LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Energia

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

# Biopolttoaineiden ominaisuudet

# Properties of biofuels

Työntarkastaja ja ohjaaja: Esa Vakkilainen

Lappeenrannassa 10.4.2012

Tuomo Kuittinen

**SISÄLLYSLUETTELO**

**Symboli- ja lyhenneluettelo** **3**

**1 Johdanto** **7**

**2 Biopolttoaineet Suomessa** **8**

**3 Vertailtevat polttoaineet** **10**

3.1 Puupolttoaineet ..... 11

3.1.1 Hakkeet, kuori, sahanpurut ja kutterinlastut ..... 11

3.1.2 Pelletit ja briketit ..... 12

3.1.3 Paju ..... 12

3.2 Peltobiomassat ..... 13

3.2.1 Ruokohelpi ..... 13

3.2.2 Viljat ..... 14

3.2.3 Elefanttiheinä ..... 14

3.3 Turve ..... 15

**4 Biopolttoaineiden ominaisuudet** **16**

4.1 Kosteus ..... 18

4.1.1 Kosteuden määrittäminen ..... 18

4.1.2 Kosteus pitoisuuksien vertailu ..... 18

4.2 Lämpöarvo ..... 20

4.2.1 Lämpöarvon määrittäminen ..... 20

4.2.2 Lämpöarvojen vertailu ..... 22

4.3 Tiheys ..... 23

4.3.1 Tiheyden määrittäminen ..... 23

4.3.2 Tiheyksien vertailu ..... 24

4.4 Haihtuvat aineet ..... 25

4.4.1 Haihtuvien aineiden osuuden määrittäminen ..... 25

4.4.2 Haihtuvien aineiden osuuksien vertailu ..... 26

4.5 Alkuaineet ..... 26

4.5.1 Alkuaineiden määrittäminen ..... 26

4.5.2 Alkuaine koostumusten vertailu ..... 27

4.6 Tuhka ..... 30
4.6.1 Tuhkan määrän määrittäminen ..... 30
4.6.2 Tuhka määrien vertailu ..... 31
4.6.3 Tuhkan sulamispisteet ..... 32
4.6.4 Tuhkien sulamispisteiden vertailu ..... 33

**5 Biopolttoaineiden käytettävyys 35**
5.1 Kosteus ..... 36
5.2 Palakoko ..... 36
5.3 Haihtuvat aineet ..... 37
5.4 Päästöt ..... 37
5.5 Raskasmetallit ..... 38
5.6 Tuhka ..... 38
5.6.1 Tuhkan likaaminen ja sulaminen ..... 39
5.6.2 Tuhkan hyötykäyttö ..... 40
5.7 Kuuma korroosio ..... 40
5.8 Korjuu ja väliaika varastointi ..... 41
5.9 Polttoaineiden vastaanotto ja paloturvallisuus ..... 42

**6 Johtopäätökset 44**

**Lähdeluettelo 45**

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | | |
|---|---|---|
| $m$ | massa | [kg] |
| $\rho$ | tiheys | [kg/m$^3$] |
| $p$ | paine | [bar], [Pa] |
| $q$ | lämpöarvo | [MJ/kg] |
| $T$ | lämpötila | [ºC], [K] |
| $V$ | tilavuus | [m$^3$] |

### Kemialliset merkit

| | |
|---|---|
| Al | alumiini |
| As | arseeni |
| C | hiili |
| Ca | kalsium |
| Cd | kadmium |
| Cl | kloori |
| Cr | kromi |
| Cu | kupari |
| Fe | rauta |
| H | vety |
| HCl | vetykloridi |
| Hg | elohopea |
| K | kalium |

| | |
|---|---|
| KCl | kaliumkloridi |
| $K_2SO_4$ | kaliumsulfaatti |
| Mg | magnesium |
| Mn | magnaaani |
| N | typpi |
| Na | natrium |
| NaCl | natriumkloridi |
| Ni | nikkeli |
| $N_2O$ | dityppioksidi |
| $NO_x$ | typenoksidit |
| O | happi |
| P | fosfori |
| Pb | lyijy |
| S | rikki |
| $SO_2$ | rikkioksidi |
| $SO_3$ | rikkitrioksidi |
| $SO_x$ | rikinoksidit |
| Si | pii |
| V | vanadiini |
| Zn | sinkki |

**Tuhkansulamispisteet**

| | |
|---|---|
| F | juoksevuuspiste |
| HT | puolipallopiste |
| SIT | muodonmuutospiste |
| SOT | pehmenemispiste |

# 1 JOHDANTO

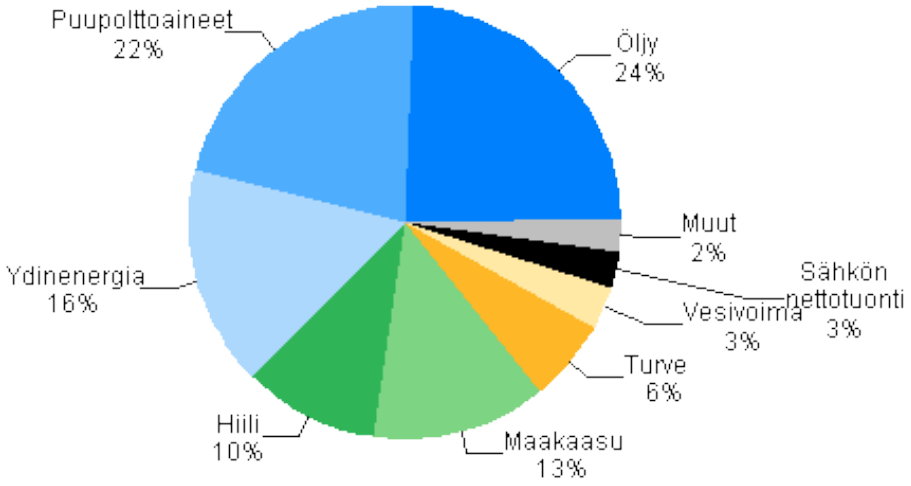
Polttoaineet voidaan jakaa joko uusiumattomiksi eli fossiiliseksi tai uusiutuviksi eli biopolttoaineiksi. Biopolttoaineet ovat orgaanista massaa, kun taas fossiiliset polttoaineet ovat fossilisoituneita biomassoja. Biopolttoaineet voidaan edelleen jakaa erilaisiin luokkiin, kuten puu-, kasvi- ja hedelmäbiomassoihin.

Käytetyimmät biopolttoaineet Suomessa ovat turve sekä puuperäiset polttoaineet. Turvetta ei kuitenkaan määritellä biomassaksi, vaan se eritellään yleensä hitaasti uusiutuvaksi biomassaksi. Metsäteollisuus on puupolttoaineiden merkittävin käyttäjä. Mustalipeä, joka on sulfaattisellun valmistuksen sivutuote, on käytetyin biopolttoaine. Puiden kuori on myös metsäteollisuuden sivutuote ja se on toiseksi käytetyin biopolttoaine. Metsätähdehakkeet ja muut metsäteollisuuden sivutuotteet kuten sahanpurut ovat myös paljon käytettyjä biopolttoaineita. Kasvibiomassoja ei laajalti käytetä energiantuotannossa, mutta niiden käytön oletetaan tulevaisuudessa lisääntyvän huomattavasti. Nykyisten peltobiomassojen, kuten ruokohelven ja viljojen, lisäksi kehitellään myös uusia sopivia kasvilajeja.

Työssä vertaillaan biopolttoaineiden seuraavia ominaisuuksia: kosteus, lämpöarvo, tiheys, haihtuvien aineiden osuus, ainesisältö, tuhkan määrät sekä niiden sulamislämpötilat. Polttoaineen sisältämät alkuaineet on valittu vertailuun mukaan, mikäli niillä on merkittävä vaikutus joko ympäristö-, korroosio- tai likaantumisongelmiin. Eri ominaisuuksien yhteydessä on selvitetty lyhyesti pääpiirteittäin kuinka tietyt ominaisuudet polttoaineesta määritellään eurooppalaisten biopolttoaineiden standardien 14774-1, 14918, 15103, 15148, 14775 ja 15370 mukaisesti. Lopuksi kerrotaan biopolttoaineiden käytettävyydestä, päästöistä, varastoinnista sekä paloturvallisuudesta. Työn tavoitteena on tarkastella kiinteitä biopolttoaineita poltettavuuden näkökulmasta ja selvittää biopolttoaineille tyypilliset ominaisuudet.

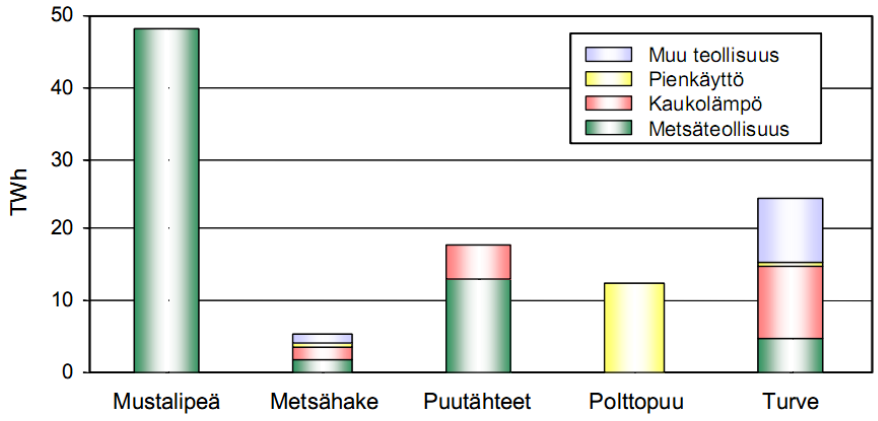
# 2 BIOPOLTTOAINEET SUOMESSA

Suomen energian kokonaiskulutus vuonna 2010 oli tilastokeskuksen tietojen mukaan 1,46 terajoulea. Kuvassa 1 on esitetty Suomen energiankulutuksen jakaantuminen. Tästä kulutuksesta biomassan osuus oli noin 22 prosenttia ja turpeen 6 prosenttia. Vuonna 2009 biomassojen polttoaineet jakautuivat sähkön ja lämmön tuotannossa pääasiallisesti seuraavanlaisesti: jäteliemet (mustalipeä) 12,7 prosenttia, turve 12,2 prosenttia ja muut puupolttoaineet 10,6 prosenttia. Vuoden 2008 vastaavat luvut olivat: jäteliemet (mustalipeä) 14,9 prosenttia, turve 13,7 prosenttia ja muut puupolttoaineet 12,3 prosenttia. (Tilastokeskus 2012)



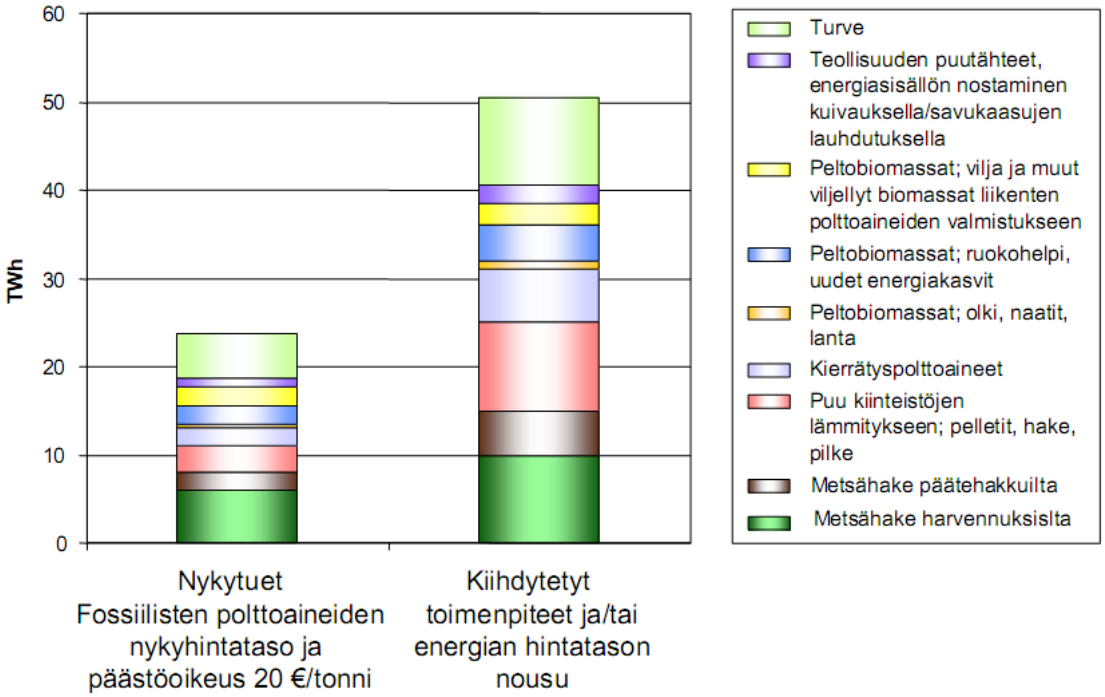

**Kuva 1.** Suomen primäärienergian kulutus vuonna 2010. (Tilastokeskus 2012)

Suomessa biomassan käyttö keskittyy sähkön ja lämmön tuotantoon joissa polttoaineina ovat lähinnä puuperäiset polttoaineet sekä turve. Puuperäisten polttoaineiden käyttö liittyy vahvasti puumassan valmistukseen, jossa hyödynnetään puusta erotettu kuori sekä lisäksi kemiallisessa sellun valmistuksessa syntyvä mustalipeä. Sahoilla syntyvästä puun kuoresta ja kolmasosa puruista menee energiantuotantoon. Puuperäisiin polttoaineisiin sisältyy myös hakkuu- ja harvennustähteet sekä polttopuut, joita käytetään lähinnä kotitalouksissa. Biomassan käytön jakautumista on havainnollistettu kuvassa 2. Peltobiomassoja ei ole merkitty kuvaan johtuen niiden alhaisesta käytöstä. (Rintala et al. 2007, 18)




**Kuva 2.** Biopolttoaineista käytetyimpiä Suomessa ovat puupolttoaineet ja turve. (Rintala et al. 2007, 19)

Kuvassa 3 on esitetty biopolttoaineiden käytön lisääntyminen vuoteen 2015 mennessä nyky- ja kiihdytetyillä energiatuilla sekä energian hinnan kallistumisen myötä. Metsähakkeen käytön arvioidaan yli kaksinkertaistuvan noin 8–15 TWh:iin. Peltobiomassojen käytön arvioidaan lisääntyvän noin 4–8 TWh:iin, turpeen noin 5 – 10 TWh:iin ja puun käytön kiinteistöjen lämmityksessä noin 3–10 TWh:iin.




**Kuva 3.** Tulevaisuudessa metsähakkeiden, kasvibiomassojen ja turpeen käytön arvioidaan lisääntyvän merkittävästi. (Rintala et al. 2007, 19)

# 3 VERTAILTAVAT POLTTOAINEET

Tässä työssä vertaillaan tällä hetkellä Suomessa käytetyimpiä biopolttoaineita. Mukana vertailussa on myös kasvibiomassoja, jotka eivät tällä hetkellä ole merkityksellisiä, mutta joiden viljelyn arvioidaan lisääntyvän energian hinnannousun sekä bioenergian osuuden lisäämistä koskevien kansainvälisten sopimusten johdosta. (Rintala et al. 2007, 12-14, 20-21) Myös ilmaston lämpenemisen aiheuttama kasvukauden piteneminen, ja samalla eteläisten lajien siirtyminen pohjoisemmaksi, voi tuoda uusia viljeltäviä energiakasveja sekä lisätä satojen tuotantomääriä (Hakala et al. 2010, 2).

**Taulukko 1.** Tarkasteltavien biopolttoaineiden määräytyminen standardissa 14961-1

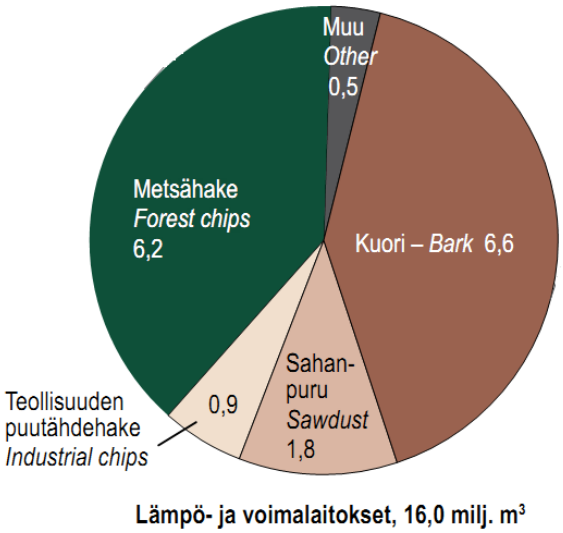
| | | | |
|---|---|---|---|
| PUUBIOMASSA **1.** | | | |
| | Luonnon- ja istutusmetsän biomassa sekä muu luonnonpuu **1.1** | | |
| | | Kokopuu **1.1.1** | |
| | | | Lehtipuu **1.1.1.1** |
| | | | Havupuu **1.1.1.2** |
| | | | Lyhytkiertoinenv vesakko **1.1.1.3** |
| | | Runkopuu/ranka **1.1.3** | |
| | | | Lehtipuu **1.1.3.1** |
| | | | Havupuu **1.1.3.2** |
| | | Hakkuutähteet **1.1.4** | |
| | | | Lehtipuu, tuore **1.1.4.1** |
| | | | Havupuu, tuore **1.1.4.2** |
| | | | Lehtipuu, varastoitu **1.1.4.3** |
| | | | Havupuu, varastoitu **1.1.4.4** |
| | | Kannot/juuret **1.1.5** | |
| | | | Lehtipuu **1.1.5.1** |
| | | | Havupuu **1.1.5.2** |
| | Puujalostusteollisuuden sivutuotteet ja jätteet **1.2** | | |
| | | Kemiallisesti käsittelemätön **1.2.1.** | |
| | | | Kuori **1.2.1.5** |
| KASVIBIOMASSA **2.** | | | |
| | Maatalous- ja puutarhakasvit **2.1** | | |
| | | Viljakasvit **2.1.1** | |
| | | | Olki **2.1.1.2** |
| | | Ruohokasvit **2.1.2** | |
| | | | Kokokasvi **2.1.2.1** |

Polttoaineita tarkastellaan tässä työssä kiinteinä polttoaineina voimalaitospoltossa. Vertailuun on valittu seuraavat polttoaineet: turve, puuperäiset (havu- ja lehtipuut sekä paju) ja heinät (ruokohelpi, ohra, kaura, vehnä, ruis ja elefanttiheinä). EU standardin 14961-1 mukaisesti nämä polttoaineet kuuluvat taulukon 1 mukaisiin luokkiin. Kasvibiomassoista vehnä, ruis, ohra ja kaura kuuluvat luokkaan 2.1.1.2. Ruokohelpi ja elefanttiheinä kuuluvat luokkaan 2.1.2.1. Paju kuuluu luokkaan 1.1.1.3. Turve ei tämän luokituksen mukaan ole biopolttoaine. Se on kuitenkin hitaasti uusiutuva biomassa.

Turvetta poltetaan usein biopolttoaineiden kanssa ja sillä on palamisprosessiin myönteisiä vaikutuksia. Tämän takia se on otettu vertailuun mukaan.

## 3.1 Puupolttoaineet

Puuperäisiä polttoaineita on saatavissa monipuolisesti esimerkiksi harvennuksista ja hakkuissa syntyvistä jätteistä, sekä sivutuotteina mm. sahoilta tai paperin ja kartongin massan valmistuksen yhteydestä. Vuoden 2010 Suomen lämpö- ja voimalaitoksen käyttämien puupolttoaineiden kulutuksen jakaantuminen on havainnellistettu kuvassa 4. Käytetyimmät polttoaineet olivat metsähake ja kuori. Metsähaketta valmistettiin eri puulähteistä vuonna 2010 seuraavanlaisesti: pienpuut 2,5 milj. $m^3$; hakkuutähteet 2,2 milj. $m^3$; kannot ja juuret 1,0 milj. $m^3$ ja runkopuut 0,5 milj. $m^3$. Kuorta käytettiin 6,6 milj. $m^3$, jota syntyi metsäteollisuudeen sivutuotteena puun jalostuksesta. (Metla 2012, 290)




**Kuva 4.** Metsätähdehake ja metsäteollisuuden sivutuote kuori ovat käytetyimmät puupolttoaineet. (Metla 2012, 298)

### 3.1.1 Hakkeet, kuori, sahanpurut ja kutterinlastut

Hakkeita valmistetaan mm. hakkuutähteistä, rangoista, kokopuista, kannoista ja juurista. Merkittävä osa polttoaineena käytettävistä hakkuujätteistä koostuu kuusikkojen hakkuujätteistä. Näitä jätteitä ovat latvat, oksat sekä hylkyrangat. Lehtipuiden hakkuujätteet ovat pääasiassa latvuksia, kun taas kuusissa oksat ja neulat muodostavat

suurimman osan hakkuujätteistä. Kuusistojen hakkuujätekertymä onkin muita suurempi. (Alakangas 2000, 49-50) Hakkeita tehdään myös puista, jotka eivät mene jatkojalostukseen, kuten harvennusten yhteydessä olevista nuorista puista. Kannot ovat liian sitkeitä haketettavaksi, joten ne murskataan. Syntyvän murskeen palakoko on tyypillisesti suurehkoa (yli 8 mm) (Alakangas 2000, 35). Kutteria eli höylälastua syntyy sahatavaran höyläyksestä. Sahanpurut ovat puun sahauksesta syntyvä sivujäte.

### 3.1.2 Pelletit ja briketit

Pelletit voidaan valmistaa mm. hakkeesta, kuoresta, sahanpurusta tai kutterinlastuista puristamalla. Pellettien halkaisija on yleensä 8–12 mm ja pituus 10–30 mm. Briketti on polttoainejaloste, joka on puristettu hiontapölystä, kuivasta kutterista tai purusta. Briketti muistuttaa pellettiä, se on poikkileikkaukseltaan neliön tai ympyrän muotoinen ja sen halkaisija on useimmiten 50 mm ja pituus 50–150 mm. (Alakangas 2000, 74-77)

### 3.1.3 Paju

Paju (kuvassa 5) on monivuotinen nopeasti kasvava puulaji. Pajujen viljely tapahtuu pistokkaina. Ensimmäisen kesän jälkeen paju leikataan noin 10 cm korkeudelta, jolloin kasvustoa saadaan tihennettyä. Ensimmäinen sato korjataan 5-7 vuoden päästä istutuksesta. Korjuilla on 3-4 vuoden aikaväli, joka on yleensä myöhään syksystä tai talvella. Pajuviljelmä voi kasvaa noin 25 vuoden ajan. Satoa hehtaarilta pajua saadaan 8-10 kuivatonnia. Merkittävimpiä pajulajeja ovat kori-, vanne-, rusko-, joki-, mustuva-, ja vesipaju. (Suomen energiapaju Oy 2009)

**Kuva 5.** Pajun hakettamista korjuun yhteydessä. (Polli Horticultural Research Centrer 2012)

## 3.2 Peltobiomassat

Energian viljelyyn suunnattujen peltoalojen tulevaisuuden määristä Suomessa on erilaisia arvioita. On arvioitu, että määrät nousevat nykyisestä alasta (taulukko 2) vuoteen 2015 mennessä 150 000-200 000 hehtaariin. Tällä hetkellä peltobiomassoista ruokohelpi on eniten viljelty. Pinta-alat voivat vaihdella vuosittain radikaalisti, koska osa sadoista on voitu viljellä esimerkiksi testisadoiksi erilaisiin kohteisiin. (Rintala et al. 2007)

**Taulukko 2.** Tuen piirissä olevat energiakasvit Suomessa vuonna 2006 (Rintala J. et al. 2007)

| Kasvi | viljelyala hehtaaria |
|---|---|
| Vehnä | 31 |
| Kaura | 346 |
| Ohra | 37 |
| Ruis | 25 |
| Rypsi ja rapsi | 821 |
| Ruokohelpi | 15 763 |
| Energiapaju | 7 |
| Kuituhamppu | 36 |
| **Energiakasvien tuen ala yhteensä noin** | **17 065** |

Kirjallisuudesta löytyviä satomääriä tarkasteltaessa täytyy huomioida, että saanteihin vaikuttavat mm. maaperä, sademäärät, lämpötilat, lisäravinteet sekä millä leveysasteella viljellään. Alan tutkimus- ja kehitystyö on osittain vasta alkuvaiheessa, joten tulevaisuudessa uudet kehitetyt lajikkeet ja viljelymenetelmien kehittyminen voivatkin kasvattaa satomääriä nykyisistä saavutetuista.

### 3.2.1 Ruokohelpi

Ruokohelpi (kuvassa 6) kasvaa luonnonvaraisena koko Suomessa ja se on monivuotinen siemenlevitteinen heinäkasvi. Se kasvaa vesistöjen rannalla, ojissa, pientareilla ja viljeltynä suurimmat sadot saadaan joko multa- tai turvemaasta. Se selviää myös hyvin kuivuudesta sekä maan tulvimisesta. Sen korsiosa on muusta kasvista energiantuotannon kannalta tärkein sen sisältämän suuremman kuitupitoisuuden takia. Sadot korjataan keväisin ja ensimmäinen sato voidaan korjata kahden vuoden päästä kylvöstä. Korjuun yhteydessä ruokohelpi voidaan mm. silputa tai paalata. Polttoaineena se soveltuu sekoitettavaksi muun polttoaineen joukkoon. Ruokohelpiviljelmä tuottaa

satoa 6-8 kuivatonnia hehtaaria kohden vähintään 10-12 vuotta. Ruokohelpilajikkeita on useita ja Suomen energiankäyttöön sopivimpia kehitellään. (Pahkala et al. 2005; Flyktman 1998, 12)

**Kuva 6.** Ruokohelpi kasvaa luonnonvaraisena koko Suomessa. (Maa- ja metsätalousministeriö 2006)

### 3.2.2 Viljat

Suomessa kasvatettiin viljoja vuonna 2010 tilastojen mukaan seuraavanlaisessa suhteessa: ohra 46 prosenttia, kaura 28 prosenttia, vehnä 25 prosenttia ja ruki yksi prosentti. (Maataloustilastot 2012) Näistä viljoista parhaiten polttamiseen soveltuvat vehnän ja rukiin oljet niiden korkeamman lämpöarvon sekä paremman tuhkan sulamisominaisuuksien vuoksi. Ohra on polttoteknisesti huonoin vaihtoehto. (Alakangas 2000, 99)

### 3.2.3 Elefanttiheinä

Elefanttiheinä (kuvassa 7) on Aasiasta kotoisin oleva monivuotinen heinäkasvi, jota kutsutaan myös nimellä Miscanthus. Euroopassa ja Yhdysvalloissa käytetään viljelyssä lähinnä lajien M. sacchariflorus ja M. sinensis risteymää M. giganteus. M. sinensis soveltuu paremmin kylmempään, Etelä-Ruotsin kaltaiseen ilmastoon. Elefanttiheinä on erittäin nopeakasvuinen ja saavuttaa jopa yli kolmen metrin korkeuden ensimmäisenä kesänään. Sato korjataan ruokohelven tavoin toisena vuonna perustamisesta. Satoa viljelmä tuottaa noin 15-25 vuotta. Euroopassa, alueesta riippuen, elefanttiheinä on tuottanut satoa 7–18 kuivatonnia hehtaaria kohden. (Scurlock 1999)

**Kuva 7.** Elefanttiheinä on nopeasti ja korkeaksi kasvava heinäkasvi. (Wilen et al. 1996, liite 1/2.)

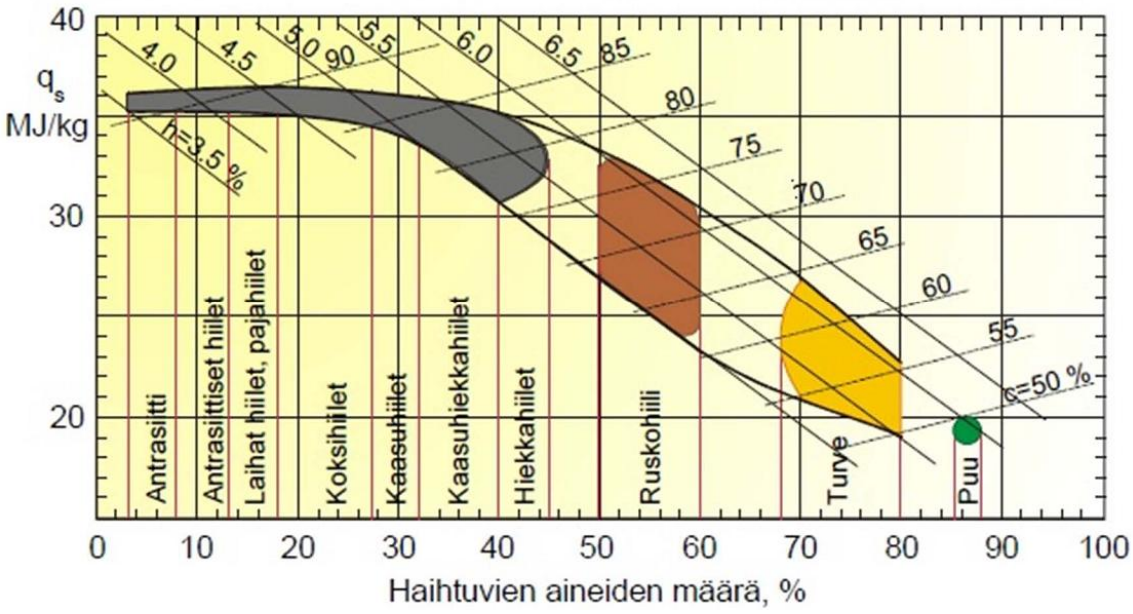
## 3.3 Turve

Suomen pinta-alasta noin kolmannes on suoksi laskettavaa aluetta. Turve muodostuu suon eloperäisen kasvillisuuden osittaisesta maatumisesta veden täyttämissä vähähappisissa olosuhteissa. Turvetta muodostavia kasveja ovat mm. sammaleet, sarat, ruohot, ruo'ot, pensaat ja puumaiset kasvit. Turpeen ominaisuuksiin vaikuttavat mm. suon sijainti, kasvisto ja maatuneisuusaste. (Alakangas 2000, 84-87; Turveinfo 2012)

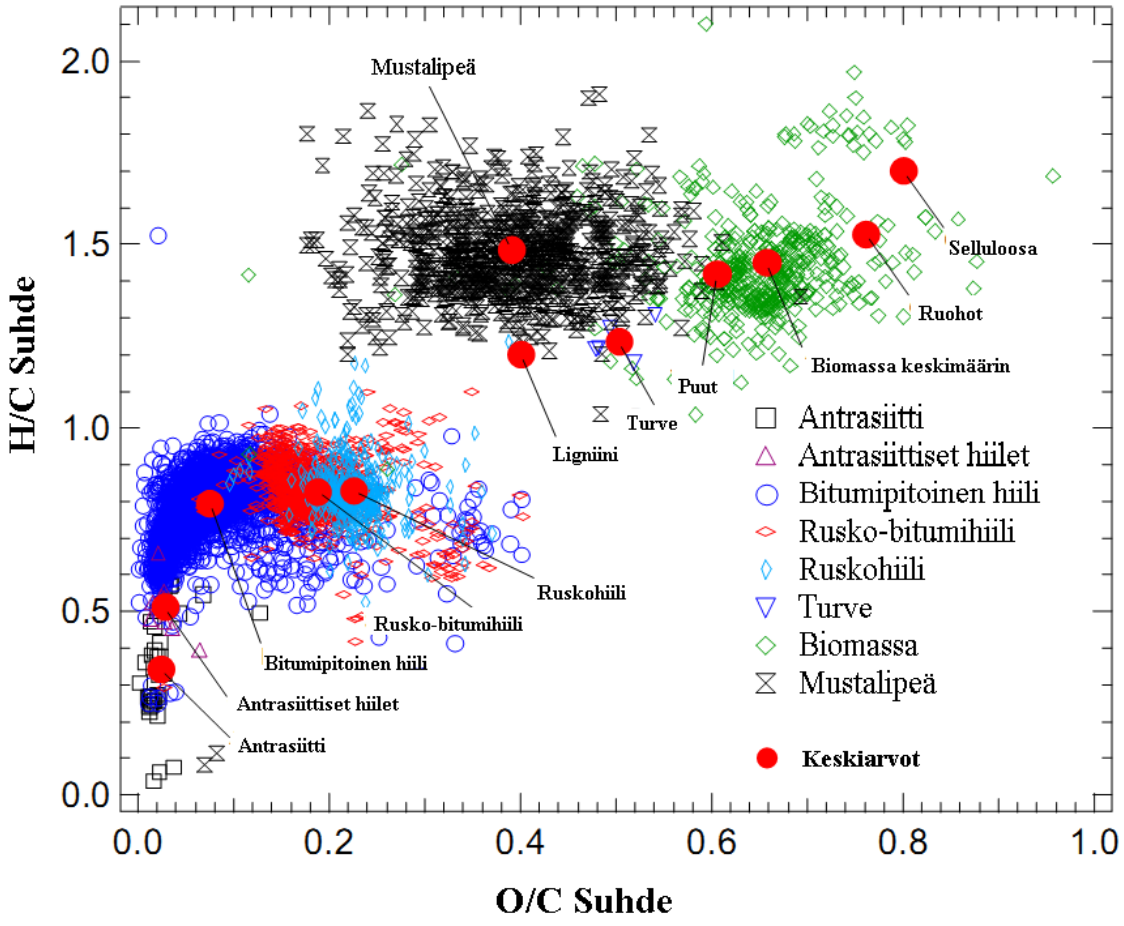
Turvetta tuotetaan Suomessa polttoaineeksi joko jyrsin- tai palaturvemenetelmällä. Jyrsinturvemenetelmässä kerros turvetta jyrsitään suon pinnalta. Polttoaineena jyrsinturve on raekooltaan vaihtelevaa ja pölymäistä. Pääkäyttäjinä ovat suuret lämpölaitokset ja voimalaitokset. Palaturvemenetelmässä suohon jyrsitään noin puolen metrin syvyinen ura, josta turve irrotetaan ja puristetaan joko paloiksi tai lainemaiseksi levyksi. Palaturpeen halkaisija on noin 40–70 millimetriä ja pituus 50–200 millimetriä. Palaturvetta käytetään jyrsinturvetta laajemmin myös kiinteistöjen lämmityspolttoaineena. (Alakangas 2000, 84-87; VAPO 1998; Turveinfo 2012)

# 4 BIOPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET

Biomassalle on tyypillistä suuri haihtuvien aineiden osuus, korkea kosteuspitoisuus, matala hiilipitoisuus, alhainen lämpöarvo ja energiatiheys, vaihteleva tuhkamäärä sekä suuret alkali- ja klooripitoisuudet. Biomassan epätäydellisessä maatumisessa, kuten vähähappisissa olosuhteissa veden alla, pieneliöt eivät pysty hyödyntämään eloperäisten aineiden ravinneaineita. Tällöin ravinneaineet, kuten hiili ja typpi, eivät muutu pieneliöiden energiaksi tai solujen rakenneaineeksi. Siten tämän osittain maatuneen massan hiilipitoisuus kasvaa. Samalla haihtuvien osuus vähenee. Kuvassa 8 ja 9 on havainnollistettu fossiilisten polttoaineiden ja biomassan keskeisimmät eroavaisuudet. Vanhemmat hiilet sisältävät enemmän hiiltä suhteessa happeen ja vetyyn, ja niiden lämpöarvo on myös siten korkeampi. Samalla haihtuvien osuus on myös pienempi.




**Kuva 8.** Biopolttoaineilla lämpöarvo on alhaisempi ja haihtuvien aineiden osuus korkeampi kuin fossiilisilla polttoaineilla. (Alakangas 2000, 149)




**Kuva 9.** Hapen ja vedyn suhde hiilen määrään on biopolttoaineilla fossiilisia polttoaineita korkeampi. (muokattu: Grammelis 2011, 98)

Kuvassa 9 polttoaineita on myös vertailtu biomassan rakenneaineiden, selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin, riippuvuutta hapen ja hiilen sekä vedyn ja hiilen suhteisiin. Mitä korkeampi hiilen pitoisuus polttoaineella on, sitä parempi on sen lämpöarvo. Ligniini on selluloosan ja hemiselluloosan tukiaine. Puut sisältävät enemmän ligniiniä kuin ruohot, ja siten niiden lämpöarvokin on parempi. Turpeen ligniinin kaltaisten aineiden pitoisuus suurenee sen maatumisen myötä.

Seuraavissa luvuissa polttoaineita on tarkasteltu tarkemmin kosteuden, lämpöarvon, tiheyden, haihtuvien aineiden, alkuaineiden, tuhkan määrän ja tuhkan sulamispisteiden mukaan. Standardissa 14961-1 on luotu kiinteiden biopolttoaineiden kaupankäyntiä varten luokittelujärjestelmä. Tässä standardissa polttoaineiden ominaisuuksia on lisäksi tarkasteltu polttoaineen dimensioiden, mekaanisen kestävyyden, lisä- ja sideaineiden sekä hienoaineiden määrän mukaan.

## 4.1 Kosteus

Kosteus voi olla sitoutunut polttoaineisiin joko sisäisesti (hygroskooppisesti) huokosiin tai ulkoisesti polttoaineen joukkoon. Polttoaineen kosteuspitoisuus ei ole sama asia kuin polttoaineen sisältämä vesimäärä. Määritettäessä polttoaineen kosteuspitoisuutta, osa haihtuvista yhdisteistä voi haihtua, ja siten vaikuttaa laskettavaan kosteuspitoisuuteen. (Huhtinen et al. 2004, 39)

### 4.1.1 Kosteuden määrittäminen

Kosteuden määrittäminen perustuu näytteen sisältämän veden haihtumiseen kuivaamalla ja vertailemalla näytteen muuttunutta massaa. SFS-EN 14774-1 -standardin mukaisessa kosteuden määrityksessä näytettä kuivataan ilmastoidusti 105 ± 2 °C lämpötilassa enintään 24 tuntia, jotta näyte saavuttaisi vakiopainon. Liiallisen haihtuvien aineiden karkaamiseksi, lämpötila ja kuivausaika on rajattu. Kosteuspitoisuus saapumistilassa lasketaan yhtälön 1 mukaisesti. Analyysikosteuspitoisuus (SFS-EN 1774-3) määritetään lähes vastaavalla tavalla, mutta näyte on jauhettu siten, että joukossa on korkeintaan 1 mm partikkeleita.

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \qquad (1)$$

, missä $M_{ar}$ = näytteen kosteuspitoisuus saapumistilassa

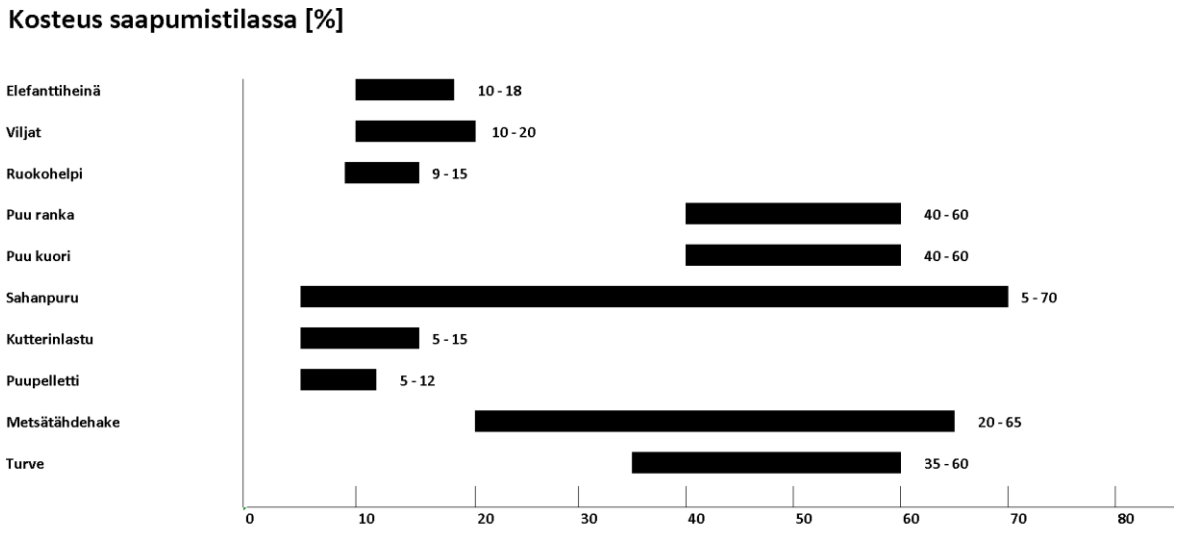
$m_1$ = näytteen massa alkutilanteessa

$m_2$ = kuivatun näytteen massa

### 4.1.2 Kosteuspitoisuuksien vertailu

Kuvassa 10 on esitetty polttoaineiden kosteuspitoisuudet saapumistilassa. Korjuun ajankohta, varastoinnin olosuhteet sekä aika vaikuttavat polttoaineiden kosteuksiin. Viljojen oljilla puintia tehdessä kosteuspitoisuus on noin 30 % ja 60 % välillä, mutta poltettavaksi oljet korjataan vasta kun niiden kosteuspitoisuus on laskenut noin 25 prosenttiin. Varastoinnin aikana kosteuspitoisuus edelleen alenee 2-6 prosenttiyksikköä. (Alakangas 2000, 98-102) Ruokohelvellä kosteus syksyllä on noin 50 %, mutta keväällä

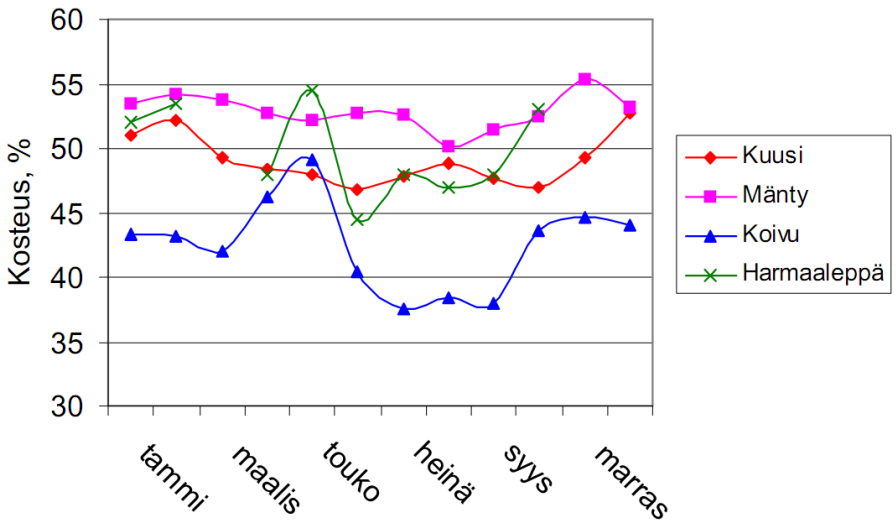
korjattaessa kosteus on alhaisempi (Pahkala et al. 2005, 32). Ruokohelven tavoin elefanttiheinällä kosteus on syksyllä korkeampi kuin keväällä (Scurlock 1999, 1).




**Kuva 10.** Kasvibiomassat, puupelletit ja -briketit ovat kuivia polttoaineita. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1; Strömberg 2006)

Turpeen kosteus kentästä irrottamisen jälkeen on noin 80 %. Turvetta kuitenkin kuivataan kentällä ennen sen siirtämistä aumavarastoihin. Jyrsinturve on palaturvetta kosteampaa saapumistilassa. Jyrsinturve on kosteudeltaan noin 50 %, kun palaturpeen kosteus on noin 40 %. Vallitsevat olosuhteet ja palakoko vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti turve kentällä kuivuu tavoiteltuun kosteuteen. (Alakangas 2000, 84-87; VAPO 1998)

Puiden kosteudet on ilmoitettu kaatotuoreena. Puiden kosteuspitoisuus vaihtelee vuodenajan mukaan kuvan 11 esimerkin mukaisesti. Metsätähteet ovat haketuksen jälkeen kosteudeltaan noin 50–60 %. Mikäli hakkuujätteiden annetaan kuivua kesällä muutaman kuukauden ajan, voi kosteus vähentyä 20–30 prosenttiin. Käytännössä hakkuujätteet korjataan kuitenkin pääosin lähes välittömästi. Talvella hakkeen mukaan joutunut jää ja lumi voivat nostaa hakkeen kosteuden 65 % asti. (Alakangas 2000, 50-55)




**Kuva 11.** Puiden, ja etenkin lehtipuiden kosteus riippuu paljon vuodenajasta. (Hillebrand 2005.)

Kutteria eli höylälastua syntyy sahatavaran höyläyksestä, jolloin sen kosteus on noin 5-15 %. Sahanpurujen kosteus vaihtelee aina kuivasta lähes 70 prosentin kosteuteen. Kuivasta sahatavarasta saatu sahanpurun kosteus on noin 5-15 %. Kantojen kosteus on keskimäärin 34 %. (Alakangas 2000, 35) Kuoren suuri kosteuspitoisuus, tyypillisesti 50-60% tekee siitä hankalasti poltettavan. Kuorta voidaan kuivattaa esimerkiksi lämmön avulla tai mekaanisesti puristamalla siitä liika vesi pois. Yleensä kosteus jää silti yli 40 %. (VAPO 1998; Lindblad et al. 2001, 19) Pellettien ja brikettien kosteus on yleensä noin 8–10 %. (Alakangas 2000, 74-77)

## 4.2 Lämpöarvo

Täydellisesti palavan polttoaineen lämpöarvo voidaan ilmoittaan kalorimetrisesti eli ylempänä lämpöarvona (englanniksi: higher heating value, gross heating value, calorific value ja heat of combustion) ja tehollisena eli alempana lämpöarvona (englanniksi: lower heating value ja net heating value). Lämpöarvo ilmoitetaan tässä työssä energiamääränä massayksikköä kohden (MJ/kg).

### 4.2.1 Lämpöarvon määrittäminen

Kiinteillä polttoaineilla ei lämpöarvoa pystytä täysin tarkasti päättelemään pelkän ainesisällön perusteella. Polttoaineiden sisältämien kompleksien yhdisteiden sekä niiden

palamisessa vapautuvan lämpöenergian selvittäminen on työlästä. Tällöin lämpöarvon selvittämiseksi on käytettävä kalorimetripommia. (Vakkilainen 2012)

SFS-14918–standardin mukaisessa menetelmässä ylempi lämpöarvo vakiotilavuudessa saadaan polttamalla 1,0 ± 0,1 g tiivistettyä polttoainetta kalorimetripommissa, jolloin polttoaineen lämpöarvo voidaan vapautuneen lämmön perusteella laskea. Riippuen siitä poltetaanko pommikalorimetrissä kosteaa vai kuivaa polttoainetta, saadaan joko kuivan tai kostean polttoaineen ylempi lämpöarvo. Ylemmässä lämpöarvossa polttoaineen sisältämä vesi sekä poltossa muodostuneiden tuotteiden sisältämä lämpöenergia lasketaan lämpöarvoon.

Alempi lämpöarvo poikkeaa ylemmästä lämpöarvosta siten, ettei muodostuneen vesihöyryn oleteta lauhtuvan takaisin referenssilämpötilaan 25 °C. Alemmassa lämpöarvossa voidaan myös huomioida, etteivät kaasuuntuneet typpi ja happi vaikuta lämpöarvoon. Yhtälössä 2 on esitetty standardin mukainen vakiopaineessa olevan polttoaineen alemman lämpöarvon laskentakaava

$$q_{p,net,m}=\left\{\left(q_{V,gr,m}\times\frac{100}{100\text{-}M_{ad}}\right)\text{-}212{,}2w(H)_d\text{-}0{,}8[w(O)_d+w(N)_d]\right\}\times\left(1\text{-}0{,}01M\right)\text{-}24{,}43M \qquad (2)$$

| | |
|---|---|
| $q_{V,gr,m}$ | on kostean näytteen kalorinen lämpöarvo vakiotilavuudessa, J/g |
| $M_{ad}$ | on näytteen analyysikosteuspitoisuus, % |
| $w(H)_d$ | on kuivan näytteen vetypitoisuus, % |
| $w(O)_d$ | on kuivan näytteen happipitoisuus, % |
| $w(N)_d$ | on kuivan näytteen typpipitoisuus, % |
| $M$ | on näytteen kosteuspitoisuus, % |

kuivan polttoaineen arvo $M = 0$

arvo näytteen kosteudessa $M = M_{ad}$

arvo saapumistilan kosteudessa $M = M_{ar}$

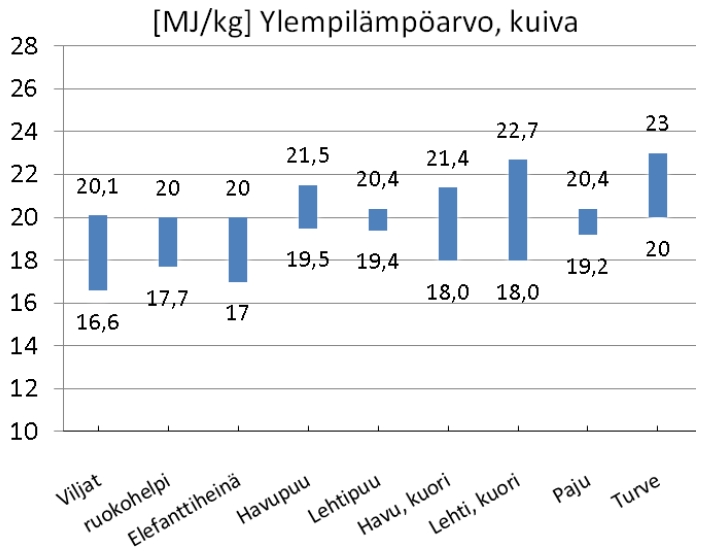
### 4.2.2 Lämpöarvojen vertailu

Yleisesti voidaan sanoa, että mitä suurempi hiili- ja vety-pitoisuus, sitä parempi lämpöarvo. Suuret hapen määrät puolestaan pienentävät polttoaineen lämpöarvoa. Alkuainetarkastelun lisäksi lämpöarvoa voidaan karkeasti arvioida biopolttoaineen rakenneaineiden, selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin perusteella. Näistä selluloosakuituja sitovalla ligniinillä on korkein lämpöarvo. Näiden rakenneaineiden korrelaatioita polttoaineen lämpöarvoon on tarkasteltu taulukossa 3. Polttoaineen ligniinin (LN) osuuden kasvu tarkoittaa pienempää hapen ja suurempaa hiilen osuutta ja siten parempaa lämpöarvoa. (Grammelis 2011, 129; Demirbas 1999, 1-6)

**Taulukko 3.** Polttoaineiden rakenneaineet korreloivat hiilen, hapen ja vedyn määrän polttoaineessa. (Muokattu: Demirbas 1999, 3)

| [p-% kuivasta] | Hiili | Vety | Happi | Hemiselluloosa | Selluloosa | Ligniini | Ylempilämpöarvo [MJ/kg] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Maissin olki | 49,3 | 5,5 | 41,6 | 30,7 | 51,2 | 14,4 | 17,8 |
| Maissin tähkä | 49 | 5,4 | 44,6 | 32 | 52 | 15 | 17 |
| Auringonkukan siemen kuori | 47,4 | 5,8 | 41,4 | 34,6 | 48,4 | 17 | 18 |
| Vilja olki | 45,5 | 5,1 | 34,1 | 39,1 | 28,8 | 18,6 | 17 |
| Pyökki | 49,5 | 6,2 | 41,1 | 31,8 | 45,8 | 21,9 | 19,2 |
| Hasselpähkinän kuori | 51 | 5,4 | 42,3 | 15,7 | 29,6 | 53 | 19,3 |
| Kuusipuu | 51,9 | 6,1 | 40,9 | 21,2 | 50,8 | 27,5 | 20,1 |
| Puun kuori | 53,1 | 6,1 | 40,6 | 29,8 | 24,8 | 43,8 | 20,5 |
| Manteli kuori | 53,5 | 6,6 | 35,5 | 22,1 | 25,6 | 52,3 | 21,6 |

Polttoaineiden ylemmät lämpöarvot on esitelty kuvassa 12. Biomassojen ylemmät lämpöarvot ovat samankaltaisia. Hiilipitoisimmilla puilla lämpöarvo on peltobiomassoja parempi. Lämpöarvo turpeella paranee sen maatuneisuusasteen myötä. Tällöin turpeen ligniinin kaltaisten aineiden määrä kasvaa.




**Kuva 12.** Polttoaineiden lämpöarvoja. Kasvibiomassan lämpöarvo on muita polttoaineita hieman alhaisempi.

## 4.3 Tiheys

Polttoaineen tiheys ilmaisee massan suhdetta tilavuusyksikköä kohden (kg/m$^3$). Tiheyttä tarvitaan mm. toimitusten ja varastoinnin tarpeiden arvioimisessa. Lisäksi tiheyttä käytetään polttoaineen energiatiheyden määrittämiseen. Tiheys on ilmoitettu tässä työssä irtotiheytenä ja kuiva-tuoretiheytenä. Kuiva-tuoretiheydessä huomioidaan vain polttoaineen kuivamassan osuus sekä tilavuus. Tiheys voi muuttua tärinän, paineen, biohajoamisen, kuivumisen tai vastaavasti kostumisen seurauksena.

### 4.3.1 Tiheyden määrittäminen

Standardin SFS-EN 15103 mukaan tiheyden mittaaminen suoritetaan täyttämällä mittausastia määrätyn palakoon polttoaineella ja täräyttämällä astia pudottamalla se matalalta korkeudelta, jonka jälkeen tiivistymisen seurauksena syntynyt vapautunut tila täytetään uudelleen polttoaineella. Tämän jälkeen astia punnitaan ja lasketaan mittausastian tilavuuden avulla polttoaineelle irtotiheys ($BD_d$). Kuiva-aineen irtotiheys ($BD_{ar}$) lasketaan polttoaineen kosteuden ja irtotiheyden avulla kaavan 3 mukaisesti. Menetelmää ei voi soveltaa kaikille polttoaineille, johtuen esimerkiksi suuresta palakoosta. Tällöin voidaan tiheyden määrittämiseen käyttää mm. polttoaineen kuljettamiseen käytettävää kuorma-autoa.

$$BD_d = BD_{ar} \times \frac{(100 - M_{ar})}{100} \quad (3)$$

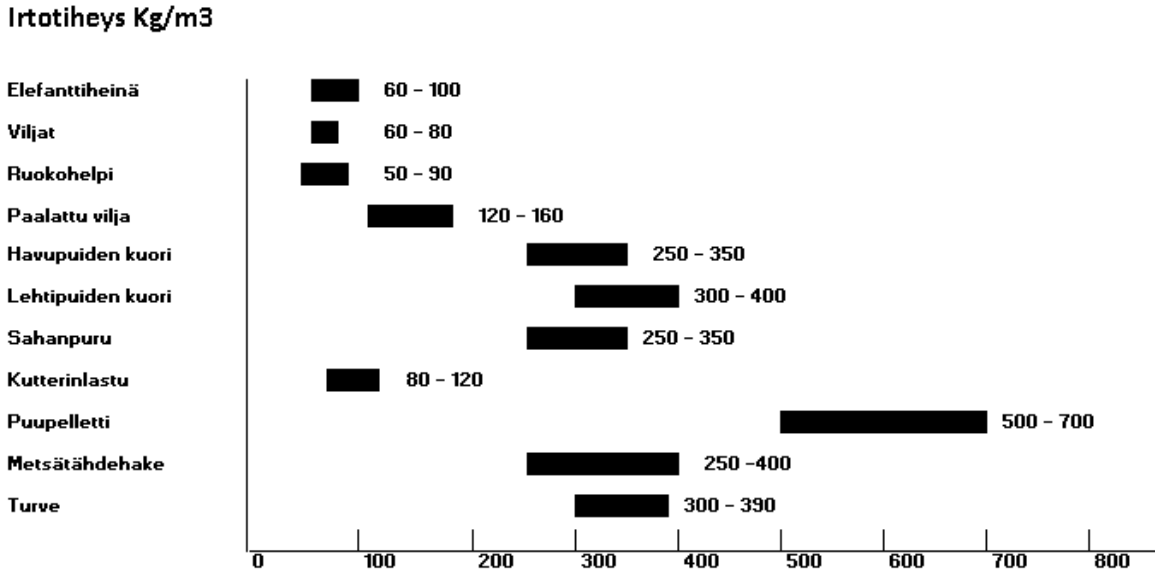
, missä $M_{ar}$ on näytteen kosteuspitoisuus saapumistilassa

Puun kuiva-tuoretiheys määritetään upottamalla näyte veteen ja siten kyllästämällä näyte vedellä. Tämän jälkeen näyte upotetaan vesiastiaan ja mitataan sen syrjäyttämän veden avulla näytteen tilavuus. Näyte kuivataan 103 °C lämpötilassa uunissa 48 tuntia ja punnitaan. Kuiva-tuoretiheys saadaan jakamalla kuivatun näytteen paino edellä mitatulla syrjäytetyn veden tilavuudella. (Alakangas 2000, 33)

### 4.3.2 Tiheyksien vertailu

Lehtipuissa suurin kuiva-tuoretiheys on koivulla noin 490 kg/m³, kun taas lepällä ja haavalla kuiva-tuoretiheys on noin 380 kg/m³. Havupuista männyllä kuoren kuiva-tuoretiheys on noin 300 kg/ m³ ja kuusella noin 365 kg/m³. Pajun kuiva-tuoretiheys on 280–380 kg/ m³. Puupelleteillä irtotiheys on noin 600-750 kg/m³ ja briketeillä noin 650 kg/m³. (Alakangas 2000, 76; Lindblad et al. 2001, 5-10) Puuhakkeen kuiva-tuoretiheydet ovat männylle ja kuuselle noin 395-409 kg/m³ ja koivulle 393-494 kg/m³. (Lindblad et al. 2001, 10) Kuiva-tuoretiheys kutterinlastulle on 80-120 kg/m³ ja sahanpurulle 380-480 kg/m³. (Strömberg 2006, 69; Alakangas 2000, 69, 90)

Kuvassa 13 on esitetty eri polttoaineiden irtotiheyksiä. Viljat, ruokohelpi sekä elefanttiheinän tiheydet on taulukossa ilmoitettu irtotiheytenä. Huomioitavaa on näiden biomassojen erittäin alhainen tiheys. Tiheyttä voidaan hieman nostaa riittävän tiheällä silppuamisella, ja paalaamalla tiheys voidaan kaksinkertaistaa. (Paappanen et al. 2008, 2). Briketöidyn oljen irtotiheys on 300-550 kg/m³ ja pelletöidyn 450-750 kg/m³. Jauhetun oljen irtotiheys on noin 220-240 kg/m³. Silppureiden ja paalauslaitteiden ominaisuudet vaikuttavat tiheyteen. (Alakangas 2000, 102-108) Palaturve on jyrsinturvetta hieman tiheämpää puristamisen seurauksena.




**Kuva 13.** Polttoaineiden irto-tiheyksiä. Kasvibiomassojen tiheydet ovat alhaisia. Pelletöinti nostaa polttoaineen tiheyttä hyvin. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1; Strömberg 2006)

## 4.4 Haihtuvat aineet

Haihtuvia ovat polttoaineesta kaasumaisessa muodossa poistuvat orgaaniset yhdisteet kuten hiilimonoksidi, vety, metaani ja hiilidioksidi (Huhtinen et al. 2004, 40). Haihtuvien osuus määritellään näytteen painon muutoksen avulla, poltettaessa näytettä tietyssä lämpötilassa sekä aikajaksossa. Johtuen mahdollisista poikkeavuuksista haihtuvien määrittämisessä, kuten lämpötilassa sekä aikajaksossa, voi tuloksissa olla eroavaisuuksia.

### 4.4.1 Haihtuvien aineiden osuuden määrittäminen

Haihtuvien osuus määritetään standardissa SFS-EN 15148 kuumentamalla 1,0 ± 0,1 g polttoainenäytettä suljetussa upokkaassa 900 ± 10 °C lämpötilaisessa uunissa 7 min ± 5 s ajan. Tämän jälkeen upokkaan annetaan jäähtyä huoneen lämpötilaan ja se punnitaan. Haihtuvien osuus massaprosenttina kuiva-aineesta lasketaan kaavan 4 mukaisesti.

$$V_d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad}\right] \times \left(\frac{100}{100 - M_{ad}}\right) \qquad (4)$$

, missä $m_1$ on tyhjän upokkaan ja kannen massa, g

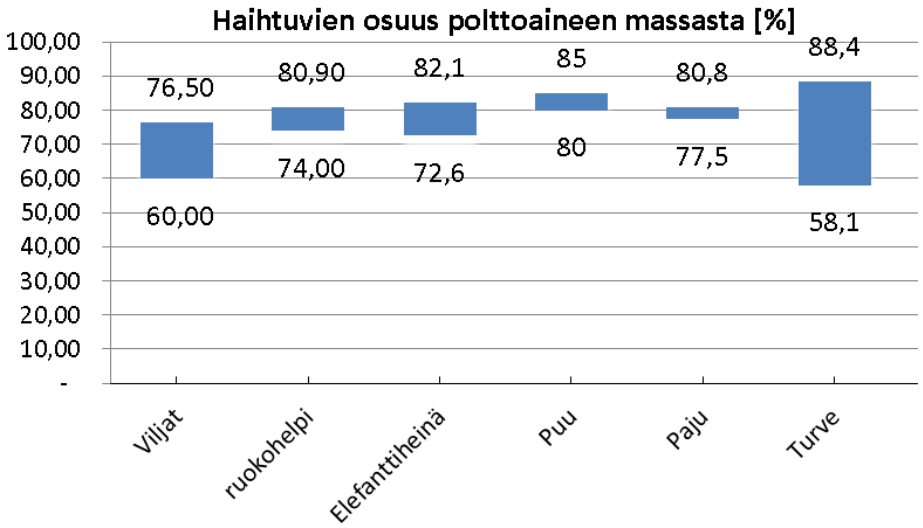
$m_2$ on upokkaan, kannen ja näytteen massa, g

$m_3$ on upokkaan, kannen ja näytteen massa kuumennuksen jälkeen, g

$M_{ad}$ on näytteen kosteuspitoisuus analyysitilassa, %

### 4.4.2 Haihtuvien aineiden osuuksien vertailu

Biopolttoaineiden haihtuvien osuus (kuva 14) on suuri verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Esimerkiksi antraasiitin haihtuvien osuus on noin 2 % ja ruskohiilen 60 %. Turpeella haihtuvien osuus on yleensä alhaisempi kuin muilla polttoaineilla. Haihtuvien osuus riippuu turpeen maatuneisuusasteesta. Mitä maatuneempaa turve on, sitä alhaisempi on sen haihtuvien osuuskin.




**Kuva 14.** Haihtuvien aineiden osuudet ovat kaikilla biopolttoaineilla korkeat. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1; Strömberg 2006)

## 4.5 Alkuaineet

### 4.5.1 Alkuaineiden määrittäminen

Polttoaineen alkuainekoostumuksen määrittämiseksi on olemassa useita menetelmiä. Analyysin voi tehdä selvittämällä yksittäisiä alkuaineita kerrallaan. Esimerkiksi hiilen ja

vedyn määrät voidaan selvittää absorboimalla ne savukaasuista muihin sopiviin yhdisteisiin, jolloin yhdisteen massan muutoksesta voidaan päätellä ainemäärät. Selvitykset tehdään kuitenkin yleensä käyttäen automaattisia instrumentteja, kuten induktiivisesti kytketyllä plasma-massaspektrometrillä (ICP-MS), optisella emissiospektrimetrillä (ICP-OES), liekkiatomiabsorptiospektrometrillä (FAAS) ja liekkiemissiospektrometrillä (AAS).

### 4.5.2 Alkuainekoostumusten vertailu

Taulukossa 4 on esitetty polttoaineiden koostumus alkuaineiden hiili (C), vety (H), happi (O), typpi (N), rikki (S) ja kloori (Cl) osalta. Hiilipitoisuudet ovat hieman korkeammat puumaisilla kuin ruohomaisilla biopolttoaineilla. Turpeen muita polttoaineita korkeammat hiili- ja typpipitoisuudet johtuvat eloperäisen massan osittaisesta maatumisesta. Tällöin kasvien selluloosan ja hemiselluloosan osuus vähenee ja ligniinin kaltaisten aineiden osuus lisääntyy. (Alakangas 2000, 88) Samalla hapen määrä vähenee.

**Taulukko 4.** Polttoaineiden pääalkuaineiden koostumus vaihtelee paljon kloorin ja rikin osalta. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1-; Strömberg 2006)

| Prosenttia kuivasta | Viljat | Ruokohelpi | Elefanttiheinä | Havupuu (1) | Lehtipuu (1) | Havu- ja lehtipuu kuori | Paju | Turve |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 41 ... 45 | 45 ... 50 | 46 ... 52 | 48 ... 52 | 50 ... 51 | 47 ... 55 | 46 ... 49 | 48 ... 60 |
| H | 5,4 ... 6,5 | 5,7 ... 6,2 | 5 ... 6,5 | 5,7 ... 6,2 | 5,8 ... 6,1 | 5,3 ... 6,4 | 5,7 ... 6,4 | 2,9 ... 6,3 |
| O | 36 ... 45 | 40 ... 43 | 40 ... 45 | 38 ... 44 | 40 ... 43 | 34 ... 42 | 40 ... 44 | 33,3 ... 42 |
| N | 0,2 ... 1,5 | 0,4 ... 2,0 | 0,1 ... 1,5 | 0,3 ... 0,8 | 0,3 ... 0,8 | 0,1 ... 0,9 | 0,2 ... 0,8 | 0,5 ... 4,40 |
| S | < 0,05 ... 0,2 | 0,04 ... 0,17 | 0,02 ... 0,6 | < 0,02 ... 0,06 | 0,01 ... 0,08 | < 0,02 ... 0,2 | 0,02 ... 0,1 | 0,1 ... 0,46 |
| Cl | < 0,1 ... 1,2 | 0,01 ... 0,09 | 0,02 ... 0,6 | < 0,01 ... 0,04 | < 0,01 ... 0,02 | < 0,01 ... 0,05 | 0,01 ... 0,05 | < 0,12 |

(1) Ilman neulasia taikka lehtiä. Sisältää sekä kuorelliset että kuorettomat puut.

Tärkeimmät biopolttoaineiden tuhkaa muodostavista alkuaineista ovat kasvien ravinneaineita. Nämä alkuaineet ovat : kalsium (Ca), kalium (K), magnesium (Mg), fosfori (P), S, rauta (Fe), pii (Si) ja Cl. Muut tuhkaa muodostavat alkuaineet ovat alumiini (Al), magnaani (Mn) ja natrium (Na). Taulukossa 5 on näiden alkuaineiden pitoisuudet ilmoitettuna kuivassa polttoaineessa. Mn- ja Al-pitoisuudet ovat yleensä alhaiset, ja korkeat arvot voivat johtua maaperän saastumisesta. Na-pitoisuudet kasvissa

kohoavat mikäli maaperä on meren läheisyydessä. Onkin huomioitava, että biopolttoaineiden alkuainesisällöt voivat poiketa huomattavasti saman lajin välillä riippuen muun muassa maaperästä sekä lannoituksesta. (Micha 2006, 11-12; Force Technology, 2008; Wilen et al. 1996, 17; Spectrum analytic 2012)

**Taulukko 5.** Tärkeimmät polttoaineiden tuhkaa muodostavien aineiden määrät. Puupolttoaineilla tuhkaa muodostavia aineita on vähän. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1; Strömberg 2006)

| mg/Kg kuiva pa | Viljat | Ruokohelpi | Elefanttiheinä | Turve |
|---|---|---|---|---|
| Mn | 20 ... 100 | < 200 | 10 ... 100 | < 445 |
| Ca | 2000 .... 7 000 | 800 ... 3 200 | 900 ... 3 000 | 500 ... 12 000 |
| Mg | 400 ... 1 300 | 100 ... 900 | 300 ... 900 | 100 ... 2 500 |
| Si | 1000 ... 20 000 | 2300 ... 30 000 | 2 000 ... 10 000 | 800 - 8000 |
| Na | < 3 000 | < 20 ... 400 | 20 ... 100 | 100 |
| K | 2000 ... 26 000 | < 800 ... 6 000 | 1 000 ... 11 000 | 200 |
| Cl | 1000 ... 12 000 | 100 ... 900 | 200 ... 6000 | < 1 200 |
| P | 300 ... 2 900 | 300 ... 2 000 | 200 ... 800 | |
| S | < 500 ... 2 000 | 400 ... 1 700 | 200 ... 6000 | 500 ... 4 600 |
| Fe | < 500 | 60 ... 220 | 40 ... 400 | 200 ... 19 000 |
| Al | < 700 | 20 | 50 ... 200 | 100 ... 8 400 |

| mg/Kg kuiva pa | Havupuut (1) | Lehtipuut (1) | Havupuiden kuori | Lehtipuiden kuori | Paju |
|---|---|---|---|---|---|
| Mn | 40 ... 200 | 83 | 9 ... 840 | 190 | 79 ... 160 |
| Ca | 500 ... 1000 | 800 ... 20 000 | 1 000 ... 15 000 | 10 000 ... 20 000 | 2 000 ... 9 000 |
| Mg | 100 ... 200 | 100 ... 400 | 400 ... 1 500 | 400 ... 1 000 | 200 ... 800 |
| Si | 100 ... 200 | 100 ... 200 | 500 ... 5 000 | 2 000 ... 20 000 | < 2000 |
| Na | 10 ... 50 | 10 ... 200 | 70 ... 2 000 | 20 ... 1 000 | 10 ... 450 |
| K | 200 ... 500 | 5 000 ... 1 500 | 1 000 ... 3 000 | 1 000 ... 3 200 | 1 700 ... 4 000 |
| Cl | < 100 ... 300 | < 100 ... 300 | < 100 ... 500 | < 100 ... 500 | 100 ... 500 |
| P | 50 ... 100 | 50 ... 200 | 20 ... 600 | 300 ... 700 | 500 ... 1 300 |
| S | < 100 ... 200 | < 100 .. 500 | < 200 ... 500 | < 200 ... 2000 | 200 ... 1 000 |
| Fe | 10 ... 100 | 10 ... 100 | 100 ... 800 | 50 ... 200 | 30 ... 600 |
| Al | 30 ... 400 | <10 ... 50 | 400 ... 1 200 | 30 ... 100 | < 100 |

**(1) Ilman neulasia taikka lehtiä. Sisältää sekä kuorelliset että kuorettomat puut.**

Yleisesti tuhkan sulamislämpötiloja korottavia yhdisteitä ovat alkuaineet Ca, Mg ja Si. Suuret silikaattioksidi-määrät ($SiO_2$) polttoaineen tuhkassa nostavat polttoaineen lämpöarvoa, eikä tällaista polttoainetta pidetä polton kannalta kovinkaan ongelmallisena. Kyseisiä polttoaineita ovat esimerkiksi vehnän olki sekä ruokohelpi. (Alakangas 2000, 99) Kuitenkin nämä alkuaineet myös pystyvät muodostamaan

yhdisteitä, jotka alentavat tuhkansulamisen lämpötiloja. Esimerkiksi Si voi muodostaa kaasuuntuneiden alkalien, kuten kaliumin, kanssa kyseisiä yhdisteitä. (Force Technology, 2008; Thomas et al. 1995, 18, 37)

Natrium, kalium ja kloori ovat helposti kaasuuntuvia aineita ja niillä on suuri vaikutus kattilan pintojen likaantumiseen. Nämä yhdisteet reagoidessaan muiden tuhkan sisältämien aineiden kanssa voivat alentaa huomattavasti tuhkan sulamislämpötiloja. Kaliumia löytyy lähinnä kehittyvässä osissa kasvia kuten lehdissä. Siksi sen pitoisuudet ovat huomattavasti suuremmat nopeasti kasvavissa kasveissa kuten viljat, ruokohelpi sekä elefanttiheinä. Kalium voi muodostaa erilaisia alhaisissa lämpötiloissa sulavia yhdisteitä muun muassa kloorin kanssa. (Thomas et al. 1995, 18, 28, 38) Kloori on yhteydessä korroosio-ongelmiin ja sen yhdisteet alentavat tuhkansulamislämpötilaa. Kloori voi myös muodostaa myrkyllisiä orgaanisia yhdisteitä kuten trikloorietyleeniä. (Strömberg 2006, 32)

Myös rikin muodostamat sulfaatit alentavat tuhkan sulamislämpötiloja. Toisaalta rikki mahdollistaa palamisprosessissa vetykloridin (HCL) muodostumisen jolloin korroosion riski sekä likaantuminen vähentyy. (Force Technology, 2008; Grammelis 2011, 62)

Alumiinia on pidetty yleisesti ongelmallisena. Sen sulamispiste on alhainen, ja se muodostaakin nopeasti tukkeuttavia kertymiä kattilaan, kuten tulistimiin. (Alakangas 2000, 113; Makkonen 2000, 9) Turpeessa alumiini on silikaatteina, jonka on havaittu vähentävän alkalien ja kloorin aiheuttamia ongelmia. (Flyktman et al. 2011, 34) Pelkästään alkuaineanalyysien perusteella ei täysin pystytäkään päättelemään, kuinka sopiva polttoaine on polttoprosessiin.

Vertailtavien polttoaineiden raskasmetallipitoisuudet (taulukko 6) voivat vaihdella merkittävästi, riippuen maaperästä sekä ilmasta peräisin olevien raskasmetallien laskeutumisien johdosta. Esimerkiksi pajujen lyijyn keskimääräisesti suurimmaksi arvoksi joissain lähteissä on ilmoitettu 0,2 mg/kg, joka eroaa huomattavasti taulukossa ilmoitetusta 135 mg/kg arvosta. Paju sitoo itseensä hyvin maaperästä raskasmetalleja ja sitä käytetäänkin saastuneen maan puhdistamisessa (Suomen energiapaju Oy 2009, 3). Turpeen raskasmetallipitoisuudet ovat keskimääräisesti muita polttoaineita korkeammat.

**Taulukko 6.** Raskasmetallipitoisuudet vaihtelevat polttoaineissa hyvin paljon. Turve sisältää yleensä paljon raskasmetalleja. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1; Strömberg 2006)

| mg/Kg kuiva pa | Viljat | Ruokohelpi | Elefanttiheinä | Havu- ja lehtipuu (1) | Havu- ja lehtipuu kuori | Paju | Turve |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| As | < 0,1 ... 2,0 | < 0,1 ... 0,5 | 0,5 ... 4 | < 0,1 ... 1,0 | 0,1 ... 4,0 | 0,1 ... 1,4 | 0,2 ... 9,3 |
| Cd | < 0,05 ... 0,30 | < 0,04 ... 0,2 | 0,4 ... 8 | < 0,05 ... 0,50 | 0,2 ... 1,2 | 0,2 ... 5,0 | 0,2 ... 1,1 |
| Cr | 1 ... 60 | 0,9 ... 14,3 | 1 ... 10,0 | 0,2 ... 10,0 | 1 ... 30 | 0,3 ... 45 | 0,9 ... 60 |
| Cu | 1 ... 10 | 1,9 ... 8,0 | 1 ... 6 | 0,5 ... 10,0 | 2 ... 30 | 2 ... 7 | 1,0 ... 29,0 |
| Hg | < 0,02 ... 0,05 | < 0,02 ... 0,05 | < 0,5 ... 5,0 | < 0,02 ... 0,05 | 0,01 ... 0,1 | < 0,03 | 0,06 |
| Ni | 0,2 ... 4,0 | 0,3 ... 3,1 | 1 ... 20 | < 0,1 ... 10,0 | 2 ... 20 | 0,2 ... 78 | 0,5 ... 16,7 |
| Pb | 0,1 ... 3,0 | < 0,5 ... 5,0 | < 0,5 ... 10,0 | < 0,5 ... 10,0 | 1 ... 30 | 0,1 ... 135 | 0,5 ... 445 |
| V | 1 ... 6 | 0,3 | < 2 | < 2 | 0,7 ... 2,0 | 0,2 ... 0,6 | 5 ... 58 |
| Zn | 3 ... 60 | 60 | 3 ... 30 | 5 ... 100 | 70 ... 200 | 40 ... 100 | 1,5 ... 36,5 |

(1) Ilman neulasia taikka lehtiä. Sisältää sekä kuorelliset että kuorettomat puut.

## 4.6 Tuhka

Tuhkan osuus polttoaineesta määritellään palamisprosessin jäljelle jäävän epäorgaanisen massan ja polttoaineen kuiva-ainesmassan suhteena. Tuhkan määrän tuloksissa voi olla poikkeavuuksia menetelmien välillä, johtuen esimerkiksi erilaisesta polttolämpötilasta, jolloin osa epäorgaanisista aineista voi haihtua tai tuhkaan voi jäädä palamatonta hiiltä. Myös maaperä, lannoitus ja polttoaineen mukaan joutunut maa-aines tai muut epäpuhtaudet voivat vaikuttaa tuhkapitoisuuteen. (Hakkila 2004; Makkonen 2000, 5)

### 4.6.1 Tuhkan määrän määrittäminen

Tuhkan määrän määrittäminen standardin EN-14775 mukaisesti tehdään analyysitestaus näytteelle, joka on valmistettu standardin CEN/TS 14780 mukaisesti, ja jonka suurin partikkelikoko on 1 mm. Näyte on joko täysin kuivaa tai siitä on selvitetty sen kosteuspitoisuus. Vähintään 1 gramma näytettä levitetään tasaisesti astialle, jonka jälkeen astia siirretään kylmään uuniin. Tämän jälkeen uunin lämpötilaa nostetaan 250 °C:een 30–50 minuutin kuluessa ja lämpötila pidetään vakiona 60 minuuttia. Haihtuvien aineiden poistuttua, lämpötila nostetaan 550 ± 10 °C 30 minuutin ajassa, ja näytettä pidetään tässä lämpötilassa 120 minuuttia. Mikäli palaminen ei ole ollut täydellistä,

täytyy näytteen palamista jatkaa 30 minuutin aikajaksoissa, kunnes massan muutos on vakiintunut. Näytteen tuhkapitoisuus lasketaan kaavalla 5.

$$M_{ar} = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \times \frac{100}{100\text{-}M_{ad}} \tag{5}$$

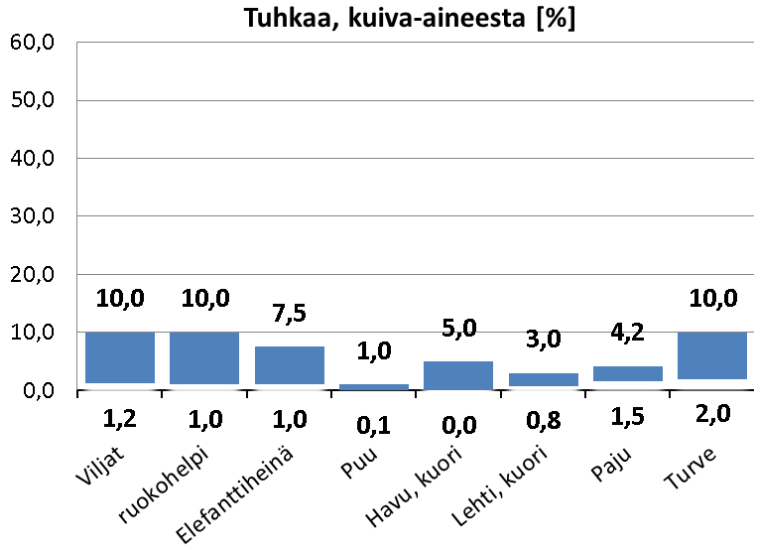
, missä $m_1$ on näytteen massa alkutilanteessa, g

$m_2$ on tuhkan massa, g

$m_{ad}$ on näytteen kosteuspitoisuus analyysitilassa standardin EN 1774 -3 mukaisesti, %

### 4.6.2 Tuhkamäärien vertailu

Kuvassa 15 on esitetty polttoaineiden tuhkapitoisuuksia. Viljat sisältävät vehnän, rukiin ja ohran, jotka ovat siemenineen tai ilman. Puu sisältää sekä havu- että lehtipuut joko ilman kuorta, lehtiä tai niiden kanssa. Puumaisilla polttoaineilla tuhkapitoisuus on alhaisempi kuin heinän kaltaisilla. Puiden lehdistössä lehtipuilla tuhkapitoisuus on noin 4–5 %, haavalla noin 9 % ja havupuista männyllä noin 2 % ja kuusella 4 %. Hakkuutähteet voivat koostua suuremmaksi osaksi kuoresta ja lehdistöstä jolloin tuhkapitoisuus on puun runkoa korkeampi. (Alakangas 2000, 64).




**Kuva 15.** Kasvibiomassalla ja turpeella tuhkapitoisuudet voivat olla korkeat. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1-; Strömberg 2006)

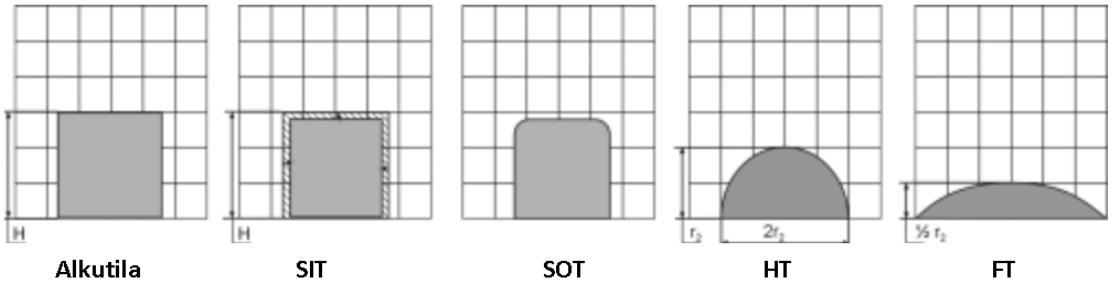
Turpeen tuhkapitoisuus kasvaa sen maatumisasteen myötä. Poltattaessa sekaisin paljon ja vähän tuhkaa sisältäviä polttoaineita samassa suhteessa, voi prosessista syntyvä tuhka koostua lähes kokonaan enemmän tuhkaa sisältävän polttoaineen tuhkasta. Mikäli halutaan vähentää ravinnerikkaan puun sisältävien alkalien ja kloorien aiheuttamia ongelmia rikin avulla, riittää jo vähäinen määrä turvetta puu polttoaineen joukossa muuttamaan polttoaineseoksen koostumusta rikki rikkaamaksi.

### 4.6.3 Tuhkan sulamispisteet

Standardissa CEN/TS-15370 sulamiskäyttäytymistä tutkitaan ottamalla standardin CEN/TS-14775 mukaisesti poltetun polttoaineen tuhkaa joka hienonnetaan, kostutetaan, puristetaan muotissa ja kuivataan. Tämän jälkeen näyte asetetaan uuniin ja lämpötila nostetaan 550 °C:een lämpötilaan tai 150 °C alle oletetun muodonmuutospisteen. Lämpötilaa nostetaan 3–5 °C minuutissa ja sulamiskäyttäytyminen selvitetään tarkkailemalla näytteen muodonmuutosta. Tuhkan sulamiskäyttäytyminen voidaan jakaa neljään vaiheeseen: muodonmuutospiste, pehmenemispiste, puolipallopiste ja juoksevuuspiste.

Muodonmuutospisteessä (beginning of sintering SIT, shrinkage starting temperature SST) partikkelit alkavat tarttumaan toisiinsa ja näyte on kutistunut pinta-alastaan 5% alkuperäisestä. Pehmenemispisteessä (beginning of softening SOT, deformation temperature DT) näyteessä ilmenee pehmenemisen merkkejä pinnan laadussa sekä sen kulmat ovat pyöristyneet. Lisäksi näytteen sisältämät kaasut alkavat purkautua näytteestä.

Puolipallopiste (hemispheric temperature HT) saavutetaan kun näyte on ottanut puolipallon muotoisen muodon. Näytteen korkeus on tällöin puolet sen leveydestä. Juoksevuuspisteessä (flowing temperature FT) näytteen korkeus on puolet puolipallopisteen korkeudesta. Kuvassa 16 ilmenee sulamiskäyttämisen vaiheet.



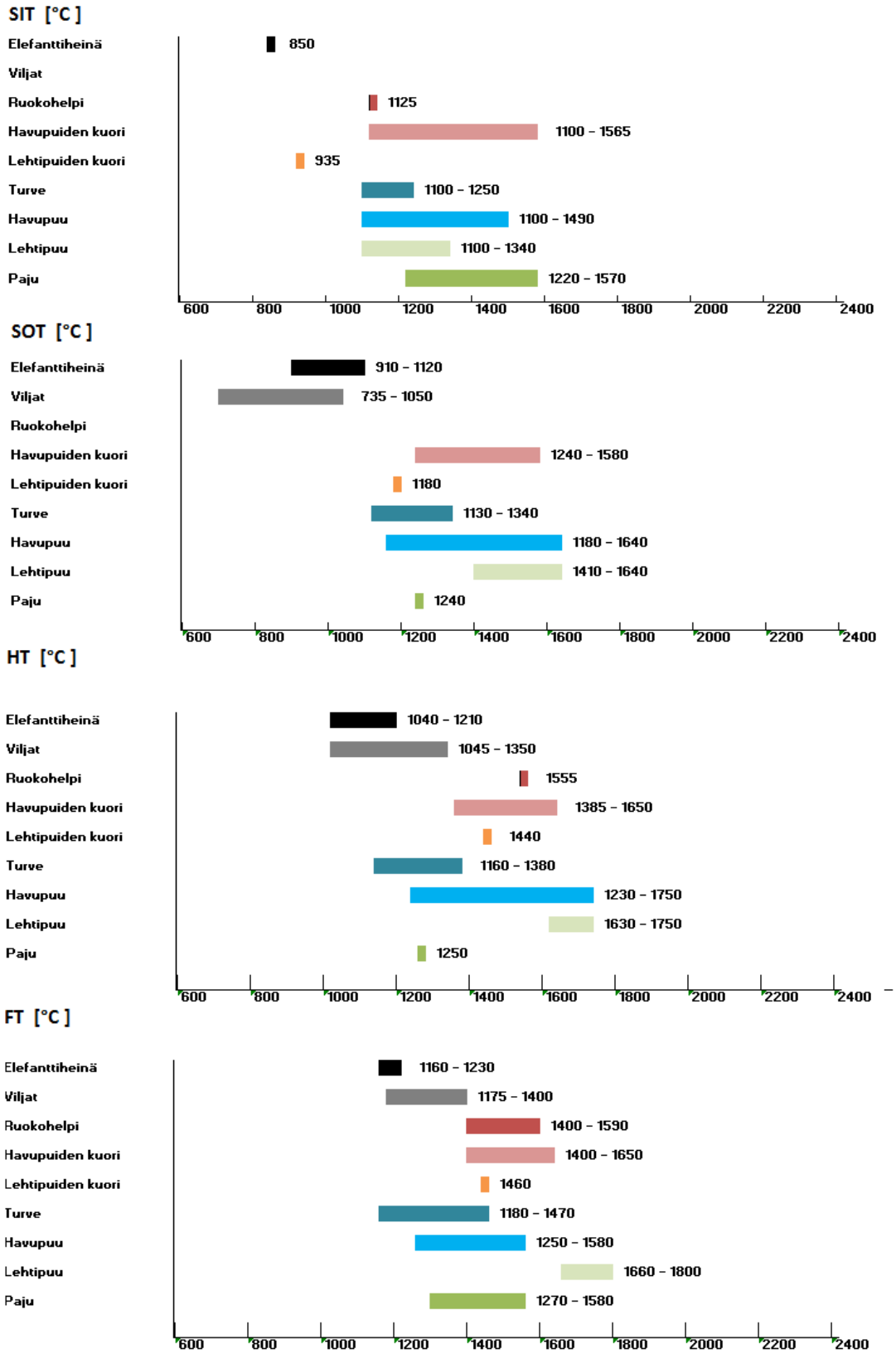

**Kuva 16.** Tuhkanäytteen sulamiskäyttäytymistä pystytään tutkimaan sen ulkomuodon muutosten avulla. (Force Technology, 2008.)

Palamisprosessissa voi vallita hapettava tai pelkistävä ilmakehä, jolloin tuhkan sulamiskäyttäytyminen voi poiketa. Standardissa ohjeistetaan käyttämään määrityksessä tapauskohtaisesti sopivampaa menetelmää. Kuvassa 17 ei arvoja ole eroteltu, johtuen menetelmillä saatavien arvojen vähäisestä poikkeamisesta toisistaan.

Koska menetelmällä arvioidaan tuhkansulamiskäyttäytymistä visuaalisesti, täytyy tuloksiin suhtautua kriittisesti. Tuhkanäytteestä ei aina voida selkeästi, tai ollenkaan, havaita eri muodonmuutospisteitä. Näytteessä voi myös tapahtua yllättäviä, nopeita muodonmuuttumisia, jotka tekevät vertailusta mahdotonta. (Wilen et al. 1996, 18) Muita menetelmiä tuhkan sulamiskäyttäytymisen tarkkailuun ovat esimerkiksi CFBA (controlled fluidised bed agglomeration) ja TGA/SDTA (thermogravimetric analysis/simultaneous differential thermal analysis), missä tarkkaillaan näytteen painon ja lämpötilan muutoksen avulla näytteessä tapahtuvien tuhkan sulamista ja näytteen sisältämien yhdisteiden välisiä kemiallisia reaktioita.

### 4.6.4 Tuhkien sulamispisteiden vertailu

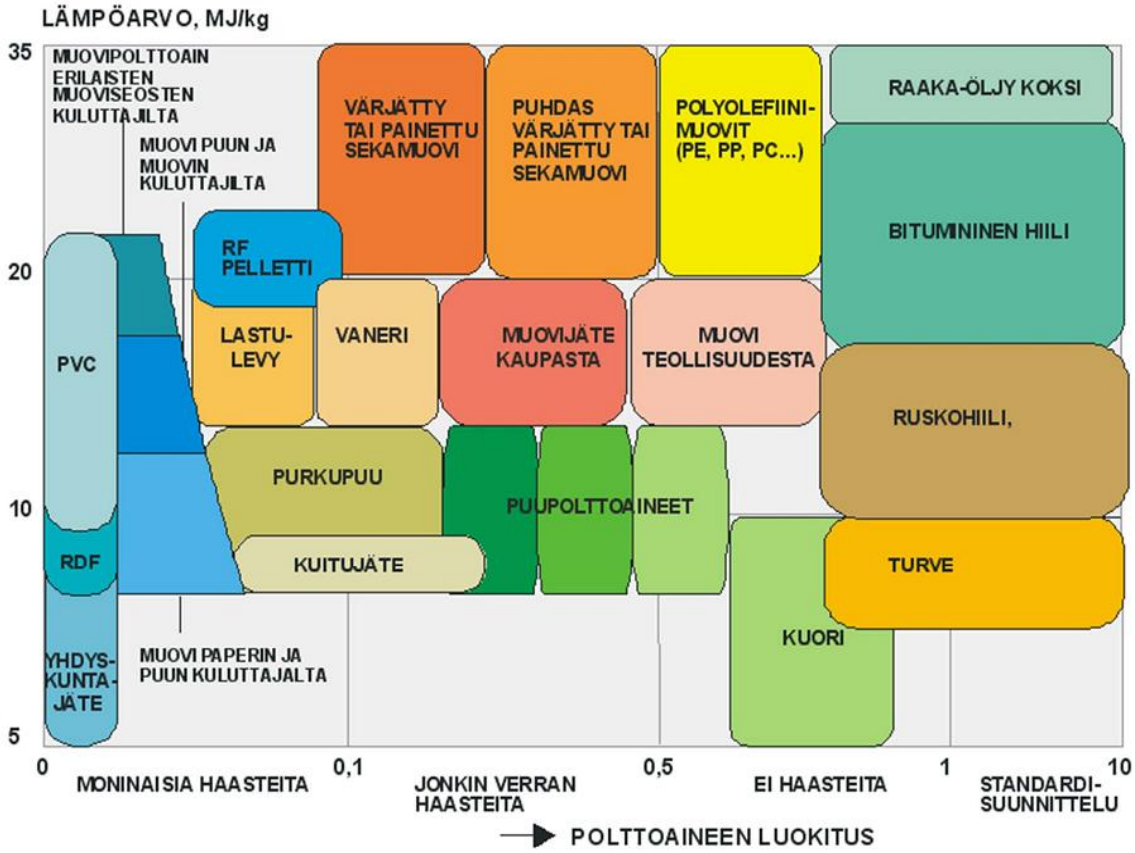
Tuhkien sulamislämpötilat on esitelty kuvassa 17. Lähes kaikilla tarkasteltavilla kasvibiomassoilla, poikkeuksena ruokohelpi, tuhkansulamisarvot ovat matalat. Ruokohelven arvot vastaavat puumaisten polttoaineiden tuhkan sulamislämpötiloja. Pajun tuhkan sulamispisteet ovat keskimääräisesti alhaisempia kuin havu- ja lehtipuiden.




**Kuva 17.** Tuhkan sulamispisteet ovat kasvibiomassoilla alhaisempia. (Alakangas 2000; Biodat 2012; BioBank 2012; Biolex 2012; Phyllis 2012; SFS-EN 14961-1; Strömberg 2006)

# 5 BIOPOLTTOAINEIDEN KÄYTETTÄVYYS

Kuvassa 18 polttoaineet on jaoteltu Foster Wheeler Energia Oy:n mukaan polttoaineiden alemman lämpöarvon sekä käytettävyyden mukaan. Käytettävyyden kriteereinä ovat mm. polttoaineiden likaavuus, tuhkan sulamiseen liittyvät ongelmat, käsiteltävyys, päästöt ja korroosio-ongelmat. Korkeat kloori- ja alkalipitoisuudet ovat keskeinen ongelma ravinnerikkailla puupolttoaineilla ja erityisesti peltobiomassoilla. Turpeen rikki ja alumiinisilikaatit reagoidessaan edellä mainittujen alkuaineiden kanssa vähentävät poltossa aiheutuvaa korroosiota ja likaantumista. Kuorta ja turvetta ei pidetä kovinkaan ongelmallisina polttoaineilla. (Flyktman et al. 2011, 33-34)




**Kuva 18.** Polttoaineen luokittelua lämpöarvon ja käytettävyyden mukaan. (Flyktman et al. 2011, 34)

## 5.1 Kosteus

Polttoaineen kosteuspitoisuus vaikuttaa suoraan lämpöarvoon alentavasti. Suuri kosteuspitoisuus voi myös laskea palamisen lämpötilaa, aiheuttaa epätäydellistä palamista ja lisätä savukaasujen määrää siten alentaen voimalaitoksen hyötysuhdetta. Lisäksi suurten kosteuspitoisuuksien on todettu hidastavan haihtuvien aineiden irtoamista polttoaineesta ja siten hidastavan polttoaineen palamista. (Strömberg 2006, 27) Savukaasuvirran kasvamisen myötä voi myös eroosio voimistua ja savukaasupuhallinten kapasiteettirajat ylittyä. (Flyktman et al. 2011, 37)

Kosteus vaikuttaa myös polttoaineen säilyttävyyteen. Mikäli biomassan joukossa on viherainesta tai muuta vastaavaa ravinteikasta massaa, voi polttoaineen joukkoon syntyä terveydelle haitallista homekasvustoa. Tällöin biomassassa tapahtuu myös hajoamista aiheuttaen ainehävikkiä. Vasta alle 25 % kosteuspitoisuuden on todettu hillitsevän kyseisiä ongelmia. Hajoamisen yhteydessä vapautuu lämpöä, jolloin voi sopivissa olosuhteissa olla vaarana polttoaineen itsestään syttyminen. Suuri kosteuspitoisuus voi myös tietyillä polttoaineilla, kuten jauhetuilla pelleteillä, tehdä polttoaineesta tarttuvaa ja siten aiheuttaa tukoksia ja holvaantumista polttoaineen syöttöjärjestelmään. (Strömberg 2006, 27-30)

Kuljetuksessa suuri kosteuspitoisuus lisää kuorman massaa ja siten nostaa kuljetuskustannuksia. Lisäksi kuljetusten painorajat voivat ylittyä, jolloin kuorma täytyy jättää tilavuudeltaan vajaaksi. Kosteuspitoisuus polttoaineen varastoinnin aikana muuttuu ympäristöolosuhteiden mukaan. (Hakkila 2004)

## 5.2 Palakoko

Polttoaineen palakoot vaikuttavat suoraan siihen millä tavalla palaminen kattilassa käyttäytyy. Palamisaika on suurempi suurilla kuin pienemmillä polttoainekappaleilla. Pienen palakoon omaavat polttoainekappaleet voivat karata palamisilman mukana, vaikeuttaen päästöjen hallitsemista sekä alentaen kattilan hyötysuhdetta. (Makkonen 2000, 6) Erittäin pienet palakoot voivat myös olla ongelmallisia arinapoltossa, jossa osa polttoaineen materiaalista pääsee arinan lävitse. Polttoaineen syöttöjärjestelmissä suuret palakoot, kuten oksat ja risut, voivat aiheuttaa syötön tukkeutumista. (Impola 2002)

## 5.3 Haihtuvat aineet

Biomassoilla on keskimäärin suuri haihtuvien aineiden osuus. Haihtuvat aineet vaikuttavat siihen, millä tavalla polttoaine käyttäytyy palotilassa. Polttoaineen haihtuvuus tekee siitä myös reaktiivista. Suuren haihtuvien aineiden osuuden omaava polttoaine syttyy alhaisissa lämpötiloissa sekä palaa nopeasti ja täydellisemmin kuin vähän haihtuvia aineita sisältävä polttoaine. (Huhtinen et al. 2004, 40.) Palamisprosessi painottuu haihtuvien aineiden palamiseen eikä polttoaine kyde samalla tavalla kuin esimerkiksi kivihiili. Tämä aiheuttaa polttoaineelle pitkän liekin joka vaatii paljon palotilaa. Tällöin palotilan suunnittelussa on otettava huomioon mm. ilman erilainen jakaminen. Myös hyvä palaminen on varmistettava savukaasujen riittävällä viipymällä. (Strömberg 2006, 27; Grammelis 2011, 126)

## 5.4 Päästöt

$NO_x$-yhdisteiden muodostuu kahdella eri tavalla: joko korkeassa lämpötilassa palamisilman sisältämästä typestä tai polttoaineen typestä. Polttoaineesta johtuvat $NO_x$-päästöt ovat korkeat, mikäli polttoaine sisältää runsaasti typpeä sekä polttoaineen haihtuvien osuus on suuri. Toisaalta haihtuvien aineiden suurta määrää voidaan hyväksikäyttää kattilan suunnittelussa esimerkiksi palamisilman jakamisella ja jälkipolttimilla. $NO_x$-päästöjä ei kuitenkaan voida suoraan ennustaa polttoaineen sisältämän typen määrän mukaan vaan päästöjen määrä on tapauskohtaista. (Laaninen et al. 2008, 57; Grammelis 2011, 56-59; Loo et al. 2008, 294-269)

Kaikilla tarkasteltavilla biopolttoaineilla, varsinkin puilla, typen määrät ovat kivihiiltä alhaisemmat. Mikäli otetaan huomioon polttoaineiden lämpöarvon ja typen määrän suhde, ovat biopolttoaineet keskimäärin typpirikkaampia. Kuitenkin, mikäli polttoprosessissa ei ole low-$NO_x$-polttimia, tulipesän jäähdytystä, yläilmajärjestelmiä tai muita teknisiä ratkaisuja $NO_x$-päästöjen vähentämiseksi, on esimerkiksi puupolttoaineiden $NO_x$-päästöt kivihiiltä matalammat. Myös muiden biopolttoaineiden typenoksidipäästöt, turvetta lukuun ottamatta, voidaan tällöin olettaa kivihiiltä matalammaksi. (Laaninen et al. 2008,57; Grammelis 2011, 56-59; Loo et al. 2008, 294-269)

$SO_x$-päästöt biopolttoaineilla ovat matalammat kuin kivihiilellä, johtuen pienemmästä rikin määrästä polttoaineessa. Lisäksi biopolttoaineiden sisältämä Ca mahdollistaa rikkioksidin ($SO_2$) ja rikkitrioksidin ($SO_3$) kalsiumsulfaattien muodostumisen siten vähentäen $SO_x$-päästöjä. (Veijonen et al. 2003, 22) Huomioitavaa on turpeen ja elefanttiheinän pieni Ca:n ja S:n suhde, jolloin näillä polttoaineilla on olettavasti muita polttoaineita korkeammat $SO_x$-päästöt.

Yleisesti biopolttoaineilla $N_2O$-päästöt ovat matalat. Biopolttoaineiden korkeampi typen ja hapen suhde vähentää $N_2O$ muodostumista palamisprosessissa. Lisäksi Ca, K ja Na toimivat katalyytteinä reaktioissa, joiden avulla dityppioksidin ($N_2O$) muodostuminen vähenee. (Veijonen et al. 2003, 22; Grammelis 2011, 142)

## 5.5 Raskasmetallit

Raskasmetalleiksi laskettavista olevista 60 alkuaineesta eliöille haitallisimpia ovat elohopea, lyijy sekä kadmium. Raskasmetallit käyttäytyvät kattilassa eri tavoin, jotkut näistä alkuaineista omaavat taipumusta rikastua lentotuhkaan ja pienhiukkasiin, kun taas toiset pysyvät kaasumaisena faasina. Raskasmetallit voivat myös kerääntyä pohjatuhkaan tai kattilan pinnoille. Raskasmetalleista erittäin likaavia ja korrodoivia ovat lyijy ja sinkki. (Raiko et al. 2002, 378; Alakangas 2000, 113; Makkonen 2000, 9)

Savukaasujen raskasmetallipäästöt riippuvat siitä, kuinka hyvin pienhiukkaset saadaan suodattimilla erotettua. Pienhiukkasten määrä savukaasuissa on yleensä suuri käytettäessä biopolttoaineita. Tämä johtuu mm. palamattomista aineista kuten Ca, Mg, Si, P ja Al. (Grammelis 2011, 144)

## 5.6 Tuhka

Kattilan pintojen likaamisen lisäksi voi tuhka muodostaa tukkivia kertymiä, jotka voivat myös olla syövyttäviä. Kovat tuhkapartikkelit voivat myös aiheuttaa eroosiota. Suuret tuhkamäärät johtavat suurempiin tuhkan käsittely- ja kuljetuskustannuksiin. Tuhka myös alentaa suoraan polttoaineen lämpöarvoa. (Makkonen 2000, 5)

### 5.6.1 Tuhkan likaaminen ja sulaminen

Tuhka voi tarttua kattilan pintoihin ja muodostaa kerrostumia. Nämä kerrostumat voivat johtaa lämmönjohtavuuden heikentymiseen, korroosio-ongelmiin tai aiheuttaa tukoksia estäen esimerkiksi ilman syötön kattilaan. Tuhkapartikkelien yhteentarttumista, sintraantumista, voi tapahtua myös alle sulamislämpötilojen. (Huhtinen et al. 2004, 41)

Tuhkan aiheuttama pintojen likaantuminen alkaa pienten partikkelien muodostamasta kerroksesta. Näiden partikkeleiden siirtyminen pintaan tapahtuu kemikaalireaktioiden, kondensoitumisen tai partikkelin kylmemmän ja lämpimämmän osan erosta johtuvan voiman johdosta. Alkalit, kloori ja rikki helposti haihtuvina muodostavat kondensoituessaan kattilan pinnoille tahmean pinnan, johon tuhkapartikkelit sitten liikemääräisesti helposti tarttuvat. (Theis 2006, 25; Thomas et al. 1995, 69)

Liikemääräinen tarttuminen tapahtuu kun tuhkapartikkeli lähestyy pintaa, jolloin sillä on mahdollisuus joko osua pintaan tai ohittaa pinta kulkeutuen savukaasujen mukana. Tämä riippuu partikkelin massasta. Mikäli liikemäärä on niin suuri, ettei partikkeli mukaudu savukaasujen virtauksen muutokseen, eriytyy se silloin partikkelivirrasta ja osuu pintaan. Tämän jälkeen partikkelilla on mahdollisuus joko tarttua pintaan tai kimmoutua siitä. Tarttumisen määrää se, millaisen pinnan partikkeli kohtaa ja kuinka sulana partikkeli on. Liikemääräinen tuhkan kerääntyminen korostuu sen jälkeen, kun pinnalle on jo muodostunut pienemmistä partikkeleista koostuva kerääntymä. Mikäli partikkeli ei pintaan osuessaan tartu, aiheuttaa se tällöin eroosiota. (Theis 2006, 25; Thomas et al. 1995, 69)

Tuhkan likaantumis- ja sulamiskäyttäytymistä pyritään ennustamaan sulamislämpötilojen sekä ainesisällön perusteella, mutta näiden pohjalta ei voida luoda varmoja ennustusmalleja. Yleensä natriumin, kaliumin, kloorin ja rikin suurilla pitoisuuksilla on havaittu olevan yhteys tuhkan likavuuteen. (Raiko et al. 2002, 128) Turpeessa kalium, natrium ja kalsium ovat sitoutuneet mineraalisina silikaatteina sekä alumiinisilikaatteina, jolloin niiden sulamispisteet ovat korkeat eivätkä ne siten ole yhtä ongelmallisia. (Flyktman et al. 2011, 86). Likaantumista on vaikea ennustaa johtuen mm. polttoaineiden sekä kattiloiden polttoprosessien ja geometrian vaihtelevuudesta. (Theis 2006, 25)

### 5.6.2 Tuhkan hyötykäyttö

Hyödynnettävästä tuhkasta suurin osa on puun ja turpeen poltossa syntyvää tuhkaa. Puun ja turpeen tuhka seoksen hyötykäyttö Suomessa on noin 30 prosenttia. Hyötykäyttökohteita ovat mm. maanrakentaminen, kaatopaikkatiivistäminen, tienrakentaminen ja metsätuhkalannoitus. Partikkelikoot vaikuttavat siihen, mihin rakentamisen kohteeseen tuhkaa voidaan käyttää hyödyksi. Turve-puutuhka seoksen partikkelikoko on hienon hiekan ja siltin kaltainen ja se on hieman karkeampaa kuin kivihiilen tuhka. (Korpijärvi et al. 2009, 23, 43)

Metsälannoittamisessa annetaan puun sisältämien ravinteiden jatkaa luonnollista kiertokulkuaan metsässä. Mikäli tuhka koostuu puu-turve -seoksesta, saattavat sen ravinnearvot olla liian alhaiset. Riittävä puun osuus parantaa ravinteiden määrää tuhkassa. Tuhkan rakeistuksen yhteydessä voidaan lisätä tarvittavia hivenaineita. (Räisänen 2009; Rinne 2007; Anttila 2008)

Biomassan poltossa syntyvä tuhkan laatu on vaihtelevaa, ja siihen vaikuttavat polttotekniset muuttujat, kuten lämpötila, palamisnopeus, polttoaineen laadun vaihtelu, hapen säätö, syöttötapa, kattila ja tuhkan talteenottojärjestelmät. Eri partikkelikokojen määrässä voi ilmetä huomattavia eroavaisuuksia riippuen tuhkan erästä. Tuhkille on myös asetettu raja-arvoja riippuen niiden käyttökohteesta. Polttoaineen laadun vaihtelevuus aiheuttaa raja-arvojen saavuttamiseksi vaikeuksia. (Korpijärvi et al. 2009, 16, 35, 72)

## 5.7 Kuumakorroosio

Biopolttoaineet ovat yleensä fossiilisia polttoaineita enemmän korrodoivia. Palamisprosesissa biopolttoaineen sisältämät kloori ja alkalimetallit reagoivat muodostaen korroosiota aiheuttavia yhdisteitä. Korrodoivien yhdisteiden vaikutukset riippuvat muun muassa vallitsevista olosuhteista, yhdisteitä sitovista aineista ja suojaavien kerrosten syntymisestä. (Auerkari et al. 1995) Fossiiliset polttoaineet sisältävät myös alkaleja, mutta ne ovat silikaatteina, jolloin niiden sulamispisteet ovat korkeammat. (Salmenoja 2000; Henderson et al. 2006)

Biopolttoaineissa alkalit ovat suurimmaksi osaksi kaliumia. Kalium muodostaa yhdessä kloorin kanssa kaliumkloridia, joka kondensoituessaan muodostaa kattilan pinnalle alkalisuoloja. Nämä alkalisuolat sisältävät rautaa ja muita metalliseoksia pinnan materiaalista. Myös natrium voi yhdessä kloorin kanssa luoda korrodoivia yhdisteitä mutta natriumkloridin sulamislämpötila on kaliumkloridia korkeampi. (Salmenoja 2000; Henderson et al. 2006)

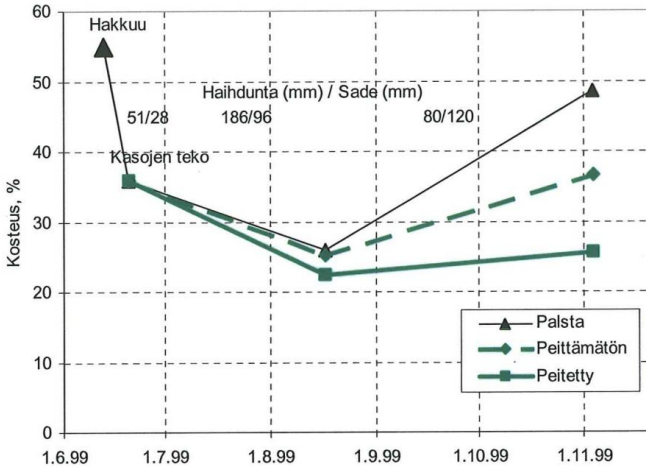
Eräs tapa estää kaliumkloridin aiheuttamat korroosio-ongelmat on lisätä polttoaineen rikkipitoisuutta, kuten lisäämällä turvetta polttoaineen joukkoon. Rikki muodostaa yhdessä hapen kanssa rikkidioksidia ($SO_2$) joka puolestaan reagoi kaliumkloridin (KCl) kanssa siten muodostaen kaliumsulfaattia ($K_2SO_4$). Tällöin kloori voi sitoutua vedyn kanssa vetykloridiksi (HCl). Vetykloridi ei aiheuta vastaavia ongelmia korroosiossa kuten kaliumkloridi. (Sandberg et al. 2010) Poltettaessa pelkästään paljon klooria sisältäviä polttoaineita, pystytään kuumakorroosiota välttämään rajaamalla höyryn lämpötilaa (Makkonen 2000, 10).

## 5.8 Korjuu ja väliaika varastointi

Peltobiomassoilla niiton sekä korjaamisen ajankohdalla on vaikutusta mm. kosteus- ja ravinnearvopitoisuuksiin. Mikäli sato jätetään sateen huuhdottavaksi, laskevat kloori- ja alkalipitoisuudet. Tavallista myöhempään korjatun viljasadon klooripitoisuuksien on havaittu laskeneen neljäs osaan. (Alakangas 2000, 99) Monivuotisilla kasvibiomassoilla talven aikana ravinteet siirtyvät juuristoon ja tällöin kosteus ja haitallisten aineiden, kuten kloorin, määrät ovat keväällä korjattuna syksyä pienemmät. Esimerkiksi elefanttiheinällä talvi aiheuttaa sadossa katoa 30-50 %, mutta korjuu kannattaa silti tehdä keväällä. (Pahkala et al. 2005; Scurlock 1999)

Energiapuun kohdalla (hakkuutähteet ja pienpuut) on havaittu että hyvissä olosuhteissa varastokasojen hakkuutähteet kuivuvat kahden ensimmäisen kuukauden aikana 14-20 prosenttiyksikköä. Syksyllä sateet nostattavat kosteuspitoisuuksia mutta tätä voidaan estää suojaamalla pinot peittopaperilla. Peitettyjen pinojen kosteuspitoisuus on peittämättömään verrattuna 10-15 prosenttiyksikköä alhaisempi (kuva 19). Pienpuiden suojaamisella ei saavuteta vastaavaa hyötyä vaan kosteus on ilman suojausta jäävään varastointiin 6 prosenttiyksikköä alhaisempi. Kosteuspitoisuuteen vaikuttaa myös

varastoidaanko puuainesta varjossa vai avoimella palstalla. Avoimessa varastoiduilla pienkokopuilla kosteusprosentti on noin 7-17 prosenttiyksikköä alhaisempi verrattuna varjossa vastoituihin. Varastoinnin aikana kuivuneesta puusta irtoavat neulaset vähentävät puun sisältämien alkalien ja kloorin määriä. Kloorin määrä hakkuutähteillä putoaa tällöin noin puoleen. (Hillebrand 2005)




**Kuva 19.** Kesäkuussa suoritetun hakkuun jätteiden kosteuden muutos eri varastointi menetelmillä. Syksyn sateiden varalta voidaan hakkuutähteet peittää peittopaperilla. (Hillebrand 2005)

## 5.9 Polttoaineiden vastaanotto ja paloturvallisuus

Biomassat voivat vaatia erityisiä käsittely- ja syöttöjärjestelmiä. Polttoaineen mukana voi tulla sinne kuulumatonta materiaalia kuten kiviä, muovia ja metallia. Näitä vierasperäisiä esineitä voidaan seuloa mm. ääneen perustavalla tutkalla ja magneettierottimella. Polttoaine tai osa siitä voi sisältää ylisuuria kappaleita, jolloin joudutaan käyttämään murskainta sopivan palakoon saavuttamiseksi. Peltobiomassoista tehdyt paalit joudutaan myös murskaamaan ennen niiden käyttöä.

Varastoitaessa orgaanista materiaalia voi sopivissa olosuhteissa syttyä tulipalo itsekseen. Tähän vaikuttavat mm. lämpötila, aika ja kosteus. Kostea polttoaine luo suotavat olosuhteet kytöpalon synnylle. Tällaisten kytöpalojen havaitseminen on vaikeaa. Muita mahdollisia palon synnyttäjiä ovat esimerkiksi kuumat laakerit, kattilan takatuli, mekaaninen kitka ja iskukipinät. (Hakala 2007, 18-20)

Polttoaineisiin liittyy tulipalovaaran lisäksi myös räjähdysvaara. Pölyävä polttoaine voi aiheuttaa räjähdysmäisesti etenevän tulipalon. Paloräjähdyksen mahdollisuus riippuu ympäristön olosuhteista, kuten paineesta, pölypitoisuudesta, lämpötilasta sekä vallitsevan kaasun ominaisuuksista. Materiaalin pölynräjähtävyyden merkittävimmät tekijät ovat hiukkaskoko sekä kosteus. (Weckman 1986, 29) Polttoaineen vastaanoton turvallisuuden takaamiseksi vastaanotto suoritetaan irrallisessa vastaanottoasemassa, joka on eristetty polttoainepölyn leviämisen estämiseksi sekä sisältää ilmastoidun pölynpoistojärjestelmän (Hakala 2007, 18-20).

# 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tarkoituksena oli saada kattava kuva Suomessa käytettävistä kiinteiden biopolttoaineiden ominaisuuksista. Polttoaineita tarkasteltiin niiden käytettävyyden kannalta, johon vaikuttavat esimerkiksi lämpöarvo, kosteus, haihtuvien aineiden määrä, tiheys, alkuainesisältö ja tuhkan käyttäytyminen palamisprosessissa.

Vertailtavien polttoaineiden kalorimetriset lämpöarvot ovat noin 17:stä 23:een MJ/kg:n. Turpeella ja puuperäisillä polttoaineilla ligniinin, selluloosan ja hemiselluloosan tukiaine, pitoisuudet ovat peltobiomassoja korkeampia. Tällöin niiden hiilipitoisuus on korkeampi ja siten myös niiden lämpöarvokin on parempi. Turpeen ominaisuudet vaihtelevat paljon geologisen sijainnin ja maatumisasteen mukaan.

Polttoaineisiin sitoutunut kosteus alentaa lämpöarvoa huomattavasti. Polttoaineiden kosteudet saapumistilassa vaihtelevat lähes kuivasta (mm. peltobiomassat, sahanpuru, puupelletit) noin 60 prosentin kosteuspitoisuuksiin (puupolttoaineet, turve). 60 prosentin kosteudessa polttoaineen tehollinen lämpöarvo voi olla kolmanneksen kalorimetrisestä lämpöarvosta. Polttoaineiden kosteus voi vaihdella huomattavasti varastointiolosuhteiden ja korjuun ajankohdan mukaan. Varastointi- ja korjuuaika vaikuttavat myös polttoaineiden ravinteiden määrään. Varastoinnin aikana sadevedet liuottavat alkaleita ja klooria polttoaineesta. Metsätähteet myös tiputtavat ravinnepitoiset neulaset kuivuessaan pois. Kasvien ravinnemäärät ovat alhaisimmillaan keväällä jolloin ravinteet ovat sitoutuneet juuristoon.

Haihtuvien aineiden määrä polttoaineessa on korkea ja se vaihtelee noin 60 ja 80 prosentin välillä. Kasvibiomassoilla haihtuvien aineiden määrä on keskimääräisesti alhaisempi. Turpeella haihtuvien osuus polttoaineessa vähenee maatuneisuusasteen myötä. Haihtuvien määrä vaikuttaa polttoaineen käyttäytymiseen palamisprosessissa. Suuri haihtuvien aineiden osuus polttoaineessa tekee siitä reaktiivista. Tällainen polttoaine syttyy alhaisissa lämpötiloissa, palaa nopeasti, synnyttää pitkän liekin ja palaa täydellisemmin kuin vähän haihtuvia aineita sisältävä polttoaine.

Kasvibiomassoilla on huomioitavaa niiden tuhkan alhaiset sulamislämpötilat, tuhkan likaavuus ja alhainen energiatiheys. Tuhkan alhaiset sulamislämpötilat, suuret tuhka-,

kloori- ja alkalipitoisuudet voivat aiheuttaa toimilaitteiden tukkeutumisia, korroosiota sekä heikentää lämmönsiirtymistä. Kasvibiomassoja ei käytetä yksistään ainoana polttoaineena vaan niitä poltetaan pienessä määrissä muiden polttoaineiden joukossa, kuten turpeen kanssa. Turpeen rikki ja alumiinisilikaatit vähentävät alkalien ja kloorin aiheuttamia likaantumis- ja korroosio-ongelmia. Kuitenkin täytyy huomioida, ettei pelkästään polttoaineen ainesisällön perusteella pysty täysin päättelemään kuinka sopiva polttoaine on polttoprosessiin.

Biopolttoaineiden ominaisuudet vaihtelevat mm. lajin, maaperän, geologisen sijainnin, sääolosuhteiden, varastoinnin, lannoituksen, korjuun ajankohdan sekä menetelmien mukaan. Verrattaessa biopolttoaineita kivihiileen, tyypillisiä eroavaisuuksia ovat suuri haihtuvien määrä, alhainen hiilipitoisuus ja korkea happipitoisuus. Myös kloori ja alkali pitoisuudet ovat suuret. Alhaisen hiilipitoisuuden johdosta myös biopolttoaineiden lämpöarvo on alhaisempi.

# Lähteet


Alakangas E., 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. 172 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2045. ISBN: 951-38-5699

Anttila Hanna-Kaisa. 2008. Polttoainekoostumuksen vaikutus lentotuhkan laatuun ja hyötykäyttömahdollisuuksiin UPM-kymmene OYJ:n Kaukaan tehtailla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT Energia. Jämsäkoski.

Auerkari, Pertti et al. 1995. Soodakattilan tulistinmateriaalien kestävyys paine- ja ympäristökuormituksissa. Espoo 1995. VTT Julkaisuja 802. 25 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo. ISBN 951-38-4510-9.

Biobank, 2012. Biomass database. [verkkojulkaisu] Bioenergiesysteme GmbH, Austria. Saatavilla: http://www.ieabcc.nl/database/biobank.html

Biodat, 2012. Biomass database. [verkkojulkaisu] ECN-Biomass. Saatavilla: http://www.biodat.eu/pages/search.aspx

Biolex, 2012. Biolex database. [verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.biolexbase.dk/menu.php

Demirbas A. 1999. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. 6 s. Department of Science Education. Karadeniz Technical University. Saatavilla: www.elsevier.com/locate/enconman

Force Technology, 2008. BIOLEX database of solid biomass fuels. [Verkkojulkaisu] Saatavilla http://biolex.dk-teknik.dk/cms/site.aspx?p=4732

Flyktman M., Kärki J., Hurskainen M., Helynen S., Sipilä K. 2011. Kivihiilen korvaaminen biomassoila yhteistuotannon pölypolttokattiloissa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT tiedotteita 2595. ISBN: 978-951-38-7779-8 Saatavilla: http://www.vtt.fi/publications/index.js

Flyktman M., 1998. Ruokohelven seospoltto turpeen ja puun kanssa. 36 s.VTT Energia. Tutkimusselostus ENE33/T0123/98.

Grammelis P. 2011. Solid biofuels for energy. 96 s. Centre for Research and Technology Hellas (CERTH). Institute for Solid Fuels Technology and Applications (ISFTA). Greece ISBN 978-1-84996-392-3

Hakala K., Hannukkala A., Huusela-Veistola E., Peltonen-Sainio P., 2010. Kasvintuotannon tutkimus. MTT. Saatavilla www.smts.fi/jul2010/poste2010/176.pdf

Hakala Timo. 2007. Voimalaitosten polttoaine prosessisuojaus. [Verkkojulkaisu] Saatavilla: www.promaint.net/downloader.asp?id=2889&type=1

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999-2003. Metsähakkeen tuotantoteknologia loppuraportti. 136 s. VTT Prosessit. TEKES. ISBN: 952-457-150-1

Henderson P. et al. 2006. Reducing superheater corrosion in wood-fired boilers. Materials and corrosion 2006, 57, No. 2. Vattenfall Utveckling AB. Swedish Institute for Metals Research. [verkkodokumentti]. Saatavissa: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/maco.200503899/abstract

Hillebrand K., Kouki J. 2005. Pilkkeen kuivaus ja laadun hallinta. Projektiraportti. 41 s. PRO2/P2068/05

Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P., Pakkanen H. 2004. Höyrykattilatekniikka. 379 s. ISBN-10: 9513733602

Impola, R. 2002. Metsähakkeen laatukartoitus. 42 s. VTT Prosessit. Projektiraportti PRO21/T6505/02.

Korpijärvi Kirsi et al. 2009. Energiatuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. VTT Tiedotteita 2499. Helsinki. 75s. ISBN 978-951-38-7318-9

Laaninen V., Heinolainen A., Heikkilä J., Savolainen K. 2008. Typpipäästöt alas voimalaitoksissa. Saatavilla: www.promaint.net/downloader.asp?id=2955&type=1

Lindblad J., Verkasalo E., 2001. Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva-tuoretiheys ja paino- mittauksen muuntokertoimet. Metsätieteen aikakauskirja tutkimusartikkeli. Saatavilla www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff01/ff013411.pdf

Loo S., Koppejan J., 2008. The handbook of biomass combustion and co-firing. 465 s. Earthscan. London. ISBN: 978-1-84407-249-1

Maataloustilastot. 2012. Maatilojen sadonkäyttö. [Verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.maataloustilastot.fi/maatilojen-sadonk%C3%A4ytt%C3%B6-2010-2011_fi

Maa- ja metsätalousministeriö. 2006. Energiakasvien viljely lisääntyy. [Verkkojulkaisu] Saatavilla:http://www.mmm.fi/fi/index/luonnonvarayhteistyo/uutiset/060803_energia.html

Makkonen P. 2000. Huonolaatuisten polttoaineiden poltto leijukattiloissa. Foster Wheeler. [verkkojulkaisu] Saatavilla: koti.mbnet.fi/ppom/PDF/Kemia97.pdf

Metla. 2012. Metsätilastollinen vuosikirja. [Verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2011/vsk11_09.pdf

Paappanen T., Lindh T., Kärki J., Impola R., Rinne S. 2008. 7 s. Ruokohelven tuotanto- ja toimitusketju ja käyttöpolttoaineena voimalaitoksissa. Saatavilla: www.smts.fi/mpol2008/index_tiedostot/Esitelmat/es040.pdf

Pahkala K., Isolahti M., Partala A., Suokannas A., Kirkkari A., Peltonen M., Sahramaa M., Lindh T., Paappanen T., Kallio E., Flyktman M., 2005. Ruokohelven viljely ja korjuu energian tuotanto varten. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. 33 s. ISBN: 951-729-942-7

Phyllis, 2012. Combosition of biomass and waste. [verkkojulkaisu] Energy research Centre of the Netherlands. Saatavilla: http://www.ecn.nl/phyllis/DataTable.asp

Polli Horticultural Research Centrer. 2012. [Verkkojulkaisu] Saatavilla http://polli.emu.ee/index.php?sub=energiapaju

Raiko risto (toim.) et al. 2002. Poltto ja palaminen. 750 s. Jyväskylä. ISBN: 951-666-448-2

Rinne Samuli. 2007. Biopolttoaineiden tuhkaa lannoiteeksi. [verkkoartikkeli] Motiva & VTT. Saatavissa: www.motiva.fi/files/3052/Biopolttoaineiden_tuhkaa_lannoitteeksi.pdf

Rintala J., Alen R., Lund P., Sipilä K., Nytönen T., Turpeinen H., Lahti-Nuuttila T., Pietola K., Helynen S. 2007 Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa. Asijantuntijatyöryhmän raportti. 94 s. Saatavilla:http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/all/D63221D46DD9F4CCC22572B100424FE9?opendocument

Räisänen Mikko. 2009. Biovoimalan tuhkat hyötykäyttöön lähiseudulla. [verkkoartikkeli]. Uusiouutiset. Saatavissa: www.uusiouutiset.fi/pdf/uu2009_7_s06-07.pdf

Salmenoja Keijo. 2000. Field and laboratory studies on chlorine-induced superheater corrosion in boilers fired with biofuels. Academic Dissertation. Åbo Akademi, Faculty of Chemical Engineering, Process Chemistry Group. Report 00-1.

Scurlock J. M. O. 1999. Miscanthus: A Review of European Experience with a Novel Energy Crop. 22 s. Oak Ridge National Laboratory. ORNL/TM-13732 Saatavilla: www.p2pays.org/ref/17/16283.pdf

Spectrum analytic. 2012. Agronomic library. [Verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.spectrumanalytic.com/support/library/ff/Mn_Basics.htm

Strömberg B. 2006. Fuel handbook. Miljö- och förbränningsteknik 971. 105 s. Vattenfall AB. Stockholm. ISSN: 0282-3772

Suomen energiapaju Oy. 2009. Energiapajun viljelyopas. 14 s. Saatavilla http://www.suomenenergiapaju.fi/images/Energiapajun_viljelyopas_2009.pdf

Theis Mischa. 2006. Interaction of biomass fly ashes with different foulind tendencies. 158 s. Åbo akademi. Finland. ISBN 952-12-1730-8

Thomas R., Baxter L., Bryers R., Jenkins B., Oden L. 1995. Alkali deposits found in biomass power plants. 122 s. U.S Department of energy. National renewable energy laboratory. NREL/TP-433-8142

Tilastokeskus. 2012. Energiankulutus 2010. [Verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.stat.fi/til/ekul/2010/ekul_2010_2011-12-13_tie_001_fi.html

Turveinfo. 2012. Suon ja turpeen kehitys. [Verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.turveinfo.fi/ajankohtaista/videot/suon-ja-turpeen-kehitys

Vakkilainen Esa. 2012. Professori. LUT Energia. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Suullinen tiedonanto. 7.2.2012

VAPO, 1998. Biopolttoaineet. [verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.vapo.fi/fin/kunta_ja_yritysasiakkaat/biopolttoaineet/?id=42

Veijonen K., Vainikka P., Järvinen T., Alakangas E. 2003. Biomass co-firing an efficient way to reduce greenhouse gas emissions. 28 s. VTT Processes. Saatavilla: http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/bioenergy/2003_cofiring_eu_bionet.pdf

Weckman Henry. 1986. Kotimaisten polttoaineiden turvallinen tuotanto ja käyttö. VTT tutkimuksia 448. Espoo. ISBN: 951-38-2734-8

Wilen C., Moilanen A., Kurkela E. 1996. Biomass feedstock analyses. 28 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT publications 282. ISBN: 951-38-4940-6

Tilastokeskus. 2012. Energiankulutus 2010. [Verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.stat.fi/til/ekul/2010/ekul_2010_2011-12-13_tie_001_fi.html