

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Mia Kujala

BIOSAMPO KOULUTUS- JA TUTKIMUSKESKUKSEN HITAAN PYRO-
LYYSIREAKTORIN KOEAJO

Opinnäytetyö 2012

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Teknologiaosaamisen johtaminen

KUJALA, MIA BIOSAMPO KOULUTUS- JA TUTKIMUSKESKUKSEN HITAAN
PYROLYYSIREAKTORIN KOEAJO

Opinnäytetyö 32 sivua + 3 liitettä

Työn ohjaaja yliopettaja Simo Ollila

Työn toimeksiantaja KSAO, Biosampo

Yrityksen valvoja projektivastaava Juha Solio

Lokakuu 2012

Avainsanat biomassa, kuivatislaus, pyrolyysi, pyrolyysiöljy, biohiili

Opinnäytetyöni tavoitteena oli perehtyä puun kuivatislaukseen Kouvolan seudun ammattiopiston Biosammossa. Kuivatislauksesta käytetään myös nimitystä pyrolyysi.

Työn teoreettisessa osassa tutustuin lyhyesti puun rakenteeseen ja kemialliseen koostumukseen ja tarkemmin olen perehtynyt puun hitaaseen kuivatislausprosessiin.

Pyrolyysireaktorilla on tehty koeajoja, joissa osassa olen ollut mukana. Tein laitteelle ajo-ohjeet sekä tarkastelin koeajoissa saatujen jakeiden määriä.

Biomassan kuivatislaus on yksi vaihtoehto, jonka avulla voidaan tehdä polttoaineita uusiutuvista luonnonvaroista. Suomessa on investoitu usean yrityksen toimesta nopean pyrolyysin laitoksiin, joten lähitulevaisuudessa saamme tietää kuinka paljon näillä laitoksilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita.

ABSTRACT

KYMENLAAKSO POLYTECHNIC

Degree Programme in Technology Administration

KUJALA, MIA Test drive of slow pyrolysis reactor in Biosampo

Master's Thesis 32 pages + 3 pages of appendices

Supervisor Simo Ollila, Principal lecturer

Commissioned by Kouvola Region Vocational College, Biosampo

Supervisor by Company Juha Solio, Project manager

November 2012

Keywords biomass, dry distillation, pyrolysis, pyrolysis oil, biocoal

The aim of my final thesis was to orientate myself to slow dry distillation of food in Biosampo education and research center in Kouvola Region Vocational College.

In the theory part of the thesis I was shortly clarifying wood structure and its chemical composition. Main issue and the research part was slow dry distillation, which is also called pyrolysis.

There have been done test trials in part of which I have been attended to. I made instruction how to run dry distillation reactor and analyzed measurements of test trials.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Kouvolan seudun ammattiopiston Biosampo koulutus- ja tutkimuskeskuksessa Anjalassa.

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun yliopettaja Simo Ollila on toiminut opinnäytetyön ohjaajana, ja Biosammon puolesta valvojana on ollut projektivastaava Juha Solio.

Juha Solio on ollut eteenpäin vievänä voimana työssäni. Hän on auttanut ongelmakohtissa, antanut paljon omalla tietotaidollaan ja yrittänyt saada minut perehtymään asiaan syvällisemmin. Pyrolyysireaktoriin minut perehdytti Juhani Hintikka, joka on suunnitellut ja rakennuttanut Biosammon laitteen.

Koeajo-osiossa suurena apuna oli bioenergia alan aikuiskouluttaja Timo Loikala. Hänen avustuksella tein koeajoja ja analysoin tuloksia. Sain lisää mittaus tuloksia työtäni varten, kun bioenergia alan ammattitutkintoa suorittavat aikuisopiskelijat harjoittelivat laitteen käyttöä.

Haluan kiittää kaikkia edellä mainittuja työni loppuun saattamisessa.

Kouvola 1.11.2012

Mia Kujala

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	PUUN KOOSTUMUS	8
	2.1 Puun rakenne	8
	2.2 Puun kuituseinän kemiallinen koostumus	9
	2.2.1 Yleistä	9
	2.2.2 Selluloosa	10
	2.2.3 Hemiselluloosa	10
	2.2.4 Ligniini	11
3	PUUN TERMINEN KÄSITTELY	11
	3.1 Kuivuminen solutasolla	11
	3.2 Puun lämpökäsittely	12
	3.3 Torrefiointi	13
	3.4 Pyrolyysi	15
	3.4.1 Pyrolyysissä tapahtuvia reaktioita	15
	3.4.2 Hidas pyrolyysi	16
	3.4.3 Nopea pyrolyysi	19
	3.4.4 Pyrolyysin hyötyjä	21
4	ANJALAN BIOSAMMON PYROLYYSIPROSESSI	22
	4.1 Yleiskuvaus	22
	4.2 Laitekuvaus	23
	4.2.1 Reaktori	23
	4.2.2 Venttiilit	24
	4.3 Ajo-ohjeet	25
	4.4 Koe-ajot	25
	4.4.1 Tulokset	26
	4.4.2 Koeajojen tulosten tarkastelua	27
	4.4.3 Tulevaisuuden näkymiä Biosammossa	28
5	YHTEENVETO	29

LÄHTEET

LIITTEET	Liite 1	Puussa tapahtuvia muutoksia lämmitysalueella 100 °C- 500 °C
	Liite 2	Kuivatislainen ajo-ohjeet
	Liite 3	Mittaustulos yhdeltä koeajolta

1 JOHDANTO

Anjalassa Kouvolan seudun ammattiopistolla on koulutuskeskus Biosampo. Biosampo on rakennettu Biosampo-hankkeen aikana ja sen tavoitteena on edistää maaseudun kilpailukykyä ja Kaakkois-Suomen ympäristö- ja bioenergia-alan kehittämistavoitteita. Käytännönläheisen koulutuksen toteuttamiseksi keskuksen on rakennettu monipolttotekniikkaan perustuva CHP-laitos. Polttoaineina käytettävät biodiesel, biokaasu ja häkäkaasu valmistetaan alueella itse.

Biosampohanketta jatkoi Biohybridihanke. Tämän hankkeen aikana hankittiin puunkuivatislauslaite keväällä 2011. Kuivatislauksella saadaan puusta uusiutuvia polttoaineita korvaamaan kalliita ja ympäristöä kuormittavia fossiilisia polttoaineita.

Opinnäytetyöni teoreettisen osion tarkoituksena on tutustua lyhyesti puun rakenteeseen ja kemialliseen koostumukseen. Tarkemmin tarkastelen puun kuumennusprosesseja ja mitä puulle tapahtuu kuumennuksen aikana lämpötila-alueella 100–500 °C.

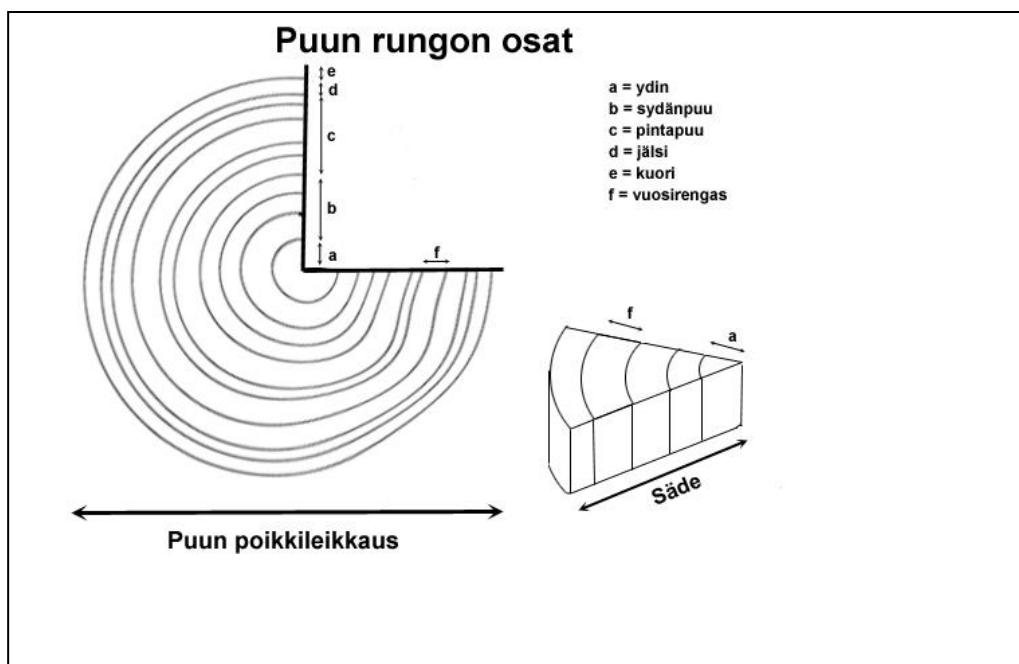
Työosiossa tutustun Biosammon kuivatislauslaitteeseen, teen sillä koeajoja ja niiden perusteella on tarkoitus tehdä ajo-ohjeet. Tarkastelen myös koeajoissa syntyvien jakeiden määriä.

Tutkimuksellani haluan saada vastaukset seuraaviin kysymyksiin: Mitä aineosia puu sisältää? Mitä puulle tapahtuu kemiallisesti, kun sitä kuumennetaan? Mitä on pyrolyysi eli kuiva-tislaus? Mitä jakeita erottuu kuivatislauksessa ja kuinka paljon? Millaisia hyötyarvoja erottuvilla jakeilla on? Miten Anjalan Biosammon laitteisto toimii?

2 PUUN KOOSTUMUS

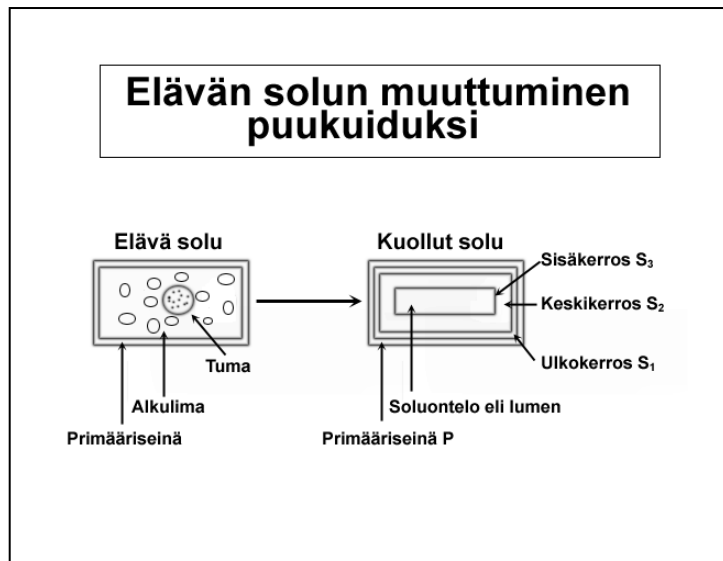
2.1 Puun rakenne

Täysikasvuisen rungon poikkileikkauksesta voidaan erottaa ydin, puuaines, jälsi ja kuori (Kuva 1). Puu koostuu erilaisista tehtäviä suorittavista soluista. Niitä ovat puun tukeminen, nesteiden johtaminen ja ravinnon varastointi.



Kuva 1. Puun poikkileikkaus /1/

Puun solut syntyvät jakautumalla kasvusoluista. Jakautumalla syntynyt tytärsolu alkaa kasvaa ja erilaistua jakautumisen päätyttyä. Elävässä solussa on tuma, alkulimaa ja primääriseinä. Kun puu muuttuu puukuiduksi, häviää alkulimaa ja tuma. Alkulimasta alkaa muodostua primääriseinän sisäpinnalle kerroksia, joista muodostuu sekundääriseinä ($S_1 - S_3$). Lopputuloksena on puutuneen soluseinän ympäröimä puukuitu (Kuva 2). [2, 8-9]



Kuva 2. Elävän solun muuttuminen puukuiduksi [1]

2.2 Puun kuituseinän kemiallinen koostumus

2.2.1 Yleistä

Kuituseinän kerrokset koostuvat selluloosasta (polymeeri), hemiselluloosasta (hiilihydraatti), ligniinistä (aromaattinen yhdiste), uuteaineista ja epäorgaanisista aineista. Vettä puissa on keskimäärin 40–50 %. Taulukon 1 mukaan suomalaisten puiden koostumuksessa ei ole kovinkaan suuria eroavaisuuksia.[1]

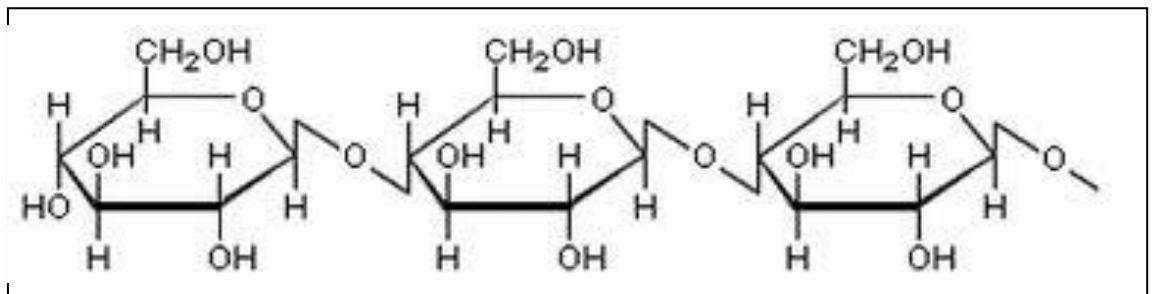
Taulukko 1. Suomalaisten kuitupuulajien kemiallinen koostumus [1]

Suomalaisten kuitupuulajien kemiallinen koostumus				
	Selluloosa	Hemiselluloosa	Ligniini	Uuteaineet
	%	%	%	%
Kuusi	42	28	28	2
Mänty	42	26	27	5
Koivu	40	37	20	3

2.2.2 Selluloosa

Selluloosa (kuva 3) on lineaarinen homopolysakkaridi eli on koostunut pitkistä ketjumaisista molekyyleistä. Se sisältää β -D-glukoosiyksiköitä, jotka ovat liittyneet toisiinsa 1-4-sidoksella. β -D-ketju muodostaa vetysidoksia sekä molekyylin sisällä että viereisten molekyylien kanssa. Ketjussa voi olla 300 -3 000 glukoosiyksikköä. [3, 301–302]

Polysakkaridit sisältävät yli 10 monosakkaridiyksikköä. Monosakkaridit ovat hiilihydraattien perusyksiköitä, jotka koostuvat hiilestä, vedystä ja hapesta. Yhdessä hiiliatomissa on karbonyyliryhmä (CH_2OH) ja muissa OH-ryhmät. Puun selluloosassa on hiiltä n. 50 % orgaanisen hiilen määrästä. [3, 301–302]



Kuva 3. Selluloosan rakenne [4]

2.2.3 Hemiselluloosa

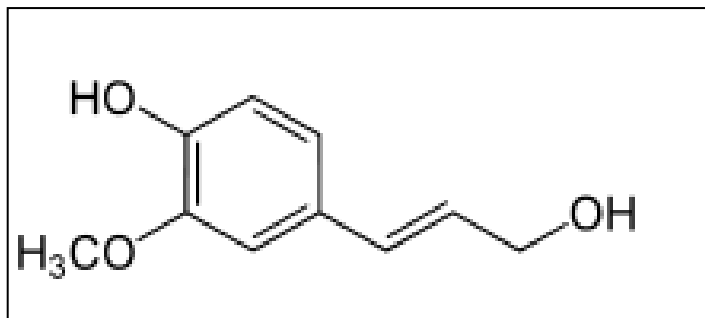
Useimpien hemiselluloosien tehtävä on toimia puulle vararavintona, kun taas selluloosa muodostaa puun rakenteen. [2, 138]

Hemiselluloosat ovat heteropolysakkarideja, joiden rakenneyksiköitä ovat heksoosit, pentoosit, deoksiheksoosit ja uronihapot. Havupuissa pääosin esiintyvä hemiselluloosamuoto on galaktoglukomannaani ja lehtipuissa glukuronisylaani. [5]

Hemiselluloosan hydrolyysituotteina saadaan mannoosia, galaktoosia, glukoosia, ksyloosia ja arabinoosia.[6,5]

2.2.4 Ligniini

Ligniini on rakenteeltaan (Kuva 5) haaroittunut heterogeeninen aromaattinen biopolymeeri, joka muodostaa 20–30 % puun kuivapainosta. Kemialliselta luonteeltaan ligniini on polyfenoli. Ligniinin päätehtävä on sitoa kasvisolut toisiinsa ja lujittaa kuitua. [2, 163]



Kuva 5. Ligniinin rakenne

3 PUUN TERMINEN KÄSITTELY

3.1 Kuivuminen solutasolla

Puu kuivuu tiettyyn kosteuteen itsestäänkin, mutta hitaasti. Puuta voidaan kuivata perinteisesti lautatarhakuivauksella tai kuivaamoissa lämmön avulla. Lautatarhakuivauksessa sahatavaran loppukosteus on 15–25 % ja kuivaamoissa päästään 6-8 % kosteuteen.[7]

Tuoreessa puussa kosteuspitoisuus vaihtelee yleensä 40–60 % välillä. Ensimmäisenä kuivauksessa haihtuu vesi, joka on sitoutunut puun soluonteloihin irtovetenä. Viimeisenä poistuu soluseinämän sidottu vesi.[8,1]

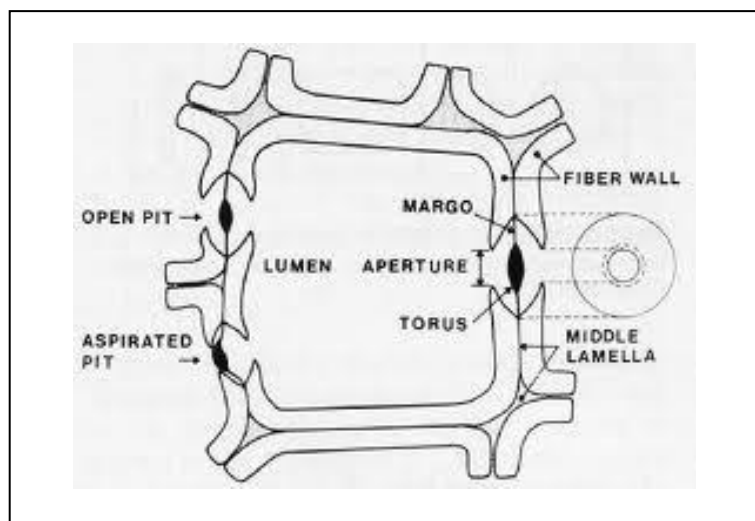
Kuivuessaan puu pyrkii aluksi säilyttämään tasapainokosteutensa. Tällöin vesi siirtyy lähinnä kapillaarisesti puun viileämmistä keskiosista kohti lämpimämpää puun pintaa. Kun puu on saavuttanut kyllästymispisteen (n. 30 % kosteuden), kosteuden siirtyminen tapahtuu diffuusion avulla. Kosteus tiivistyy vuo-

roin soluseinään ja haihtuu soluonteloon ja siitä ulospäin kohti ympäröivää ilmaa. Paine-ero puun pinnan ja sisäosien välillä saa aikaan tämän diffuusioliikkeen. Vesi kulkeutuu puun pinnalta ilmavirran mukana, joten puun kuivuminen riippuu kuivausilman kosteudesta, nopeudesta ja lämpötilasta.[9,4]

3.2 Puun lämpökäsittely

Puun kuivaus muuttaa puun mekaanisia ominaisuuksia, mutta lämpökäsittely kemiallista rakennetta. Puun lämpökäsittely tapahtuu 160–245 °C:ssa. Lämpökäsittelyn aikana suurimmat puuaineksessa tapahtuvat muutokset johtuvat hemiselluloosan hajoamisesta. Selluloosa ja ligniini hajoavat hitaammin verrattuna uuteaineisiin. Puun komponenteista osa hajoaa, mutta samalla syntyy uusia yhdisteitä ja sidoksia. Erottavia yhdisteitä ovat vesi ja hiilidioksidi.[9,6]

Tutkimuksen Seborin et al. (1953)[] mukaan lämpökäsittelyynpuun tilavuuden pieneneminen johtuu soluonteloiden koon pienenemisestä ja aineiden haihtumisesta. Toisen tutkimuksen Fengelin (1996a) mukaan ”kuusenlämpökäsittely aiheuttaa muutoksia keskikerroksessa, rengashuokosten toruksessa (kuva 6) ja kesäpuun S₁-kerroksen siirtymisestä paikaltaan”. Lämpökäsittelyssä kuusen amorfiset aineet pehmenevät, kun ne saostuvat rengashuokosten torukseen. Toruksen saostuneet aineet tulevat liukoiksi etanolibentseeniseokseen lämpötila-alueella 180–200 °C.[10,16]



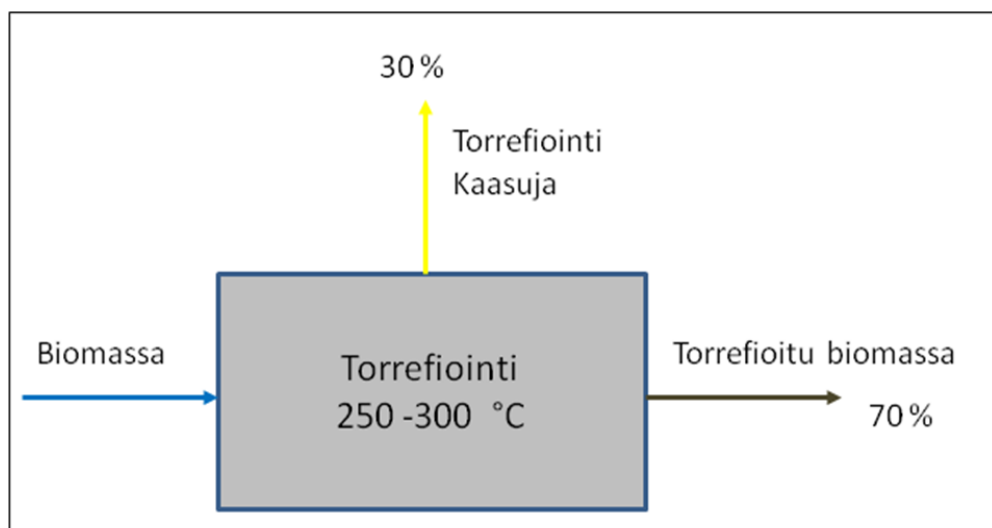
Kuva 6. Rengashuokosen torus

Hemiselluloosa hajoaa 200–260 °C:n lämpötilassa. Sen O-astetyyliryhmien hajotessa syntyy etikkahappoa, mikä edistää katalyytin tavoin selluloosan hajoamista. Puu hajoaa sitä nopeammin, mitä enemmän siinä on O-asetyyliryhmiä. Lehtipuut hajoavat nopeammin, koska niissä on enemmän hemiselluloosaa ja vähemmän ligniiniä. Kuivumisprosessin aikana tapahtuu myös molekyylien välillä verkottumista, joka kovettaa puuta. Selluloosan kiderakenteen muuttuminen synnyttää mikrohalkemia puuhun. Puusta tulee samalla kovaa ja haurasta.[11,8]

3.3 Torrefiointi

Torrefiointi on biomassan käsittelyä 250–300 °C lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. Tuolla lämpötila-alueella siitä haihtuu kondensoituvia ja kondensoitumattomia kaasuja. Raaka-aineen kuivasta massasta jää kiinteään muotoon 70 % ja se sisältää 90 % lähtöaineenlämpöarvosta. Biomassa kuivuu täydellisesti torrefioinnin aikana ja sen jälkeen kosteudenimeytyminen tuotteeseen on hyvin vähäistä.[12,10]

Torrefioinnissa syntyy siis vain kiinteää biomassaa ja haihtuvia kaasuja (kuva 7).



Kuva 7. Torrefiointi kaavio. [13,12]

Kun puuta torrefioidaan saadaan tuoreen puun ja hiilen välimuoto. Näin saadun tuotteen lämpöarvo on korkeampi kuin käsittelemättömällä puuaineksella (taulukko 2). Torrefioinnilla saavutetaan myös paremmin säilyvä puuaines, koska torrefioitu puu hylkii rakenteensa vuoksi vettä eikä siinä kasva esim. sienirihmastoja eikä se houkuttele puulle ominaisia tuhohyönteisiä. Näin ollen tätä tuotetta voidaan säilyttää ulkona kuten kivihiltä. [12,15]

Torrefiointikäsitteilyllä puusta tulee hauraampaa ja helposti jauhautuvaa. Poltettaessa tämä tuote käyttäytyy melko samoin kuin hiili ja sitä voidaan käyttää hiilivoimalaitosten polttoaineena. [12,15]

Taulukko 2 Käsittelemättömän puun, torrefioidun puun sekä pellettien ominaisuuksien vertailua. [13,18]

	Puu (hake)	Torrefioitu puu	Puupelletti
Kosteus	35	3	7
Tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) kostea	10,5	19,9	16,2
Tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) kuiva	17,7	20,4	17,7
Tiheys (kg/m ³)	550	230	650

3.4 Pyrolyysi

3.4.1 Pyrolyysissä tapahtuvia reaktioita

Pyrolyysin voidaan ajatella alkavan, kun puuta kuumennetaan yli 270 asteen. Lämmitystä voidaan jatkaa aina 700 °C asti, kunnes jää jäljelle vain hiiltä. /14,11/

Hemiselluloosa hajoaa lämpötila alueella 200 – 270 °C. Hemiselluloosien O-asetyyliryhmien hajotessa syntyy etikkahappoja. Pitkät polysakkaridiketjut hydrolysoituvat lämmön ja etikkahapon vaikutuksesta pienimmiksi sokeriksi kuten glukooseiksi ja ksylooseiksi. Hemiselluloosan hajoaminen vapauttaa eksotermisesti reaktiolämpöä. Tällä lämpötila-alueella muodostuu etikkahappoa, metanolia, asetonia, fenolisia yhdisteitä sekä terpenoideja. Hajoamistuotteina syntyy myös vettä hapen yhtyessä vetyyn sekä hiilidioksidia että hiilimonoksidia hapen yhtyessä hiileen. /10,10/

Selluloosan hajoaminen alkaa n. 240 °C ja jatkuu aina n. 360 °C asti. Tässä hajoamisessa syntyy myös glukooseja ja ksylooseja. Hemiselluloosan hajoamisessa syntyvä etikkahappo toimii katalyyttinä hajottaen selluloosaketjuja. Mitä enemmän puussa on O-asetyyliryhmiä, sitä herkemmin se hajoaa. /10,10/

Puuaine alkaa hajota lämpötilan kohotessa muodostaen metaania, asetyleeniä, etyleeniä, raskaampia terpenoideja sekä etikkahappoja ja metanolia. Erottuneet hiilivedyt alkavat reagoida keskenään saaden aikaan puuhappoja ja tervoja. /15/

Vaikka ligniinissä tapahtuu muutoksia jo 150 °C, se varsinaisesti hajoaa 280–500 °C lämpötilassa. Ligniinin hajoamisessa syntyy aromaattisia yhdisteitä kuten fenoleja, kreosoleja ja guajakoleja. /10,15/

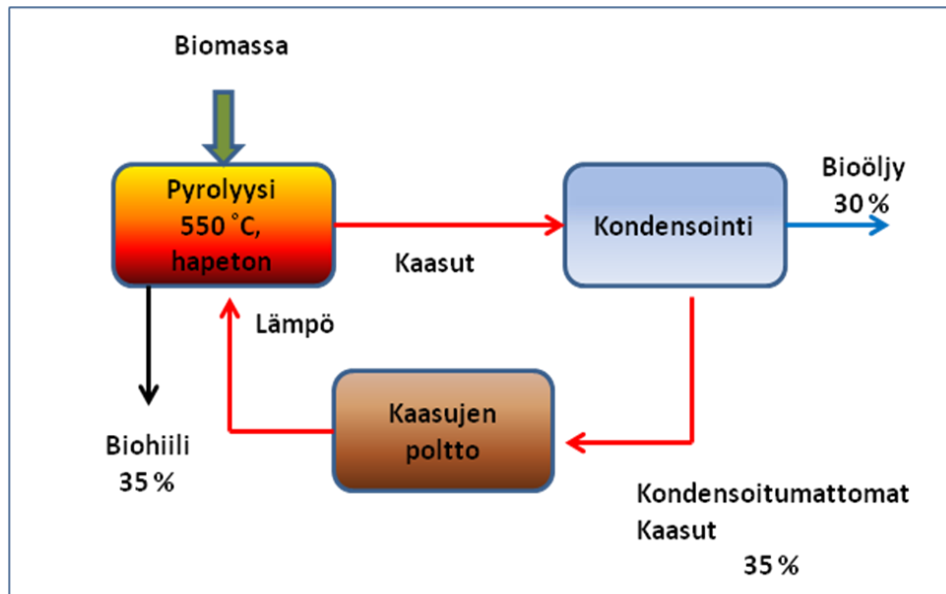
Yhteenvetona voidaan sanoa, että 380 °C lämpötilaan saakka puusta tislautuu pääosin etikkahappoa, metanolia, tervaa ja kaasumaisia yhdisteitä. 400 °C olosuhteissa puuhiilen osuus oli 33- 41%, etikkahapon 3-7 %, metanolin 1,5 - 2,5 %, tervan 11-19 % ja ei-kondensoituvien kaasujen 15-17 %. /10/26/

3.4.2 Hidas pyrolyysi

3.4.2.1 Hitaan pyrolyysin prosessi

Hitaassa pyrolyysissä biomassan lämpötilaa nostetaan hitaasti vähintään 400 °C:een saakka hapettomissa olosuhteissa. Riippuen sekä palakoosta että lämmityksestä, lämpötilan nosto kestää minuuteista muutamiin tunteihin. Lämpötilan nostonopeus on usein 0,01 °C/s – 2 °C/s. Menetelmä ei ole kriittinen palakoon eikä kosteuden suhteen. [16,11]

Puumateriaalin (kuva 8) hitaassa pyrolyysissä saadaan 35 % biohiiltä, 30 % bioöljyä ja 35 % kaasuja. Osa syntyvistä kaasuista on kondensoituvia ja osa kondensoitumattomia. Kaasut sisältävät mm. metaania, vetyä, hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. [16,11]



Kuva 8. Hitaan pyrolyysin prosessikuvaus [17]

Tonnista kuivaa puuta saadaan 600–650 kiloa öljyä. Pyrolyysiöljyn lämpöarvo on suunnilleen puolet mineraaliöljystä, ja samaa kuin puupelleteillä. Ominaisuuksiltaan se vastaa lähinnä raskasta polttoöljyä, mutta sitä voidaan jalostaa korvaamaan kevyttä polttoöljyä. [17]

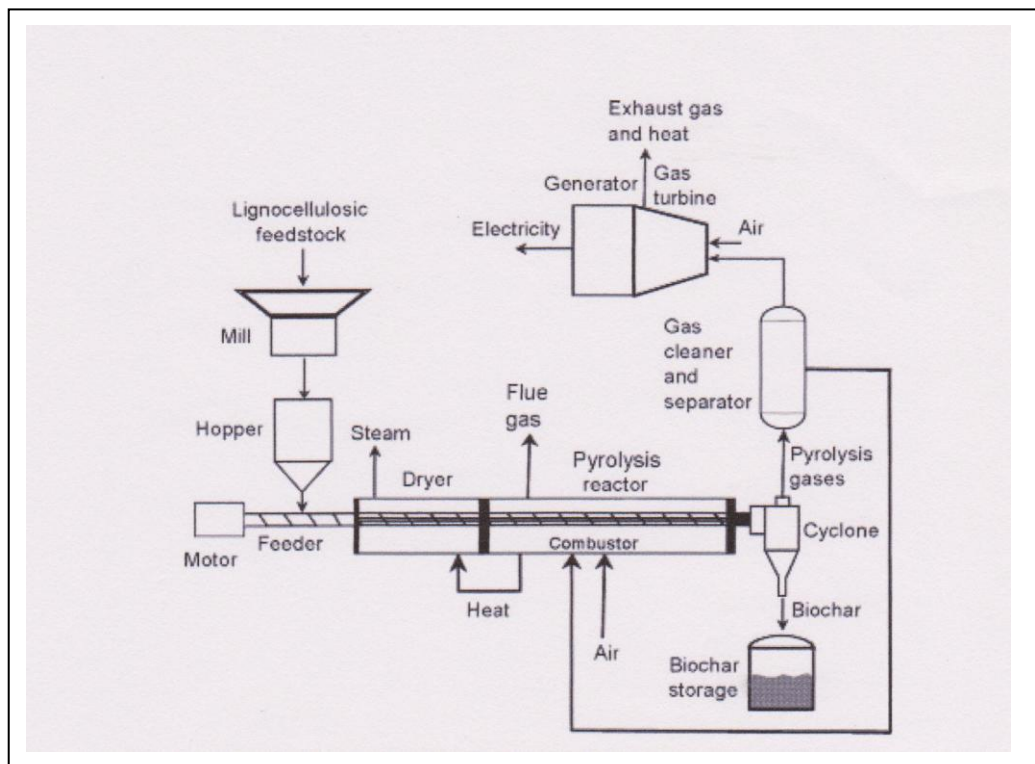
Terva on puun kuivatislauksen nesteistä merkittävin. Se on hapanta, paksua, öljymäistä nestettä. Puukuidun selluloosasta, hemiselluloosasta ja pyrolyysi-reaktiossa syntyneistä hiilihydraateista muodostuu tervaan rengasrakenteisia

yhdisteitä kuten rasvoja ja niiden estereitä sekä parafiinihiilivetyjä. Terva sisältää myös pihkasta peräisin olevia terpeenejä ja hartsihappoja./15/

Hitaassa hapettomassa pyrolyysissä tapahtuu kaikki puun termisen käsittelyn vaiheet: kuivuminen, lämpökäsittely, torrefiointi ja pyrolyysi. Liitteeseen 1 olen pyrkinyt saamaan nämä vaiheet samaan kaavioon ja selvittämään lyhyesti, mitä milläkin lämpötila-alueella tapahtuu. Tiedot olen kerännyt edellisistä kappaleista.

3.4.2.2 Hitaan pyrolyysin laitos

Kuvassa 9 on Kaira-tyyppinen hitaan pyrolyysin laitos. Tässä laitoksessa hienonnettu biomassa kulkee kuivauksen jälkeen ruuvikuljettimella reaktorin läpi jatkuvana virtana. Kiinteä biohiili erotetaan syklonin avulla pyrolyysikaasusta ja höyrynä olevasta bio-öljystä keräilyastiaan. Pyrolyysikaasuista saadaan sähköä, kun ne puhdistuksen jälkeen poltetaan turbiinissa. Osa pyrolyysikaasuista lämmittää epäsuorasti reaktoria, jolloin ulkoista energiaa ei tarvita prosessin käynnistämisen jälkeen. [16,12]



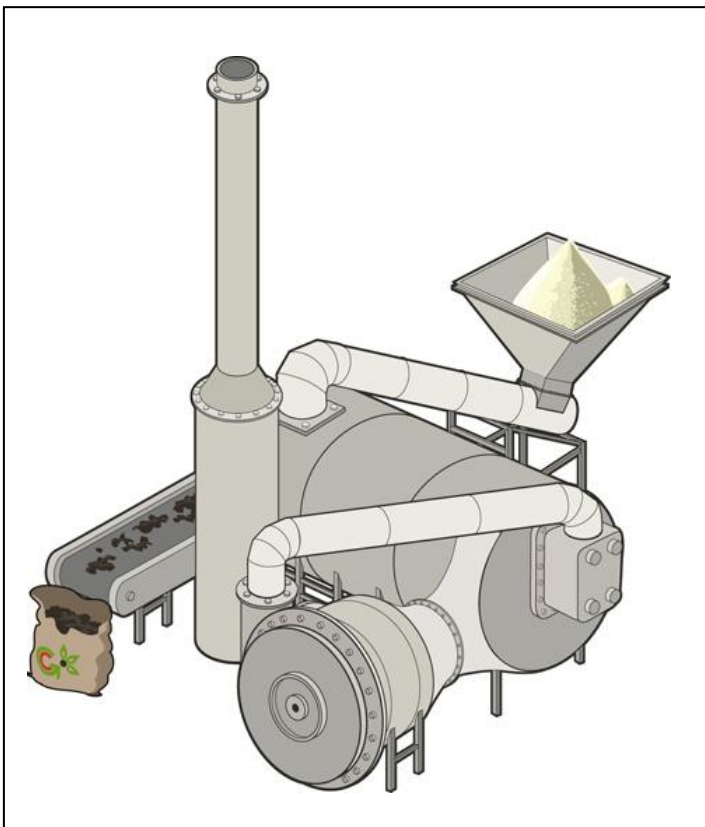
Kuva 9. Hitaan pyrolyysin kaaviokuva [17]

3.4.2.3 Pyro-6F

Pyro-6F (Kuva 10) on jatkuvatoiminen hitaan pyrolyysin laite. Se koostuu putkimaisesta tislausosasta (retortti), jota ympäröi teräksestä ja tiilistä rakennettu ulkokuori. Palokaasut johdetaan ulos polttokammioista ulkokuoren ja retortin välisestä ilmakehän kautta. Tämän jälkeen jäähtyneet palokaasut kulkevat vielä lämmönvaihtimen läpi ennen niiden päästämistä savupiipun kautta ulos. Talteenotettu lämpö sekoitetaan pyrolyysikaasuihin, jonka jälkeen ne johdetaan polttokammioon. Alkulämmityksen jälkeen prosessi on energiaomavarainen, poislukien ruuvikuljettimen sähköntarve. [18]

Tislausosassa biomassaa kuljetetaan ruuvin avulla. Valmis biohiili siirretään eteenpäin hihnakuljettimilla pussitusta varten. [18]

Pyro 6F:lla pystytään käsittelemään erilaisia biomassoja, kuten riisin ja kahvipavun kuoria, puintijäänöksiä, metsätähteitä jne. Palakooltaan syötettävän materiaalin on oltava $< 5 \text{ cm}^2$ ja kosteudeltaan $< 10\text{--}15 \%$. Tällä laitteella voidaan saada 500 kilosta riisin kuoria 200 kg biohiiltä tunnissa. [18]



Kuva 10. Pyro 6F [18]

Senegalissa on käytössä useita ranskalaisen Green Charcoal Internationalin Pyro-6F (kuva 11) hitaan pyrolyysin laitetta. Näillä on tarkoitus tehdä lähinnä briketöityä polttoainetta ruoanvalmistukseen. Laitteen uusimmalla sovelluksella Pyro-7:lla voidaan valmistaa jopa 5 tonnia biohiiltä päivässä. [15]



Kuva 11. Pyro 6F Senegalissa [20]

3.4.3 Nopea pyrolyysi

3.4.3.1 Nopean pyrolyysin prosessi

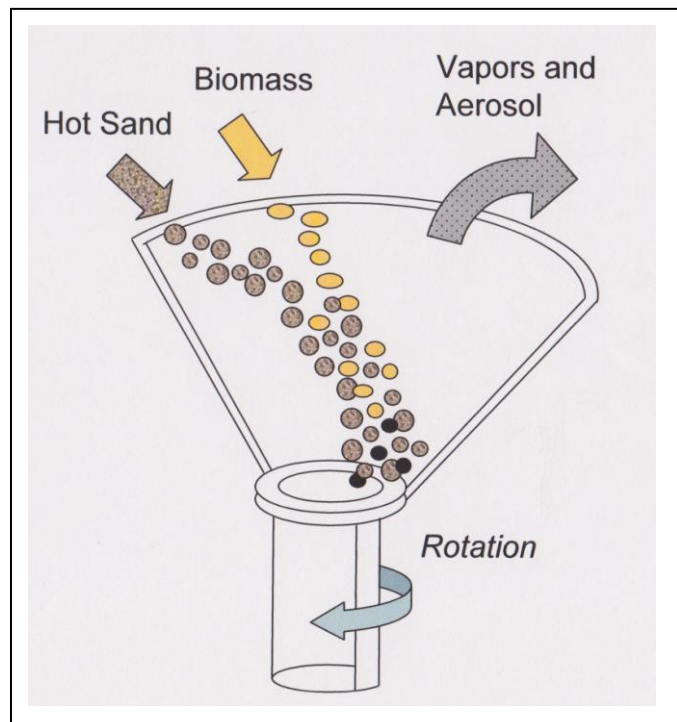
Nopeassa pyrolyysissä hienojakoista (< 3mm) biomassaa kuumennetaan happottomissa olosuhteissa normaalissa ilmanpaineessa 400–500 °C:ssa 0,5 – 2 sekunnin ajan. Biomassa hajoaa kuumennuksen vaikutuksesta muodostaen kaasuja, hiiltä ja nestettä. Syntynyt kaasu jäähdytetään nopeasti, jolloin kaasu tiivistyy nesteeksi. Tätä öljyä nimitetään pyrolyysiöljyksi. Pyrolyysiöljyä saadaan n. 60 – 70 %, hiiltä 12–15 % ja kondensoitumattomia kaasuja 13–25 %.

Nopean pyrolyysin hiilen saanto on huomattavasti alhaisempi ja bioöljyn suurempi kuin hitaassa pyrolyysissä. [21]

Nopean pyrolyysi prosessin haittoina voidaan pitää korkeaa happi ja vesi sekä matalaa hiili pitoisuutta öljyssä. Tämä tekee siitä huonomman verrattuna raakaöljyyn. Myös faasien erottuminen, molekyylien polymerisoituminen ja korrosio haittaavat pyrolyysiöljyjen säilytystä. [21]

3.4.3.2 Nopean pyrolyysin menetelmiä

Erilaisia nopean pyrolyysin laitteita on olemassa useita. Niitä on mm. leijukeros, kiertoleiju, siirtopeti, pyörre- ja pyöriväläpa (ablaatio), pyöriväkartio (kuva 12) ja tyhjä menetelmiin perustuvia reaktoreita. [21]

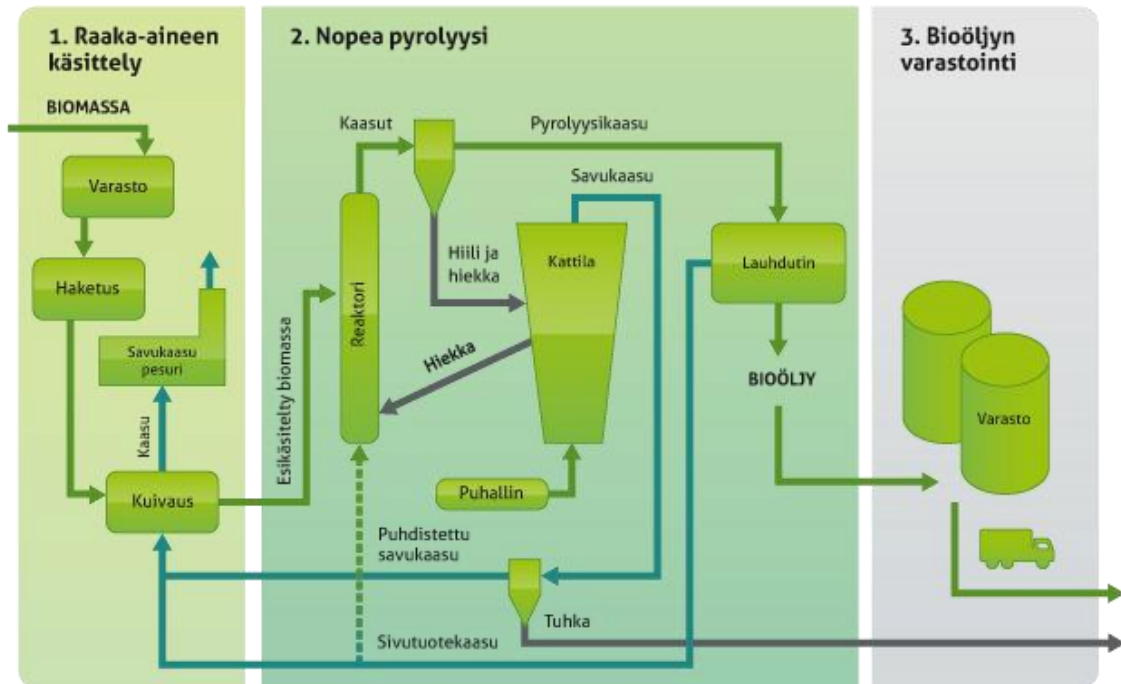


Kuva 12. Nopean pyrolyysin pyörivän kartion periaate

Kuvan 13 jalostamossa biomassa syötetään reaktoriin, missä se kaasuuntuu kuumen kiertävän hiekan vaikutuksesta. Palamista ei tapahdu, koska prosessi on lähes hapeton. Syntyneestä kaasuvirrasta erotetaan syklonilla petimateriaali ja hiiltojäännös. Kondensaattorissa kaasu jäähtyy, lauhtuu ja tiivistyy bio-

öljyksi. Viimeinen prosessivaihe on öljyn suodatus. Laadunvarmentamisen jälkeen bioöljy johdetaan varastosäiliöön. [22]

Hiiltojäännös eli biohiili palautetaan reaktorin kattilaan, missä se tuottaa lämpöenergiaa. Lauhdutuksessa sivutuotteena syntyvä tuotekaasu käytetään biomassan kuivauksessa. [22]



Kuva 13. Nopean pyrolyysin prosessikaavio [22]

3.4.4 Pyrolyysin hyötyjä

Biomassan kuivattelu eli pyrolyysi on yksi vaihtoehto, minkä avulla voidaan tehdä hiilineutraalia polttoaineita uusiutuvista luonnonvaroista. Tässä prosessissa syntyvillä polttoaineilla voidaan korvata kalliita ja ympäristöä kuormittavia fossiilisia polttoaineita. Näiden polttoaineiden valmistaminen parantaa kotimaisuusastetta ja voi jopa lisätä työllisyyttä. [23, 111/

Kuivattamalla biomassaa syntyy puuhiiltä, puuöljyä sekä kondensoitumattomia kaasuja. Pyrolyysi prosessin puuhiilestä voidaan valmistaa polttoainetta korvaamaan kivihiiltä ja kondensoimattomia kaasuja voidaan polttaa turbiineissa tuottaen sähköä. Biohiili sopii polttoaineeksi myös kivihiiltä käyttäviin voimalaitoksiin eikä sen käyttö vaadi teknisiä muutoksia kattilalaitoksille. [24,8/

Puuöljyä voidaan käyttää kuten raakaöljyä. Lämpöarvo tällaisella tuotteella on sama kuin puulla. VTT:n erikoistutkija Yrjö Solantaustan mukaan puu- eli pyrolyysiöljy on tuotantokustannuksiltaan halvinta nestemäistä biopolttoainetta. /25/

Puussa on tuhansia yhdisteitä, joista tarkalleen tunnetaan vain osa. Sama pätee puuöljyyn. Tutkimusta tällä saralla on tehty vähän ja siihen pitäisi paneutua paljon enemmän. On jo tiedossa, että yksi pihkan hartsihappoista tappaa yhtä hyvin bakteereja kuin antibiootit. Puuöljyllä on tulevaisuutta lääke-, petro-, kemian ja muoviteollisuudessa. /26,4/

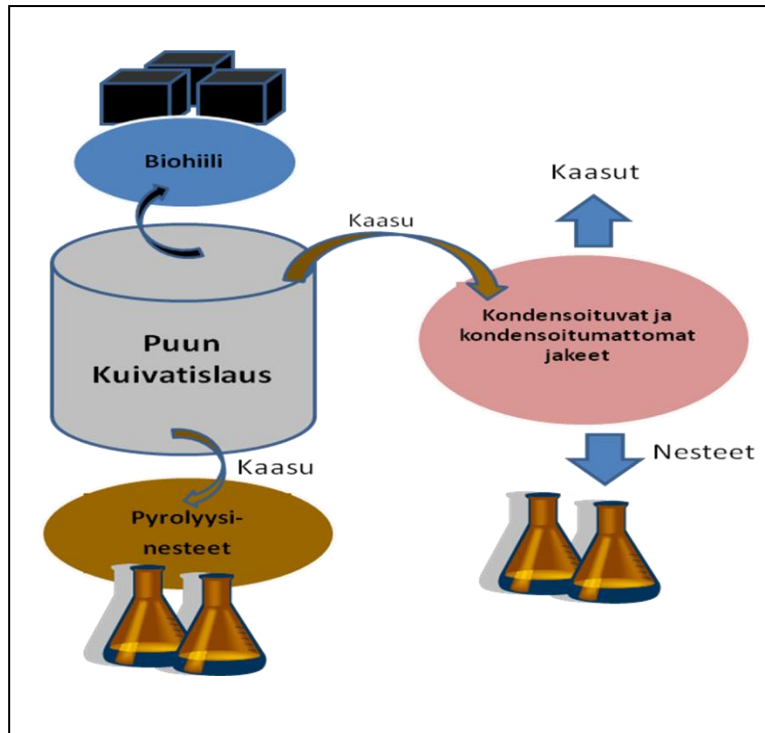
4 ANJALAN BIOSAMMON PYROLYYSIPROSESSI

4.1 Yleiskuvaus

Biosammon Biohybridihankkeen saamaa hitaan pyrolyysin kuivatislaamaa käytetään tutkimukseen ja koulutukseen. Puuta kuumennetaan eri vaiheittain jopa 400 °C:een. Eri vaiheiden nesteet kerätään talteen, syntynyt biohiili punnitaan mutta kondensoitumattomia kaasuja ei kerätä. Kuvassa 14 on esitetty Biosammon kuivatislauksessa syntyvät jakeet.

Biosammossa puunkuivatislauksessa pyritään selvittämään puun termisen käsittelyn muutoksia ja vaikutuksia. Termisellä käsittelyllä tutkitaan puun säilytykseen liittyviä vaikutuksia. Pyrolyysitekniikalla erottuvista kondensoituvista nesteistä etsitään käyttökelpoisia kemian raaka-aineita.

Biosammon laitteella ajetaan koeajoja erilaisilla materiaaleilla ja lämpötiloilla. Bioenergian alan opiskelijat koulutetaan ajamaan laitetta ja ymmärtämään hitaan pyrolyysin prosessin. Tutkimuksissa ovat mukana mm. Helsingin ja Itä-Suomen yliopistot. Helsingin yliopistossa tutkitaan puuhiilelle vaihtoehtoja eri prosessi/lämmöntuotanto teollisuuksille uusiutuvana raaka-aineena. Itä-Suomen yliopisto tutkii sekä bioöljyn että biohiilen ominaisuuksia.



Kuva 14. Biosammon hitaan pyrolyysin kuvaus

4.2 Laittekuvaus

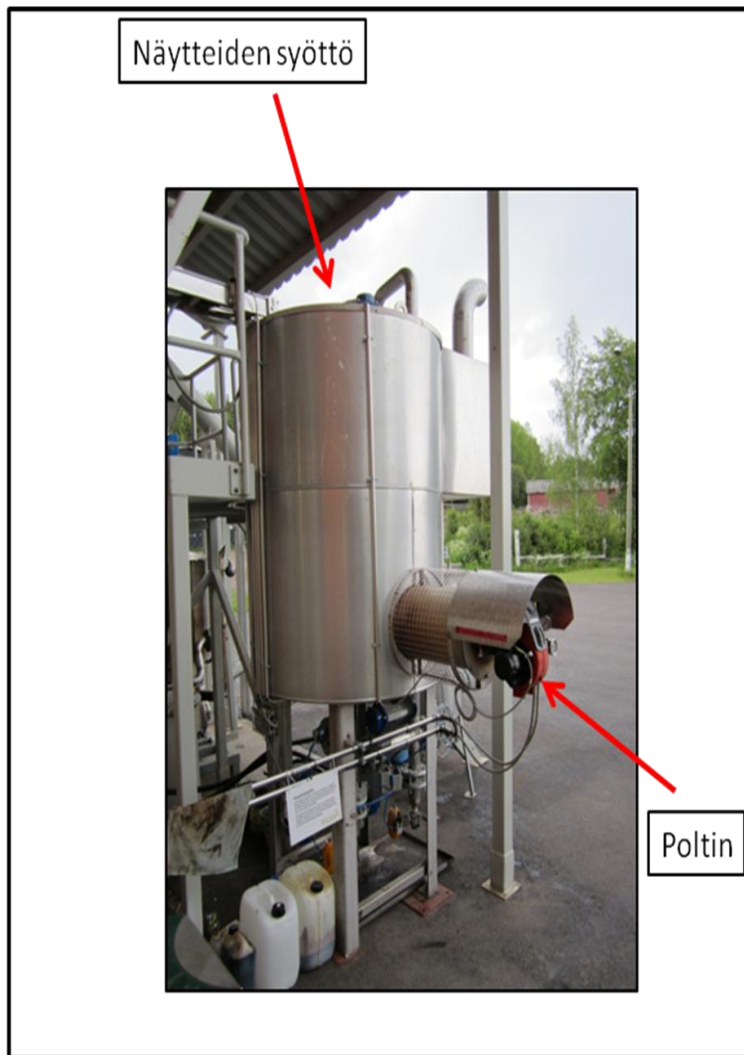
4.2.1 Reaktori

Laitteistoon kuuluu reaktori (Kuva 15), jota kuumennetaan Oilonin KP-6 42-120 kW polttimella. Polttimen polttoaineena käytetään Biosammossa rypsiöljystä tai käytetyistä paistorasvoista vaihtoesteröintimenetelmällä valmistettua biodieseliä tai tavallista polttoöljyä.

Reaktorin sisä-osa on vuorattu keraamisella materiaalilla ja ulkovaippa ruostumattomalla teräksellä. Näytteet ladataan laitteiston yläosasta metallikehikossa reaktorin sisälle hyvin lukitun kaasutiiviin kannen alle. Reaktorin sisällä kaasujen virtausta ja suuntaa voidaan muuttaa ja säätää.

Lämpötilaa mitataan kolmella K-tyyppin lämpöpari anturilla. Anturi, joka on asennettu reaktiotilaan, säätää poltinta kunnes asetusarvo on saavutettu. Toinen mittaa lämpötilaa katalyyttitilan alapuolelta ja kolmas pakokaasuista.

Kuivatislainen ohjaus suoritetaan Scheider Electricin automaatiojärjestelmällä.

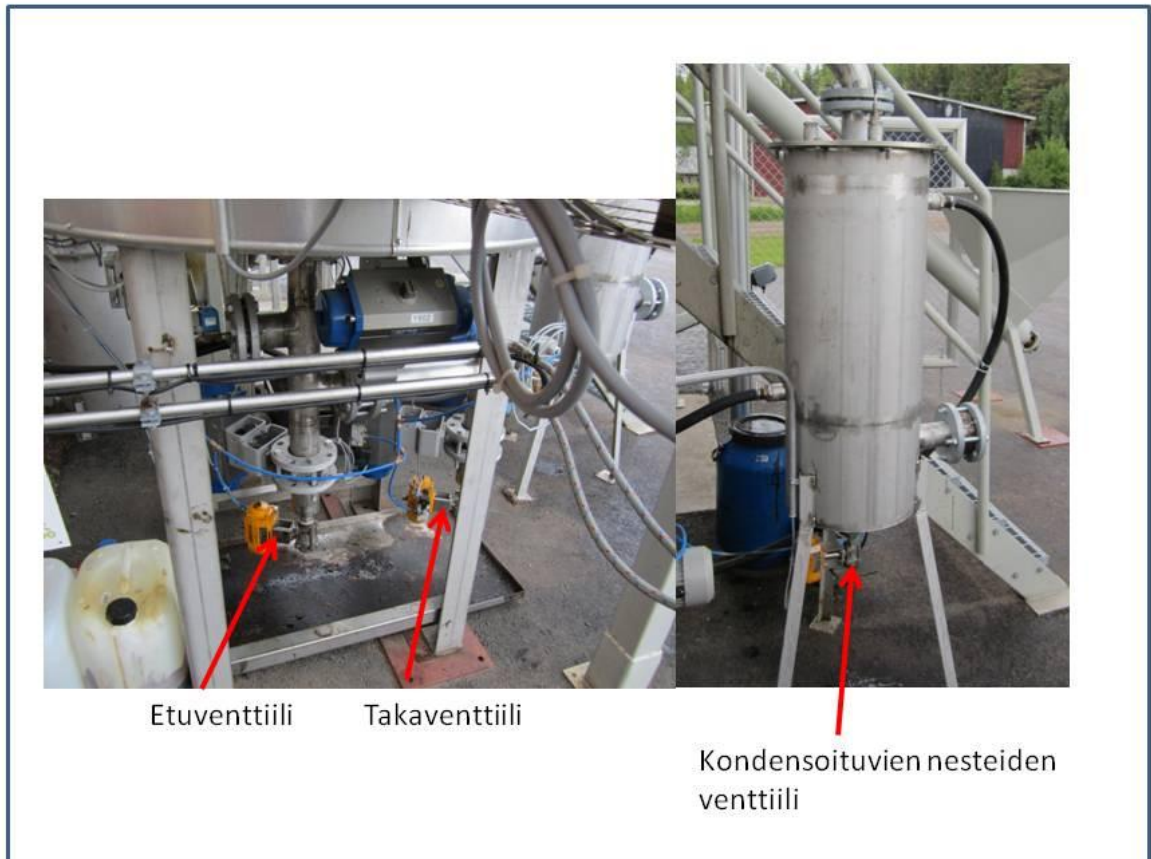


Kuva 15. Reaktori

4.2.2 Venttiilit

Etu- ja takaventtiilit ovat palloventtiilejä, joilla on aikaohjaus. Kondensoituvat ja kondensoimattomat kaasut johdetaan lauhduttimen kautta paineohjatulle venttiilille.

Kun laitteistoa kuumennetaan, alkaa puusta höyrystyä ainesosia. Nämä höyrystyneet kaasumaiset aineet johdetaan laitteen ala- ja yläosasta putkistoihin, missä ne lauhtuvat nesteeksi. Nämä näytteet kerätään talteen etu- ja takaventtiileiltä (kuva 16). Lauhduttimen jälkeen saadaan vielä osa kaasuista nestemäiseen muotoon. (kuva 16)



Kuva 16. Näyteventtiilit

4.3 Ajo-ohjeet

Laitteen ajo-ohjeet (Liite 2) tein yhdessä Timo Loikalan kanssa samalla kuin teimme koeajoja sekapuulla.

4.4 Koe-ajot

Ensimmäinen koeajo tehtiin lämpötila-alueilla 110 °C (60 min), 210 °C (60 min), 290 °C (90 min) ja 330.°C (90 min). Materiaalina käytettiin 20 kg lautaa, jonka palakoko oli 5-20 cm.

Toinen koeajo oli ajoiltaan samanlainen, mutta lämpötilat olivat 110 °C, 230 °C, 270 °C ja 310.°C.

Seuraavien kahdeksan koeajojen lämpötilat pidettiin 110 °C, 220 °C, 260 °C ja 300 °C ja kaikkien steppien ajoajat olivat 60 minuuttia.

Kaikilta kolmelta venttiililtä kerättiin nesteet talteen jokaisen stepin jälkeen. Nesteiden määrät punnittiin ja niistä laskettiin prosenttiosuudet venttiilitäin sekä stepeittäin. Hiiltyneen puun määrä punnittiin, josta laskettiin prosenttiosuus verrattuna alkuperäisen puun materiaalin massaan. Näin saatiin määritettyä puuntislauksessa syntyneiden ainesosien määrät.

4.4.1 Tulokset

Jokaisesta koeajosta on lähtötietoihin laitettu materiaali, massa, palakoko, steppien kesto ja lämpötilat. Mittauspöytäkirjoihin (liite 3) on merkitty jokaisesta stepistä tulleet nestemäärät, nestemäärät venttiileittäin ja biohiilen määrä.

Mittauksista on laskettu prosenttiosuudet biohiilelle, bioöljylle ja kondensoitumattomille kaasuille puun lähtöpainon suhteen. Tuloksista on laskettu syntyville jakeille keskiarvo, keskihajonta, moodi ja mediaani. (taulukko 3)

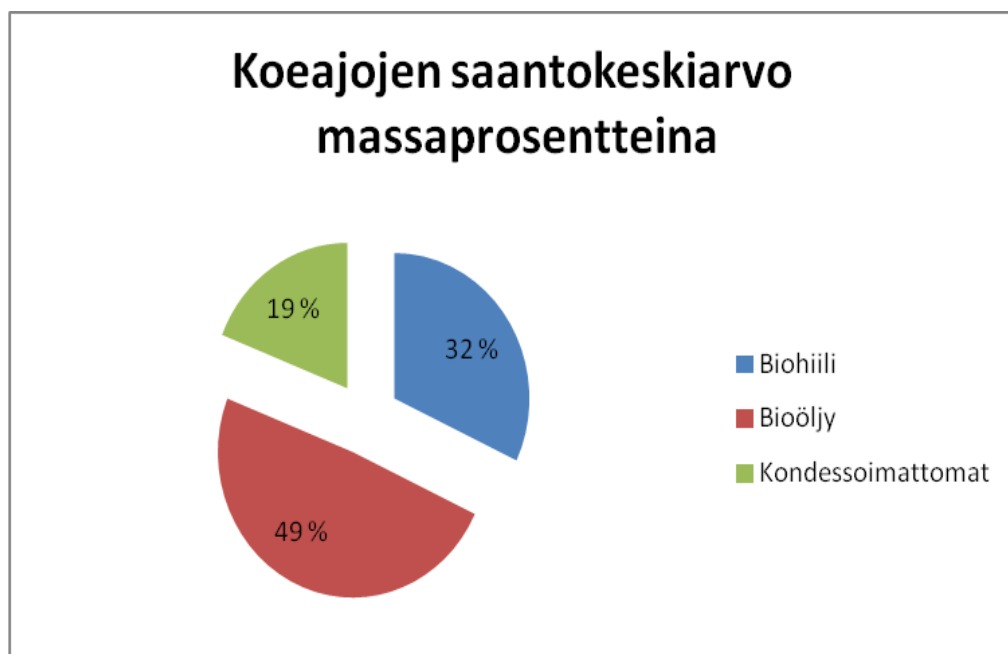
Taulukko 3. Yhteenveto kaikkien koeajojen prosenttiosuudet puun lähtöpainon suhteen

	Biohiili, %	Bioöljy, %	Kondensoimattomat kaasut, %
1.koeajo	30	45	25
2.koeajo	32	54	14
3.koeajo	33	49	18
4.koeajo	33	47	20
5.koeajo	32	54	13
6.koeajo	33	46	21
7.koeajo	33	48	19
8.koeajo	32	50	17
9.koeajo	34	46	20
10.koeajo	33	45	21
ka	33	48	19
keskihajonta	1,1	3,4	3,5
moodi	33	45	20
mediaani	33	47	20

4.4.2 Koeajojen tulosten tarkastelua

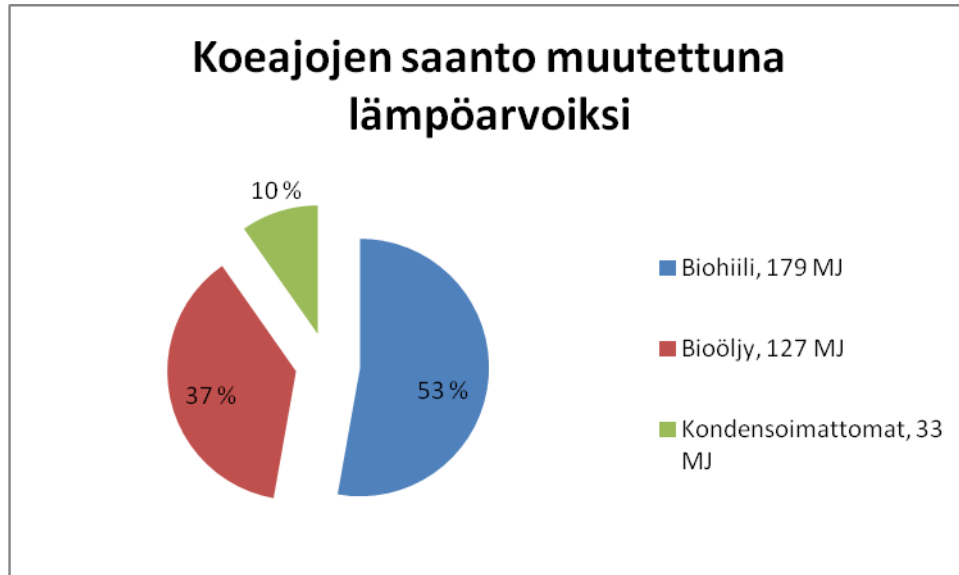
Mittaustuloksista on laskettu keskiarvot. Niiden luotettavuuden arviointia varten on selvitetty myös keskihajonta, moodi ja mediaani. (taulukko 3) Keskihajonnat ovat näille kymmenelle mittaukselle hyvin pienet sekä moodit että mediaanit vastaavat lähes keskiarvoa. Tämän kevyen tulosten tarkastelun perusteella voin sanoa tuloksiamme luotettaviksi ja että tämän laitteen ajojen toistettavuus on hyvä.

Koeajojen mittaustulosten perusteella voin todeta, että Biosammon kuivatislauksessa syntyy 33 % biohiiltä, 48 % bioöljyä ja 19 % kondensoitumattomia kaasuja (kuva 17). Lähdetietoihin (kuva 8) verrattuna saamamme biohiilen määrä on hieman pienempi, bioöljyn 18 % suurempi ja siitä johtuen kondensoitumattomien kaasujen osuus 16 % pienempi. Perusteluna tähän pitäisin Biosammon laitteistoissa olevaa lauhdutinta, joka saa muutettua kaasumaisista jakeista tehokkaammin nestemäisiä.



Kuva 17. Koeajojen saantokeskiarvo massaprosentteina

Muutin vielä syntyvien jakeiden määrät lämpöarvoiksi ja piirsin siitä kuvaajan (kuva 18). Lähtöoletuksen otin puulle lämpöarvoksi 17 MJ/kg, biohiillelle 28 MJ/kg, bioöljylle 13 MJ/kg ja kondensoitumattomille jäi laskennallinen arvo.



Kuva 18. Koeajojen saanto lämpöarvoina

Lämpöarvoiksi muutettuna tulos hieman muuttui. Biohiilen osuus kasvoi 21 % ja bioöljyn (12 %) sekä kondensoimattomien määrät (9 %) laskivat. Tämän perusteella voisin todeta, että biohiilen valmistus olisi tämän laitteen päätarkoitus. Sivutuotteena tulisi selvittää bioöljyn sisältävien ainesosien määrää ja käyttötarkoitusta. Kondensoitumattomia kaasuja voisi käyttää hyödyksi reaktorin polttoaineena.

4.4.3 Tulevaisuuden näkymiä Biosammossa

Nyt kun pyrolyysilaitte toimii toivotulla tavalla, on Biosammossa aloitettu yhteistyö muutaman yrityksen kanssa. He haluavat selvittää biohiilen soveltuvuutta heidän kivihiihikattiloihin.

Koeajot Helsingin ja Itä-Suomen yliopistojen kanssa jatkuvat. Kun he saavat esitutkimuksensa valmiiksi, tehdään niiden pohjalta uusia koeajoja.

Biosammossa on menossa Frees-hanke (Finnish Renewable Energy Export School), joka tähtää kyseisen toiminnan viemistä ulkomaisiin kohteisiin. Yksi kohdemaa on Filippiinit, mistä on juuri tullut kookospähkinän kuoria ja bambua. Tarkoitus on selvittää, minkälaista hiiltä ja bioöljyä näistä biomassoista saadaan.

Itse pyrolyysilaitteeseen on tulossa teknisiä muutoksia, joiden avulla pystytään hyödyntämään myös kondensoimattomia kaasuja polttoaineena.

5 YHTEENVETO

Kuivatislaamalla biomassaa syntyy puuhiiltä, puuöljyä sekä kondensoitumattomia kaasuja. Pyrolyysi prosessin puuhiilestä voidaan valmistaa polttoainetta korvaamaan kivihiiltä. Kondensoimattomia kaasuja voidaan polttaa turbiineissa tuottaen sähköä. Höyrykattiloiden polttoaineena niistä saadaan höyryä ja sähköä.

Puuöljyä voidaan käyttää kuten polttoöljyä, mutta sen tuhansilla yhdisteillä voi olla monia muitakin käyttökohteita kuten lääke-, petrokemia ja muoviteollisuudessa.

Suomessa Fortum on investoinut Joensuussa voimalaitoksen yhteyteen rakennettavaan nopean pyrolyysin laitokseen 20 miljoonaa euroa. Puuöljyn raaka-aineena käytetään metsähaketta ja muuta puubiomassaa. Green Fuel Nordic aikoo rakentaa 3 laitosta. Yksi on määrä sijoittaa Iisalmeen ja toinen Savonlinnaan. Nämä laitokset tulevat perustumaan nopeaan leijukerrosprosessiin.

Näin ollen voin sanoa, että me olemme Anjalan Biosammossa asian ytimessä. Biosammossa on hitaan pyrolyysin laitos, jolla pystytään tekemään erilaisia koeajoja erilaisilla materiaaleilla. Pystymme tuottamaan tutkimusmateriaalia niin puunhiiltoa kuin puuöljyä varten. Mielenkiinnolla odotan Helsingin yliopiston Maija Kymäläinen ja Itä-Suomen yliopiston tutkimuksia. Näissä tutkimuksissa on käytetty Biosammossa tuotettua bioöljyä sekä biohiiltä.

Minä olen saavuttanut suurimman osan tavoitteistani, joita olin itselleni asettanut. Olen löytänyt paljon materiaalia, miten puu käyttäytyy, kun sitä kuumennetaan. En voi kuitenkaan sanoa, että olisin täysin sisäistänyt kaikkia niitä orgaanisia synteesejä, joita pyrolyysiprosessissa tapahtuu. Yhteenvetona sain tehtyä omasta mielestäni hyvän kaavion, jossa lyhyesti selviävät puun kuumennuksen vaiheet ja tärkeimmät reaktiot.

Olen oppinut tätä työtä tehdessäni ajamaan Biosammon kuivatislainta ja tiedän mitä jakeita sieltä saadaan puuta kuumennettaessa ja kuinka paljon.

Työni jäi puutteelliseksi jakeiden hyötyarvojen analysoinnin kohdalla. Meillä ei ole siihen vaadittavia laitteita enkä pyytänyt mittaustuloksia Itä-Suomen yliopistolta. Rajasin tämän pois myös ajankäytön takia.

Biosammon koelaitteisto on toiminut moitteettomasti ja toistettavasti. Tämän tutkimuksen perusteella saimme selvitettyä syntyvien jakeiden määrät. Tarkoitukseni on vielä selvittää stepeittäin tislautuvien nesteiden määriä sekä optimoida ajoja eri tarkoituksiin sopiviksi lämpötilojen ja ajan suhteen. Biosampon on tulossa mm. bambua ja kookospähkinöitä, joiden soveltuvuutta kuivatislaukseen selvitämme. Työni siis jatkuu pyrolyysin parissa.

LÄHTEET

- 1 Suomalaisten puulajien kemiallinen koostumus, KnowPap
- 2 Suomen paperi-insinöörien yhdistys, Puukemia. Turku 1977, 446 s
- 3 Pirjo Napari, Orgaaninen kemia. Helsinki 1993, 330 s
- 4 <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L7.pdf>
- 5 <http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L8.pdf>
- 6 Lignoselluloosan hydrolyysi: Suvi Virtanen. Saatavissa:
<http://www3.lut.fi/webhotel/teke/kklemola/Virtanen-kirjallisuustyö.pdf> [viitattu 8.10.2012]
- 7 Puun kuivaus: OPH. Saatavissa:
http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/puutuoteteollisuus/ensijalostus/puutavaran_kuivaus/index.html [viitattu 8.10.2012]
- 8 Puun info. Saatavissa:
<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puun-kosteuskayttaytyminen/puun-kosteuskayttaytyminen.pdf> [viitattu 8.10.2012]
- 9 Puun modifiointimenetelmät. Markus Laitinen. Saatavissa:
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/11742/2008-04-30-02.pdf?sequence=1> [viitattu 8.10.2012]
- 10 Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. Pertti Viitaniemi & Saira Jämsä. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1996/J814.pdf> [viitattu 8.10.2012]
- 11 Vesilasikyllästetyn männyn tasapainokostus ja dimensiostabiilisuus. Hannu Myllylä. Saatavissa:
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/13992/Myllyla_Hannu.pdf?sequence=1 [viitattu 13.10.2012]

12 Esiselvitys puupolttoaineen jalostamisesta torrefiointiteknikalla. Essi Hämläinen & Jussi Heinimö. Saatavissa:

<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31048/TMP.objres.459.pdf?sequence=1> [viitattu 13.10.2012]

13 Combined torrefaction and pelletisation. P.C.A Bergman. Saatavissa:
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf> [viitattu 13.10.2012]

14 Biohiilen tekeminen jätemateriaalista maanparannuskäyttöön. Tuomas Strand. Saatavissa:

http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/76753/Kandidaatinty%C3%B6_Strand.pdf?sequence=1[viitattu 13.10.2012]

15 Kainuunterva. Saatavissa:

http://www.kainuunterva.com/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=33[viitattu 14.10.2012]

16 Puun modifiointimenetelmät. Markus Laitinen. Saatavissa:

<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/11742/2008-04-30-02.pdf?sequence=1>[viitattu 14.10.2012]

17 <http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/BiofBioproBioref%203,%20547-562,%202009%20Laird.pdf>[viitattu 14.10.2012]

18 Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. Saatavissa:

(http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=09.02.01&article=pyrolysis) [viitattu 14.10.2012]

19 Green charcoal for sustainable development.Pro-Natura. Saatavissa:

<http://www.biochar-international.org/Pronatura> [viitattu 14.10.2012]

20 Envochar International. Saatavissa:

http://envochar.com/index.php?p=1_16 [viitattu 14.10.2012]

21 Luentomateriaali, Fast Pyrolysis and Bio-Oli Upgrading, Robert C. Brown, Iowa State Univeristy and Jennifer Holmgren UPO

22 Green Fuel Nordic. Saatavissa:

<http://www.greenfuelnordic.fi/tuotantoteknologia> [viitattu 2.11.2012]

23 Puun mahdollisuudet. Suomen metsäyhdistys. Saatavilla:

[http://www.smy.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/Images/57B97844C2D9571CC22575900031D254/\\$file/Puun_monet_mahdollisuudet.pdf](http://www.smy.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/Images/57B97844C2D9571CC22575900031D254/$file/Puun_monet_mahdollisuudet.pdf) [viitattu 2.11.2012]

24 Kivihiilen korvaaminen biomassoilla yhteistuotannon pölypolttokattiloissa. Saatavissa:

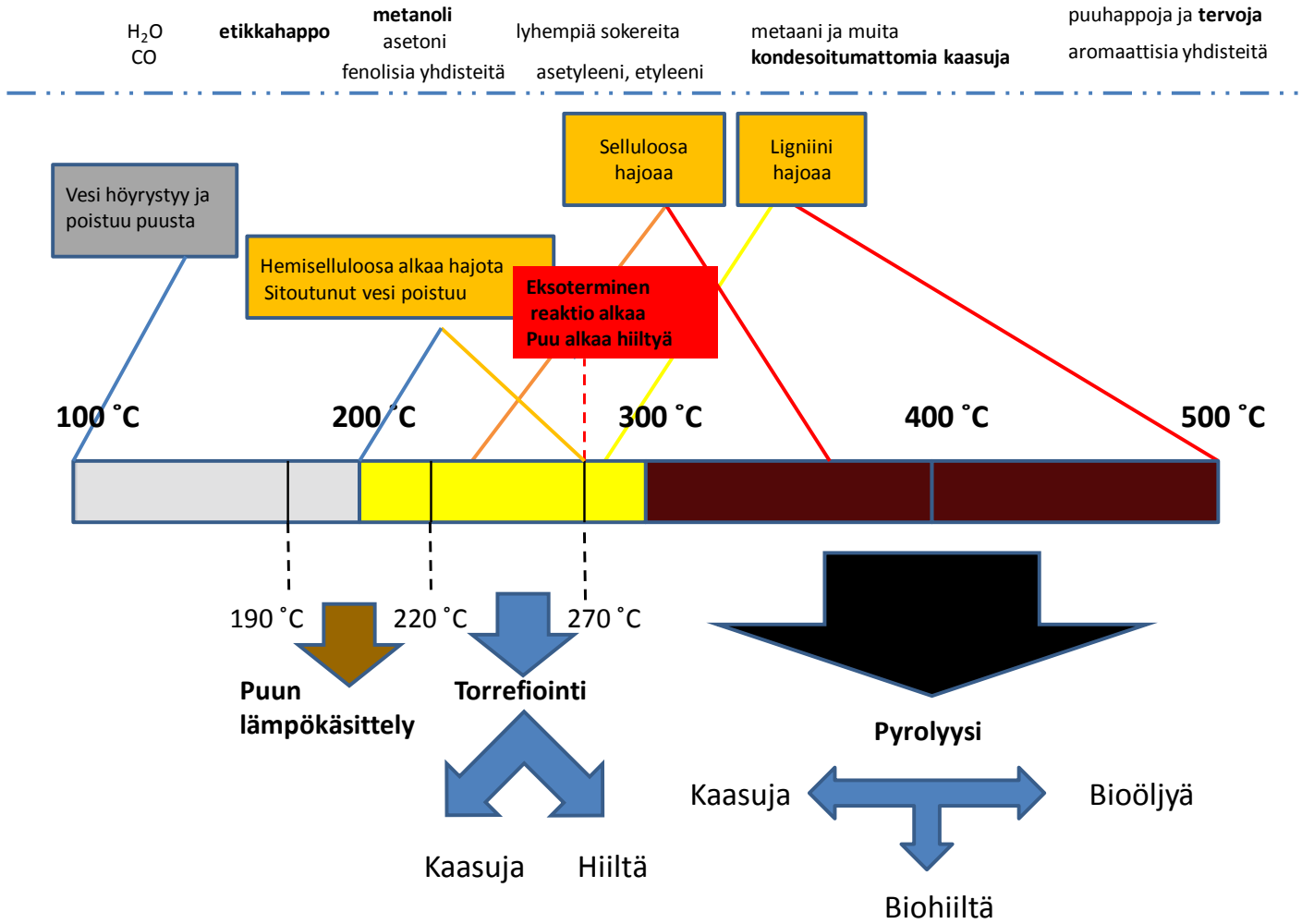
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2595.pdf> [viitattu 2.11.2012]

25 Bioöljyn valmistus osana CHP-voimalaitosta on kustannustehokasta. Tekes. Saatavilla:

http://www.tekes.fi/fi/community/Asiakkaiden_tuloksia/403/Asiakkaiden_tuloksia/647?name=Bioljyn+valmistus+on+kustannustehokasta [viitattu 2.11.2012]

26 Puu muuttuu nesteeksi ja hajoaa. Metla. Saatavilla:

<http://www.metla.fi/asiakaslehti/2006/2006-1/2006-1-hayrynen.pdf> [viitattu 2.11.2012]



1. Lataus

- Määritä materiaalin kosteus %.
- Punnitse materiaali. (Yleensä 25 kg)
- Poista vanha tiiviste kunnolla.
- Panosta laite ja sulje kansi.

2. Ohjelmointi

- Venttiilin puhdistus ennen varsinaisen ajon aloittamista.
 - Paina Venttiili => Open
- Säädä stepit
 - 1-6
 - ajoaika
 - lämpötila
- Prosessi =>Start
- Puhallin
 - 1

3. Ajo

- Näytepurkkien merkitseminen
- Kerätään nesteet stepeittäin
 - etu
 - taka
 - kondenssi
- Punnitaan jokainen näyte
- Vaihdetaan astiat
- Seurataan ajoa

4. Purku

- Seuraavana päivänä (jäähtyneenä)
- Hiilet poistetaan ja punnitaan
- Kattila puhdistetaan

5. Tulosten analysointi

Mittaustulos yhdeltä koeajolta

Liite 3 1(2)

BIOSAMPO : KUIVATISLAUSKATTILAN TUTKIMUSAJO	
--	--

Pvm:	13.9.2012
-------------	------------------

Vastaanottaja:	
-----------------------	--

Biosampo

Oma ajo

Lähetäjä:

Biosampo

Ankkapurhantie 10 46910 ANJALA

Tutkimusmateriaalin lähtötiedot:

Ajopvm	Materiaali	Massa [g]	Tilavuus [l]	Muuta
#####	Lauta/Lista	20000	n. 150	Materiaalin palakoko 5 - 20 cm

Tutkimusajon suoritus:

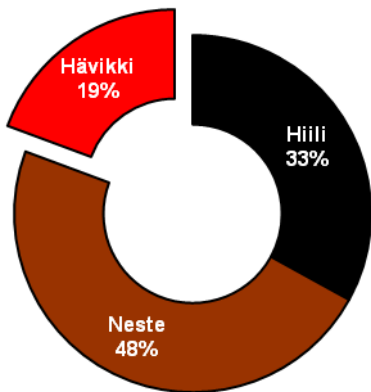
Tunniste:	13.9.2012	Timo Loikala ja Mia Kujala						
Vaihe	Aika	Kesto [min]	Lämpötila [C]	Neste/Etu [g]	Neste/Taka [g]	Neste/Kond [g]	Vaihe yht.	%-osuus
Step 1		60	110	218	20	66	304	3,2 %
Step 2		60	220	100	8	88	196	2,1 %
Step 3		60	260	732	10	3774	4516	47,4 %
Step 4		60	300	444	10	4062	4516	47,4 %
Loppu								
Yhteensä				1494	48	7990	9532	100 %
Nesteen kertymän prosenttijakauma venttiileittäin							100,0 %	
				15,7 %	0,5 %	83,8 %		

Ajon jälkeinen kiintoaine:	6600	Kiintoaine-% lähtömateriaaliin verrattuna:	33,0 %
Ajossa kertynyt neste :	9532	Neste-% lähtömateriaaliin verrattuna:	47,7 %

Puutislauksesta saadut materiaalit

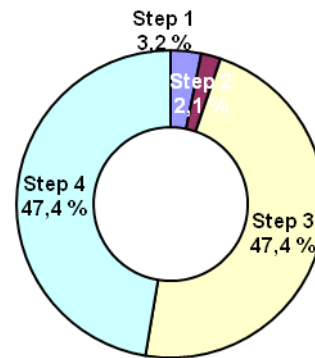
13.9.2012

Materiaali: Lauta (kost. 10%)

**Puunesteen osuudet stepeittäin**

13.9.2012

Materiaali: Lauta (kost. 10%)



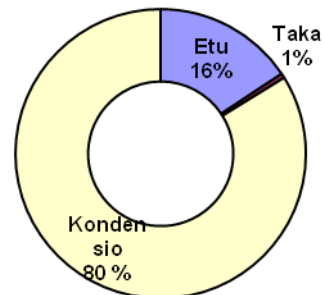
Hiili 33 %
 Neste 48 %
 Hävikki 19 %

Etu 16 %
 Taka 1 %
 Kondensio 84 %

Puunesteen osuudet venttiileittäin

13.9.2012

Materiaali: Lauta (kost. 10%)



Vaihe	Kesto	Lämpötila
Step 1	60	110
Step 2	60	220
Step 3	60	260
Step 4	60	300