiin polttimen purkamiseksi, ja polttimen sisäistä rakennetta muokattiin siten että kaasusytytin pystyttiin sijoittamaan vapaammin. Samalla huomattiin että kaasusytyttimen liekki oli osunut hieman sen sijoittamista rajoittaneeseen rakenteeseen. Tällöin kaasusytyttimen liekki oli estynyt osumasta kokonaan pyrolyysiöljyn sumuun. Polttimen sisäisen rakenteen muokkaamisen jälkeen kaasusytyttimen sijoittaminen oli joustavampaa ja kaasusytyttimen liekin pystyi suuntaamaan paremmin pyrolyysiöljyn sumuun.

Polttimen sisäisen rakenteen muokkaamisen jälkeen poltin koottiin käyttökuntoon sekä kaasusytytin aseteltiin uuteen positioon. Lisäksi pyrolyysiöljyn syttymisen avustamiseksi otettiin käyttöön isopropanolia. Seuraaviin polttimen käynnistysyrityksiin käytettiin polttoaineena seosta jossa oli 50 % pyrolyysiöljyä ja 50 % isopropanolia. Kyseistä seosta käyttämällä kaasusytytin onnistui sytyttämään polttimen liekin. Polttimen testiaika jäi vain muutaman minuutin pituiseksi, mutta testin aikana polttoaineen virtaus oli hyvällä tasolla sekä liekki näytti silmämääräisesti arvioiden hyvältä. Testin osalta on kuitenkin huomioitava isopropanolin suuren osuuden vaikutus poltinjärjestelmään johtuen isopropanolin alhaisemmasta viskositeetista sekä korkeammasta lämpöarvosta. Testin aikana polttoaineen virtaus öljylinjassa oli tavoitetta suurempi. Lisäksi polttimen teho testin aikana oli arvioitu hieman yli kaksinkertaiseksi tavoiteltuun tehoon verrattuna johtuen suuremmasta polttoaineen virtauksesta sekä isopropanolin korkeammasta lämpöarvosta. Isopropanolilla lämpöarvo on lähes jopa kaksinkertainen verrattuna tutkimuskeskuksessa käytettyyn pyrolyysiöljyyn.

Seuraavaksi polttimen käynnistämiseksi siirryttiin käyttämään polttoaineseosta jossa oli 65 % pyrolyysiöljyä ja 35 % isopropanolia. Tällä kertaa tarkoituksena oli vaihtaa käytettävä polttoaine polttimen käynnin aikana öljysäiliöstä imettävään pyrolyysiöljyyn. Polttimen käynnistämiseen käytetyllä polttoaineseoksella polttimen liekki saatiin sytytettyä jonka jälkeen aloitettiin pyrolyysiöljyn syöttö öljysäiliöstä öljylinjaan. Testi jouduttiin kuitenkin keskeyttämään ennen kuin öljysäiliöstä imetty pyrolyysiöljy ehti virrata öljylinjan läpi polttimelle asti. Keskeytys johtui polttimen eräiden ulkoisten rakenteellisten ratkaisujen ylikuumentumisesta. Nämä rakenteelliset ratkaisut oli tehty väliaikaisiksi jotta käyttöönotto päästäisiin suorittamaan ilman viivästyksiä. Polttimeen jouduttiin kuitenkin tekemään muutamia yksinkertaisia muutoksia joilla estettiin edellisen ongelman muodostuminen jatkossa. Tämän jälkeen poltinta yritettiin vielä kerran päästä ajamaan käynnistyksen jälkeen öljysäiliöltä imettävällä pyrolyysiöljyllä. Testi aloitettiin syöttämällä jälleen polttimelle käynnistyksen avustamiseksi polttoaineseosta jossa isopropanolin osuus oli 35 %. Poltin saatiin jälleen käynnistettyä, mutta liekki sammui tuntemattomasta syystä ennen kuin pyrolyysiöljy ehti kulkeutua öljysäiliöltä polttimelle asti. Tämän työn osalta poltintestejä ei enää jatkettu pidemmälle, ja poltinjärjestelmä siirtyi jatkokehitykseen.

Poltinjärjestelmän käyttöönotossa polttimen käynnistys muodostui huomattavan monimutkaiseksi johtuen etenkin paluukiertolinjan etäisyydestä polttimesta. Poltin oli kiinnitetty venttiilikoneikon jälkeen loppuvaan öljylinjaan letkulla, ja venttiilikoneikolta alkavalta paluukiertolinjalta matkaa polttimelle on useampi metri. Siten polttimen käynnistystä aloittaessa, polttoainetta pystyi kierrättämään polttimelle menevällä öljylinjalla tasaisen lämpötilan saavuttamiseksi vain venttiilikoneikolle asti. Tällöin ongelmaksi muodostui venttiilikoneikolta paluukiertolinjan jälkeen polttimelle jatkuva öljylinjan loppuosa jossa ei pystytty kierrättämään polttoainetta. Tällöin tämä kylmä öljylinjan loppuosa viilensi polttimelle virtaavan esilämmitetyn polttoaineen lämpötilaa vaikeuttaen polttimen käynnistystä.

Polttimen käynnistyksessä polttimelle menevä öljylinjan letku irrotettiin polttimesta. Kun öljylinjastossa paluukierron kautta kierrätettävän polttoaineen lämpötila saavutti asetetun tavoitelämpötilan koko öljylinjassa ja poltin oli valmis käynnistettäväksi, valutettiin polttimelta irrotetusta öljylinjan letkusta polttoainetta erilliseen kanisteriin öljylinjan loppuosan lämmittämiseksi. Tämän jälkeen venttiilikoneikolta suljettiin öljylinjan magneettiventtiili ja öljylinjan letku kiinnitettiin takaisin polttimeen. Öljylinjasta suljettu magneettiventtiili avattiin letkun kiinnittämisen jälkeen jolloin polttoaine pääsi virtaamaan polttimelle. Tämän aikana

polttimen käynnistyssekvenssi oli päällä. Myös erilaisten polttoaineseosten sekä kanistereiden kanssa toimiminen hankaloitti polttimen käynnistystä sekä koko poltinjärjestelmän käyttöönottoa.

### 6.3 Poltinjärjestelmän jatkokehitys

Tulevaisuudessa jatkokehityksellä on tavoitteena parantaa poltinjärjestelmän käytettävyyttä niin että poltinjärjestelmällä pystytään saavuttamaan luotettava toiminta sekä polttimen käynnistämiseksi ei tarvitse käyttää apuna isopropanolia. Jatkokehityksen jälkeen tutkimuskeskuksessa palataan poltinjärjestelmän testeihin. Samalla jatkuu ohjausjärjestelmän toiminnan viimeistely. Poltinjärjestelmää päästään optimoimaan lopulta kunnollisten pyrolyysiöljyn polttokokeiden kautta. Tällöin tutkimuskeskuksessa päästään tutkimaan poltinjärjestelmän suorituskykyä, pyrolyysiöljyn palamista sekä syntyvien savukaasujen ominaisuuksia. Nyt tämän työn aikana suoritetuissa poltinjärjestelmän testeissä ei pystytty tekemään poltinjärjestelmälle tarkempia säätöjä ja optimointia koska polttimen käyntiajat jäivät hyvin lyhyiksi sekä käytetyssä polttoaineessa oli pyrolyysiöljyn ohella huomattavan suuria määriä isopropanolia.

Tutkimuskeskuksessa pyrolyysiöljyn käytettävyyden kannalta olisi parempi etteivät öljysäiliöiden imuyhteet sijaitsisi aivan öljysäiliöiden alaosassa. Nyt öljysäiliöiden pohjalle kerrostuva raskaampi aines pääsee helpommin imeytymään öljylinjastoon ja voi aiheuttaa vaikeuksia poltinjärjestelmän käytölle. Etenkin tutkimuskeskuksen poltinjärjestelmän pienten putkikokojen vuoksi öljylinjaston tukkeutumisvaara on suuri. Vaikka käytetyssä öljysäiliössä on ollut jatkuvatoiminen sekoitin, ei tämä ole kuitenkaan ollut riittävä ratkaisu estämään raskaamman aineksen kerrostumista öljysäiliön pohjalle. Pyrolyysiöljyn varastoinnissa on toisaalla toteutettu esimerkiksi sekoituksen ohella myös pyrolyysiöljyn kierrätys pohjaimulla, jossa öljysäiliön pohjalta imetään pyrolyysiöljyä joka palautetaan öljysäiliön pinnalle. Tosin tämä muutos olisi vaikea toteuttaa tutkimuskeskuksen öljysäiliöille.

Öljylinjaston osalta poltinjärjestelmän parannusmahdollisuuksia ovat etenkin paluukiertolinjan etäisyys polttimesta sekä saattolämmityksen loppuminen venttiilikoneikolle. Öljylinjasto oli lämpöeristetty ja öljylinjastoon oli asennettu myös saattolämmityskaapeli ylläpitämään pyrolyysiöljyn lämpötilaa esilämmityksen jälkeen. Saattolämmitys ei kuitenkaan jatku

polttimelle menevällä öljylinjalla venttiilikoneikkoa pidemmälle. Öljylinjalla saattolämmityksen loppumisen jälkeen matkaa polttimelle on vielä useita metrejä. Saattolämmitystä olisi hyvä saada jatkettua polttimelle asti, ja samalla myös paluukiertolinja olisi hyvä kattaa saattolämmityksellä. Saattolämmityksen jatkamista tärkeämpi muutos öljylinjastossa olisi kuitenkin paluukiertolinjan lähdön saaminen mahdollisimman lähelle poltinta. Tällöin ennen polttimen käyttöä voidaan pyrolyysiöljyn kierrätyksellä lämmittää kylmä öljylinjasto kunnes pyrolyysiöljyn lämpötila esilämmittimiltä saattolämmityksen avustuksella pysyy halutulla tasolla polttimelle asti. Siten poltinjärjestelmän käytön alussa öljylinjaston loppuosa ei alentaisi polttimelle virtaavan pyrolyysiöljyn lämpötilaa. Lisäksi kun paluukiertolinja saadaan mahdollisimman lähelle poltinta, pystytään myös öljylinjan loppupää puhdistamaan helpommin liuottimella. Lisäksi öljylinjastoon olisi hyvä olla sisällytettynä useaan kohtaan takaiskulla varustettuja paineilmayhteitä. Tällöin paineilmayhteiden avulla voi yrittää joustavammin avata öljylinjan tukoksia. Paineilmayhteitä tulisi olla ennen pumppua sekä pumpun jälkeen.

Ilman jatkokehitystä ja muutoksia tutkimuskeskuksen pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmään, ei poltinta uskota saatavan käynnistettyä syöttämällä polttimelle pelkkää pyrolyysiöljyä. Polttimen käyttöönotossa suoritetuissa testeissä polttimen käynnistäminen vaati huomattavan suuren isopropanolin osuuden käyttämistä pyrolyysiöljyn kanssa. Tähän syynä voidaan pitää etenkin kaasusytyttimen riittämätöntä kokoluokkaa, joten kaasusytyttimen korvaaminen tehokkaammalla on oleellisin muutostarve poltinjärjestelmässä. Mahdollisuutena pyrolyysiöljyn syttymisen helpottamiseksi on vielä myös pyrolyysiöljyn esilämmityksen lämpötilan kasvattaminen, palamis- ja hajotusilman esilämmittäminen sekä myös polttokammion esilämmittäminen.

#### **6.4 Terveysvaikutukset ja suojavälineet**

Pyrolyysiöljyn tuotanto sekä käyttö altistavat pyrolyysiöljyjen parissa toimivat ihmiset mahdollisille terveysvaaroille. Poltinjärjestelmän käyttöönoton aikana oli tärkeää ottaa huomioon pyrolyysiöljyn käyttöturvallisuus ja käyttää asianmukaisia suojavälineitä. Poltinjärjestelmän käyttöönoton aikana muutamassa tilanteessa pyrolyysiöljyä pääsi öljylinjastosta laiteympäristöön huomattavia määriä. Etenkin tällöin energiatutkimuskeskuksen

sisätiloissa pyrolyysiöljyn haju esiintyi vahvasti. Kyseisissä tilanteissa työskennellessä ilman hengityssuojainta saattoi esiintyä haittavaikutuksia esimerkiksi kurkun ärsyyntymisen sekä päänsäryn muodossa. Roiskeiden kautta pyrolyysiöljyn haju tarttui myös voimakkaasti vaatteisiin, ja iholle kuivuneita roiskeita oli hanakala poistaa myöhemmin. Pyrolyysiöljyn käyttö vaatii asianmukaisia suojavarusteita ja sopivia tiloja, kuten suojavaatetusta, -käsineitä, -laseja sekä hyvin ilmastoitua tilaa. Tutkimuskeskuksessa oli työvaatetuksen lisäksi suojavarusteina käytettävissä kaasunaamareita, Autoflow-maskeja, kumihanskoja, suojalaseja sekä kertakäyttöhaalareita.

Pyrolyysiöljyjen terveysriskejä ei ole selvitetty täysin kattavasti, mutta pyrolyysiöljyt voidaan luokitella lievästi toksiseksi. Toksikologiset tutkimukset ovat osoittaneet että pyrolyysiöljyt voivat aiheuttaa vakavia vaurioita silmille. Pyrolyysiöljyn haitallisuus iholle on alhainen, ja tutkimuksissa pyrolyysiöljyn ei havaittu läpäisevän ehjää ihoa eikä vahingoittavan sisäelimiä. Suurten pitoisuuksien hengittäminen kuitenkin voi aiheuttaa keuhkovaurioita. Lisäksi pyrolyysiöljy on osoittanut mutageenisia ominaisuuksia bakteereilla Ames-testissä. Merkittävimmän akuutin myrkytyksen uhan on osoitettu muodostuvan aldehydeistä, tyydyttymättömistä oksygenaateista sekä furaaneista. Näiden osalta pyrolyysiöljyn toksisuus voi kuitenkin laskea ajan myötä johtuen edellä mainittujen yhdisteiden epästabiiliudesta. (Lu et al. 2009, 1382.)

On syytä huomioida PAH-yhdisteet pyrolyysiöljyissä, sillä monet niistä kasvattavat syöpäriskiä. PAH-yhdisteiden syntyminen biomassan pyrolyysin aikana on vahvasti sidoksissa pyrolyysiprosessin lämpötilaan, ja noin 500 °C:n lämpötiloissa tuotetut pyrolyysiöljyt sisältävät tyypillisesti vain vähäisiä määriä PAH-yhdisteitä. Pyrolyysiöljyjen jalostuksesta katalyyttisellä krakkauksella tai zeoliittikatalyytillä on todisteita PAH-yhdisteiden muodostumisesta suurissa määrissä. (Lu et al. 2009, 1382.)

## 7 YHTEENVETO

Kasihuonekaasupäästöjen seurauksena ilmastonmuutoksesta sekä sen hillitsemisestä on muodostunut yksi suurimmista globaaleista ympäristöongelmien haasteista. Seurauksena ympäristöystävälliset energiantuotantomuodot sekä polttoaineet ovat kasvattaneet tärkeyttään, samalla vähentäen fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääminen on edelleen tehokas keino kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Uusiutuvien energialähteiden joukossa biomassalla on tärkeä rooli. Ympäristöystävällisyyden lisäksi bioenergian käytöllä on muitakin etuja, kuten energiatuotannon monipuolistuminen, paikallisten raaka-ainepotentiaalien parempi hyödyntäminen sekä energiariippuvuuden vähentyminen tuontilähteistä.

Bioenergian käyttö käsittää laajan alueen raaka-aineita sekä muunnosteknologioiden kautta myös laajan käyttökohteiden alueen. Biomassan lämpökemiallisista muunnosprosesseista etenkin nopea pyrolyysi ja sen kautta saatava pyrolyysiöljy ovat kasvattaneet kiinnostavuuttaan. Nopean pyrolyysin avulla biomassasta saadaan tuotettua korkealla saannolla pyrolyysiöljyä jota voidaan käyttää polttoaineena, energiankantajana sekä kemikaalien lähteenä. Pyrolyysiöljyjen on todettu omaavan potentiaalia korvaamaan fossiilisia polttoaineita erilaisissa energiantuotannon sovelluksissa. Suurimmat edut pyrolyysiöljyillä on valmistus uusiutuvista raaka-aineista sekä nestemäinen olomuoto. Polttoainekäytössä pyrolyysiöljyjen hiukkaspäästöt voivat olla suuremmat kuin fossiilisilla polttoöljyillä, mutta CO<sub>2</sub>-neutraalisuuden lisäksi pyrolyysiöljyistä ei muodostu käytännössä SO<sub>x</sub>-päästöjä.

Pyrolyysiöljyjen kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat haitallisesti niiden palamisen ominaisuuksiin sekä vaikeuttavat varastointia ja käsittelyä. Pyrolyysiöljyjen polttoainekäytön kannalta heikkoja ominaisuuksia ovat alhainen lämpöarvo ja pH, korkea viskositeetti ja pintajännitys sekä suuri happi- ja vesipitoisuus. Pyrolyysiöljyt voivat myös sisältää suuren kiintoaine- ja tuhkapitoisuuden. Lisäksi pyrolyysiöljyt ovat kemiallisesti ja termisesti epävakaita. Pyrolyysiöljyt ovat kemialliselta koostumukseltaan sekä fysikaalisilta ominaisuuksiltaan täysin erilaisia verrattuna fossiilisiin polttoöljyihin. Pyrolyysiöljyjen poikkeavien ominaisuuksien seurauksena suurella todennäköisyydellä fossiilille polttoaineille suunnitellut polttojärjestelmät eivät sovi pyrolyysiöljyille ilman muutoksia järjestelmiin. Pyrolyysiöljyjen poikkeavat ominaisuudet asettavat erilaisia vaatimuksia ja vaikeuksia



polttajärjestelmien toteutukselle, ja tämä on luonut tarpeen kehittää teknologioita sekä järjestelmiä pyrolyysiöljyjen tehokkaalle ja luotettavalle hyödyntämiselle polttoainekäytössä.

Savonia-ammattikorkeakoulun energiaturkimuskeskuksessa yksi tutkittava osa-alue on pyrolyysiöljyn polttoainekäyttö. Tutkimuskeskuksen osalta tässä työssä keskityttiin pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmän käyttöönottoon. Alkuperäisenä tarkoituksena oli suorittaa käyttöönotto kappaleessa 5 esitetyle polttimelle. Suunnitelmat käyttöönotettavasta polttimesta kuitenkin muuttuivat kun uusi tuotekehitysprojektin poltin sekä sen oheisjärjestelmät valmistuivat asennettavaksi ja käyttöönotettavaksi. Tarkoituksena oli myös käyttöönottoa suuremmalla painoarvolla syventyä varsinaisiin pyrolyysiöljyn polttokokeisiin sekä analysoida mittausdatan perusteella polttimen toimintaa, pyrolyysiöljyn palamista ja syntyviä savukaasuja. Poltinjärjestelmällä ei kuitenkaan päästy suorittamaan polttokokeita jonka seurauksena kyseinen osa jäi tämän työn ulkopuolelle.

Tutkimuskeskuksen poltinjärjestelmä oli tätä työtä aloittaessa keskeneräinen monilta osa-alueilta, kuten mekaanisilta asennuksilta sekä ohjauksjärjestelmän toiminnan osalta. Käyttöönotettavan polttimen vaihtuminen toi mukanaan myös paljon uusia asennuksia ennen käyttöönoton suorittamista. Poltinjärjestelmän käyttöönotto osoittautui yllättävän vaikeaksi johtuen poltinjärjestelmän käytöstä ilmenneistä monista ongelmista. Tutkimuskeskuksen poltinjärjestelmän pieni kokoluokka toi osaltaan vaikeuksia järjestelmän toiminnalle esimerkiksi pienten putkikokojen suuremman tukkeutumisvaaran seurauksena. Lisäksi kyseiset järjestelmät olivat niiden toimittaneiden yritysten pilottijärjestelmiä. Osa käyttöönotossa ilmenneistä ongelmista johtuivat järjestelmän suunnittelusta, laitevalinnoista, tehdyistä asennuksista, sekä myös pyrolyysiöljyn polttoainekäyttöä hankaloittavista ominaisuuksista.

Käytetyssä poltinjärjestelmässä vaikeuksia aiheutui etenkin öljylinjaston osalta pyrolyysiöljyn virtauksessa putkistossa sekä polttimen osalta pyrolyysiöljyn syttymisestä ja liekin ylläpitämisessä. Poltinjärjestelmän vakaan ja luotettavan toiminnan saavuttamiseksi pyrolyysiöljyn käyttö etenkin pienessä kokoluokassa voi vaatia monimutkaisen järjestelmän. Öljylinjasto on hyvä olla varustettuna puhtaaksipuhalluslinjalla sekä useilla ulostuloyhteillä ja sulkuventtiileillä. Tällöin öljylinjan mahdollisen tukkeutumisen tapahtuessa pystytään joustavammin pyrkiä avaamaan tukosta paineilmalla. Lisäksi öljylinjasto on hyvä rakentaa modulaariseksi jolloin viimeisenä vaihtoehtona voidaan osa öljylinjastosta irrottaa tukoksen avaamiseksi. Pyrolyysiöljyn esilämmityksen osalta on syytä pyrkiä varmistamaan ettei

pyrolyysiöljy pääse ylikuumentumaan, sillä seurauksena voi muodostua kasvavia ongelmia öljylinjassa. Polttimen käynnistys muodostui monimutkaiseksi pyrolyysiöljyn syttymisessä ilmenneiden vaikeuksien kautta. Pyrolyysiöljyn syttymisen avustamiseksi jouduttiin käyttämään erillisiä polttoaineseoksia jotka sisälsivät pyrolyysiöljyn lisäksi suuria määriä isopropanolia. Isopropanolia käytettiin myös öljylinjaston huuhtelemiseksi poltinjärjestelmän testien päätteeksi. Poltinjärjestelmää tulisi kuitenkin saada parannettua niin ettei isopropanolilla tarvitsi avustaa poltinjärjestelmä käynnistystä.

Käyttöönnotossa esiintyneiden vaikeuksien seurauksena polttokokeita ei saatu suoritettua ja poltinjärjestelmä siirrettiin jatkokehitykseen. Tutkimuskeskuksessa tulevaisuuden kannalta on tärkeää saada pyrolyysiöljyn poltinjärjestelmä toiminnaltaan helpokäyttöisemmäksi ja luotettavaksi. Jatkokehityksen kautta poltinjärjestelmään tullaan tekemään käyttöönnotossa ilmenneitä parannustarpeita järjestelmän käytettävyyden parantamiseksi. Yksiä tärkeimpinä muutostarpeita poltinjärjestelmässä on paluukiertolinjan lähdön saaminen mahdollisimman lähelle poltinta sekä polttimen kaasusyöttimen vaihtaminen tehokkaampaan sytyttimeen.

Jatkokehityksessä tehtävien parannusten jälkeen poltinjärjestelmän testit jatkuvat tutkimuskeskuksessa. Vaikka poltinjärjestelmällä ei päästy vielä suorittamaan polttokokeita, saatiin tutkimuskeskuksessa kuitenkin jo järjestelmän käyttöönnoton osalta Savonialle sekä yhteistyössä olevalle yritykselle haluttavaa tietoa pyrolyysiöljyn käyttöön liittyvistä vaikeuksista sekä poltinjärjestelmään liittyvistä vaatimuksista. Samalla käyttöönnotto palveli osittain myös tutkimuskeskuksen poltinjärjestelmän taustalla ollutta hanketta käyttöönnotossa saadun tiedon sekä poltinjärjestelmän edistymisen kannalta. Myöhemmin hankkeen edetessä poltinjärjestelmällä on tarkoitus polttokokeiden kautta tutkia, kehittää ja testata poltinjärjestelmää, pyrolyysiöljyn palamista sekä syntyvien savukaasujen ominaisuuksia ja hallintaa.

## LÄHDELUETTELO

AEBIOM. 2016. Statistical Report 2016. European Bioenergy Outlook. Key Findings. [Verkkodokumentti], viitattu 28.11.2016. Saatavilla: <https://goo.gl/yNqu34>

Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J. & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT Technology 258. ISBN 978-951-38-8418-5.

ASTM International. 2012. ASTM D7544 – 12. Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. [Verkkosivu], viitattu 28.2.2017. Saatavilla: <https://goo.gl/mJFN2f>

Bridgwater A. V., Meier D. & Radlein D. 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*. Vol. 30, No. 12, 1479–1493.

Bridgwater A. V. & Peacocke G. V. C. 2000. Fast Pyrolysis Processes for Biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 4, No. 1, 1–73.

Bridgwater A. V., Toft A. J. & Brammer J. G. 2002. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 6, No. 3, 181–246.

Bridgwater A. V. 2011. *Upgrading Fast Pyrolysis Liquids. Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power*. 157–199. 1. painos. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-72111-7.

Bridgwater A. V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 38, 68–94.

Bridgwater A. V. 2013. Fast pyrolysis of biomass for the production of liquids. *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Woodhead Publishing Series in Energy. No. 40, 130–171. ISBN: 978-0-85709-131-4.

Butler E., Devlin G., Meier D. & McDonnell K. 2011. A review of recent laboratory research and commercial developments in fast pyrolysis and upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 15, No. 8, 4171–4186.

CEN. 2017. EN 16900:2017. Fast pyrolysis bio-oils for industrial boilers - Requirements and test methods. CEN/TC 19 - Gaseous and liquid fuels, lubricants and related products of petroleum, synthetic and biological origin. [Verkkosivu], viitattu 1.10.2017. Saatavilla: <https://goo.gl/aF3BS3>

Czernik S. & Bridgwater A. V. 2004. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy and Fuels*. Vol. 18, No. 2, 590–598.

Di Blasi C. 2008. Modelling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 34, No. 1, 47–90.

Diebold J. P. 2000. A Review of the Chemical and Physical Mechanisms of the Storage Stability of Fast Pyrolysis Bio-Oils. Subcontractor Report. NREL/SR-570-27613. National Renewable Energy Laboratory (NREL).

EEA. 2016. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2014 and inventory report 2016. EEA Report. No. 15/2016. Executive summary. [Verkkodokumentti], viitattu 24.11.2016. Saatavilla: <https://goo.gl/EDCiuo>

Eurostat. 2016. Greenhouse gas emission statistics. Statistics Explained. [Verkkosivu], viitattu 23.11.2016. Saatavilla: <https://goo.gl/uusgXA>

Fortum. 2016. Bioöljy korvaamaan fossiilisia polttoaineita. [Verkkosivu], viitattu 3.1.2017. Saatavilla: <https://goo.gl/pfTzgC>

Green Fuel Nordic. 2013. Kuinka modifioidaan olemassa oleva laitos bioöljylle (RFO) soveltuvaksi. [Verkkodokumentti], viitattu 24.5.2017. Saatavilla: <https://goo.gl/LpjCNe>

Hämäläinen J. 2016. Öljyä puusta. Uuden teknologian avulla huipputuotteeksi. 13.5.2016 Päättäjien metsäakatemian vierailu Joensuussa. [Verkkodokumentti], viitattu 3.1.2017. Saatavilla: <https://goo.gl/4778rE>

IPCC. 2013. Ilmastonmuutos v. 2013: Luonnontieteellinen perusta. Yhteenveto päätöksentekijöille suomeksi. Ensimmäisen työryhmän osuus IPCC:n 5. arviointiraportissa. Ilmatieteen laitos. [Verkkodokumentti], viitattu 15.11.2016. Saatavilla: <https://goo.gl/3xioWQ>

Lehto J., Oasmaa A., Solantausta Y., Kytö M. & Chiaramonti D. 2013. Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils. VTT Technology 87. ISBN 978-951-38-7929-7.

Lehto J., Oasmaa A., Solantausta Y., Kytö M. & Chiaramonti D. 2014. Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. *Applied Energy*. Vol. 116, 178–190.

Lu Q., Yang X. & Zhu X. 2008. Analysis on chemical and physical properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 82, No. 2, 191–198.

Lu Q., Li W. Z. & Zhu X. 2009. Overview of Fuel Properties of Biomass Fast Pyrolysis Oils. *Energy Conversion and Management*. Vol. 50, No. 5, 1376–1383.

Meier D., van de Beld B., Bridgwater A. V., Elliott D. C., Oasmaa A. & Preto F. 2013. State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 20, 619–641.

Mohan D., Pittman C. U. & Steele P. H. 2006. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical review. *Energy & Fuels*. Vol. 20, No. 3, 848–889.

Nevanlinna H. 2008. Muutamme ilmastoja. Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden katsaus ilmastonmuutokseen. Karttakeskus. 237 s. ISBN 978-951-593-191-7.

Oasmaa A. & Czernik S. 1999. Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils-State of the Art for the End-Users. *Energy and Fuels*. Vol. 13, No. 4, 914–921.

Oasmaa A. & Peacocke C. 2001. A guide to physical property characterisation of biomass-derived fast pyrolysis liquids. VTT Publications 450. ISBN 951-38-5878-2.

Oasmaa A., Peacocke C., Gust S., Meier D. & McLellan R. 2005. Norms and Standards for Pyrolysis Liquids. End-User Requirements and Specifications. *Energy & Fuels*. Vol. 19, No. 5, 2155–2163.

Oasmaa A. & Meier D. 2005. Characterisation, analysis, norms & standards. *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook*. Vol. 3, 19–60.

Oasmaa A. & Peacocke C. 2010. Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids. A guide. VTT Publications 731. ISBN 978-951-38-7384-4.

Oksanen, A. 2002. Öljyn palaminen. Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. 750 s. 2. painos. ISBN 951-666-604-3.

Ringer M., Putsche V. & Scahill, J. 2006. Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis. Technical Report. NREL/TP-510-37779. National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Savonia. 2014. Energiatutkimuskeskus. [Verkkodokumentti], viitattu 26.4.2017. Saatavilla: <https://goo.gl/zSo5kR>

Savonia. 2015. Pyreus. Pyrolyysiöljyihin perustuvien energiaratkaisujen kehittäminen ja arvioiminen (Pyreus) -hanke. [Verkkosivu], viitattu 27.4.2017. Saatavilla: <https://goo.gl/SWuAJb>

Savonia. Varkauden energiainstituutin suunnittelumateriaali. Hankintojen yhteydessä valmistajien toimittama materiaali. Savonian sisäinen verkkolevy.

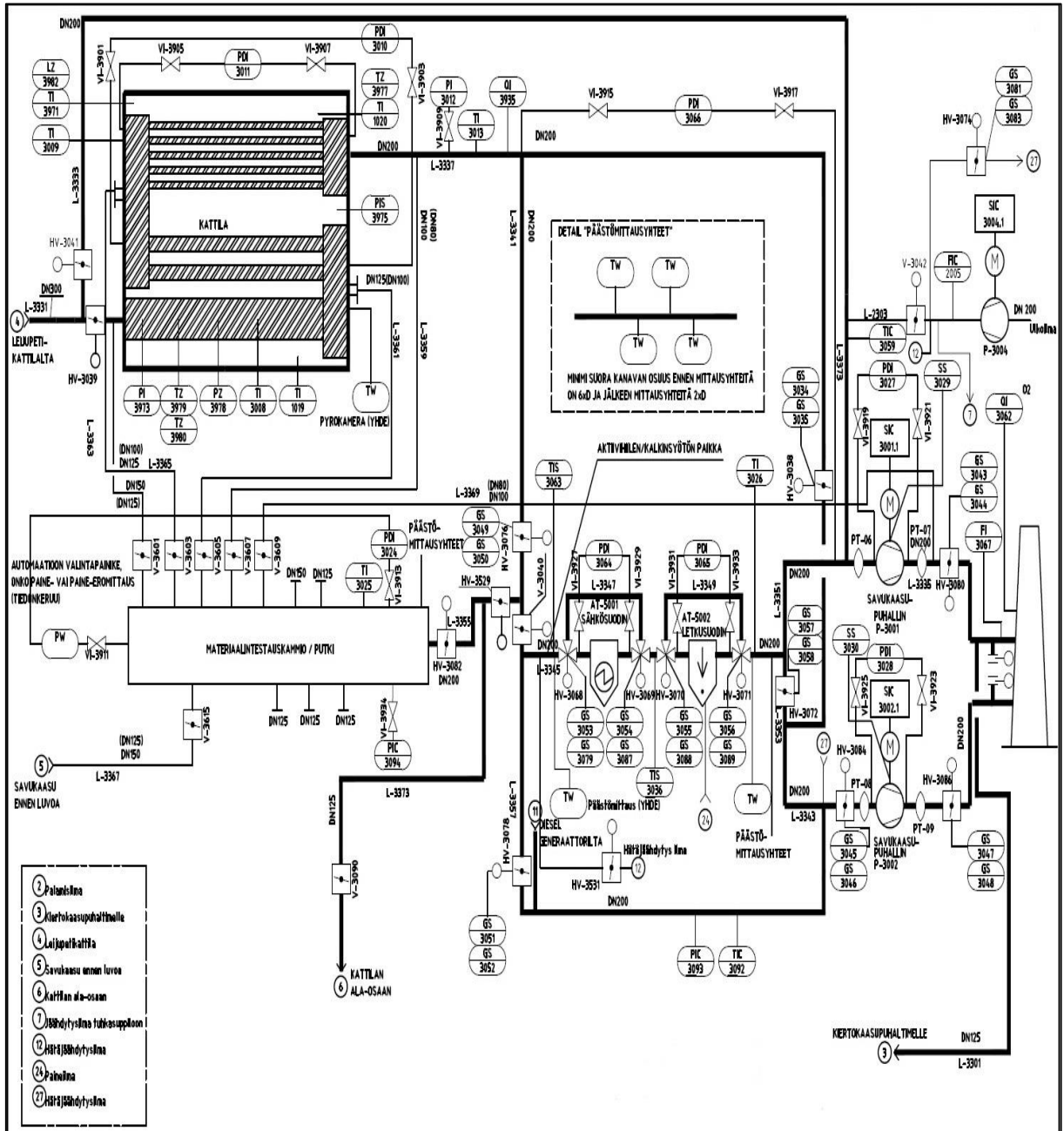
Suopajarvi H. 2013. Biomaterian prosessointitavat: esikäsittelyt, termokemiallinen konversio ja käyttö masuunissa. Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto. Prosessimetallurgian laboratorio. [Verkkodokumentti], viitattu 28.12.2016. Saatavilla: <https://goo.gl/y2fFTi>

Venderbosch R. H. & Prins W. 2010. Fast pyrolysis technology development. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. Vol. 4, No. 2, 178–208.

Venderbosch R. H. & Prins W. 2011. Fast Pyrolysis. Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power. 124–156. 1. painos. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-72111-7.

Ympäristöministeriö. 2016. Pariisin ilmastopöytäkirja. [Verkkosivu], viitattu 19.11.2016. Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/pariisi2015>

Liite I Savukaasujen PI-kaavio



Kuva I. Savukaasujen PI-kaavio (Savonia).