

Eija Alakangas

# Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia





# Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia

Eija Alakangas

VTT Energia



ISBN 951-38-5699-2 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5740-9 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © Eija Alakangas & Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2000

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energian tuotanto, Koivurannantie 1, PL 1603, 40101 JYVÄSKYLÄ  
puh. vaihde (014) 672 611, faksi (014) 672 597

VTT Energi, Energiproduktion, Koivurannantie 1, PB 1603, 40101 JYVÄSKYLÄ  
tel. växel (014) 672 611, fax (014) 672 597

VTT Energy, Fuel Production, Koivurannantie 1, P.O.Box 1603, FIN-40101 JYVÄSKYLÄ, Finland  
phone internat. + 358 14 672 611, fax + 358 14 672 597

Kansikuva: Puupolttoaineita, kivihiiltä, turvetta, kierrätyspolttoaineita ja peltobiomassoja.

Toimitus Leena Ukskoski

Tekstinvalmistus Arja Grahn

Otamedia Oy, Espoo 2000

Alakangas, Eija. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia [Properties of fuels used in Finland]. Espoo 2000. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2045. 172 s. + liitt. 17 s.

**Avainsanat** physical properties, wood fuels, peat, energy crops, coal, oils, gas, Finland, chemical composition, moisture content, density, combustion properties, calorific value, ash content, alkali metals, heavy metals

## Tiivistelmä

Julkaisussa käsitellään lämmön- ja sähköntuotantoon käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia sekä kirjallisuuden että VTT Energian analyysien perusteella. Liikenne-polttoaineita ei käsitellä.

Tärkeimmät polttoaineiden ominaisuudet, joita julkaisussa käsitellään, ovat

- lämpöarvo
- polttoaineen kemiallinen koostumus
- kosteus
- tiheys, jauhautuvuus sekä muut käsittelytekniset ominaisuudet
- tuhkapitoisuus, tuhkan sulamiskäyttäytyminen ja tuhkan koostumus
- haitallisten aineiden, kuten mm. alkalien ja raskasmetallien, pitoisuudet.

Erilaisten puuperäisten polttoaineiden, turpeen, peltobiomassojen, kierrätyspolttoaineiden, lietteiden, kivihiilen, kaasumaisten polttoaineiden sekä öljyjen ominaisuuksia esitetään vertailevina taulukoina. Aineistossa on sekä kaupallisia polttoaineita että tutkimuskohteena olevia polttoaineita (esim. ruokohelpi ja bioöljyt). Julkaisun alussa esitellään ominaisuuksien määrittämenetelmiä ja laskentakaavoja. Lisäksi julkaisussa esitetään kotimaisten polttoaineiden tuotantomenetelmiä lyhyesti sekä potentiaalitetöitä. Julkaisun lopussa ovat yhteenvetotaulukot ominaisuuksista sekä Suomessa voimassa olevat polttoaineiden laatuluokitukset.

Alakangas, Eija. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia [Properties of fuels used in Finland]. Espoo 2000. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2045. 172 p. + app. 17 p.

**Keywords** physical properties, wood fuels, peat, energy crops, coal, oils, gas, Finland, chemical composition, moisture content, density, combustion properties, calorific value, ash content, alkali metals, heavy metals

## Abstract

The properties of fuels used or studied in Finland have been studied in this publication based both on the literature and researches carried out at VTT Energy. The transportation fuels are not included.

The main properties of the fuels, discussed in this publication, are:

- calorific value
- chemical composition of the fuel
- moisture content
- density, grindability and other fuel handling properties
- ash content, ash melting behaviour and ash composition
- concentrations of harmful substances, such as alkali and heavy metals.

The properties of different kinds of fuels, such as wood fuels, peat, agrobiomasses, sludges, coal, gaseous fuels and oils are presented in the form of comparison tables. The material contains both commercial fuels and fuels under research (reed canary grass and bio-oils). The definitions for fuels and the properties, the analysis methods for different properties, and the formulas for calculation of the values are presented in the beginning of the publication. VTT Energy has recently studied the fuel handling properties of solid fuels in the Multi Fuel Research programme, but there is quite a little new data to be published, so much of the data presented in this publication is based on the publication "Properties of biomass and peat fuels. Handbook." written by the author. Additionally, a brief presentation is also given of the production methods of indigenous fuels, as well as the estimates of the production and utilisation potentials. At the end of the publication there are summary tables of the fuel properties, and the fuel quality classifications in force in Finland.

# Alkusanat

Tämä julkaisu on yhteenveto Suomessa käytettävien polttoaineiden keskeisistä ominaisuuksista. Julkaisun käsikirjoitus on laadittu Imatran Voima Oy:n Säätiön stipendin turvin. VTT Energia on rahoittanut painatuskulut. Julkaisuun on koottu puun, turpeen, kivihiilen, peltobiomassojen, kierrätyspolttoaineiden, lietteiden, maakaasun, biokaasun sekä ja mineraali- ja bioöljyjen ominaisuuksia kirjallisten lähteiden, laitoksien antamien tietojen sekä VTT Energian analyysilaboratorion määrittämisistä.

Ominaisuuksiin liittyviä määritelmiä on kerätty mm. puupolttoaineiden, turpeen ja kierrätyspolttoaineiden laatustandardeista sekä julkaisun lähteistä. Polttoaineiden analyysimenetelmät on kuvattu pääsääntöisesti VTT Energian käyttämien menetelmien mukaisena, joita on täydennetty muusta kirjallisuudesta saaduilla tiedoilla.

Haluan kiittää poikaani Matti Alakangasta, joka on auttanut kokoamalla polttoaineiden ominaisuuksia kirjallisuudesta Excel-tiedostoiksi (yli 200 taulukkoa, joista tähän on valittu yli 120 taulukkoa). Lisäksi haluan kiittää myös VTT Energian asiantuntijoita; Pentti Hakkilaa, Risto Impolaa, Saara Isännäistä, Juhani Juvosta, Mikko Karaa, Tuulikki Lindhiä, Antero Moilasta, Patterson McKeoughia, Anja Oasmaata, Markku Orjalaa, Jussi Rantaa, Yrjö Solantaustaa, Raili Taipaleeta, Raili Vesteristä ja Margareta Wihersaarta, jotka ovat avustaneet tietojen keruussa, lähteiden löytämisessä ja kommentoineet julkaisua. Erityisesti haluan kiittää tutkija Raili Taipaleeta, jonka pro gradu -tutkielman aineistoa puun, turpeen, kivihiilen ja peltobiomassojen ominaisuuksista on laajasti hyödynnetty myös tässä julkaisussa taulukkotietoja koottaessa (noin 50 hänen kokoamaa taulukkoa). Lisäksi kiitän kommentteista myös Tage Fredrikssonia Puuenergia ry:stä sekä Jaakko Lehtovaaraa ja Tero Vesisenahoa Vapo Oy:stä. Kivihiilen ominaisuustietoja on saatu mm. Helsingin Energialta ja seitsemältä muulta kivihiilen käyttäjältä, ja laitoksilta kerätyt tiedot on aikaisemmin julkaistu Raili Taipaleen pro gradu -työssä.

Jyväskylässä, heinäkuussa 2000

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Muuntokertoimet.....	9
Symbolit ja lyhenteet.....	10
Ominaisuuksiin liittyviä määritelmiä.....	11
Polttoaineiden määritelmät.....	17
1. Johdanto.....	23
2. Ominaisuuksien määrittäminen.....	25
2.1 Näytteenottoon liittyviä määritelmiä.....	25
2.2 Polttoaineiden ominaisuuksien määrittämismenetelmiä.....	26
2.2.1 Yleistä polttoaineiden määrittämismenetelmistä.....	26
2.2.2 Kosteuden määrittäminen.....	26
2.2.3 Lämpöarvojen määrittäminen.....	27
2.2.4 Tuhkapitoisuus, $A_d$ .....	30
2.2.5 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen.....	31
2.2.6 Kemiaaliset analyysit.....	32
2.2.7 Tilavuus ja tiheys.....	32
2.2.8 Palakoko.....	33
2.2.9 Kivihiilen jauhavuus (Hargrove-indeksi).....	33
2.2.10 Kivihiilen paisumisluku (FSI-indeksi, leipoutuvuusindeksi).....	33
3. Puupolttoaineiden ominaisuuksia.....	35
3.1 Yleistä puupolttoaineista.....	35
3.2 Hake.....	48
3.2.1 Yleisesti hakkeesta polttoaineena.....	48
3.2.2 Hakkuutähteet.....	49
3.2.3 Kokopuu- ja rankahake.....	59



3.3	Kuori ja kannot .....	65
3.4	Sahanpuru ja kutterinlastu .....	69
3.5	Halot ja pilkkeet .....	70
3.6	Puubriketit ja pelletit .....	74
3.6.1	Puubriketit .....	74
3.6.2	Puupelletit .....	76
3.7	Puuhiili .....	77
4.	Mustalipeä.....	79
5.	Turve.....	84
5.1	Turvevarat ja käyttö.....	84
5.2	Jyrsinturve .....	85
5.3	Palaturve .....	86
5.4	Turve polttoaineena .....	87
6.	Peltobiomassat .....	97
6.1	Viljakasvit ja olki .....	98
6.2	Ölly- ja kuitukasvit.....	102
6.3	Ruokohelpi ja järviruoko.....	103
7.	Kierrätyspolttoaineet.....	109
7.1	Jätteiden synty ja kierrätyspolttoaineiden laatuvaatimukset .....	109
7.2	Pakkaukset.....	114
7.3	Jätepelletit.....	119
7.4	Rengasromu.....	119
7.5	Teollisuuden ja rakennustoiminnan jätteet.....	120
8.	Lietteet .....	124
9.	Kivihiili.....	128
10.	Polttoöljyt.....	135
10.1	Raskaat ja kevyet polttoöljyt .....	135
10.2	Bioöljyt.....	138
11.	Kaasumaiset polttoaineet .....	141
11.1	Maakaasu.....	141
11.2	Nestekaasut.....	142
11.3	Jalostamokaasut, masuuni- ja koksamokaasut.....	143
11.4	Biokaasut .....	144

12. Polttoaineiden ominaisuuksien vertailu .....	149
12.1 Puupolttoaineet .....	152
12.2 Muut kiinteät polttoaineet ja metsäteollisuuden polttoaineet.....	153
12.3 Nestemäiset polttoaineet.....	155
12.4 Kaasumaiset polttoaineet.....	156
13. Yhteenveto .....	157
Lähdeluettelo .....	159

## LIITTEET

# Muuntokertoimet

Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja ja tiheyksiä (Energiatilastot 1998)

Polttoaine	Mittayksikkö	GJ	MWh	toe	t/m <sup>3</sup> (tai t/i-m <sup>3</sup> )
Raakaöljy	t	41,868	11,63	1,00	0,855
Raskas polttoöljy	t	40,60/41,10	11,278/11,417	0,970/0,0982	0,955
normaali/vähärikk.					
Kevyt polttoöljy	t	42,50	11,806	1,015	0,845
Dieselöljy	t	41,50	11,528	0,991	0,845
Nestekaasut	t	46,30	12,861	1,106	0,580
Kivihiihi	t	25,211	7,003	0,602	0,800
Koksi	t	29,30	8,139	0,700	0,750
Maakaasu (0 °C)	1 000 m <sup>3</sup>	36,00	10,00	0,860	0,732
Masuunikaasu	1 000 m <sup>3</sup>	3,79	1,053	0,091	
Koksaamokaasu	1 000 m <sup>3</sup>	16,70	4,639	0,399	
Mustalipeä	t <sub>ka</sub>	11,70	3,250	0,279	1,415
Koivuhalat	p-m <sup>3</sup>	5,40	1,50	0,129	0,400
Sekahalot	p-m <sup>3</sup>	4,51	1,25	0,107	0,350
Polttohake	i-m <sup>3</sup>	2,88	0,80	0,069	0,300
Sahanpuru	i-m <sup>3</sup>	2,16	0,60	0,052	0,300
Kutterin lastu	i-m <sup>3</sup>	1,80	0,50	0,043	0,100
Havupuun kuori	i-m <sup>3</sup>	2,16	0,60	0,052	0,300
Koivun kuori	i-m <sup>3</sup>	2,52	0,70	0,060	0,350
Puupelletti	t	16,92	4,70	0,404	0,690
Palaturve	i-m <sup>3</sup>	5,04	1,40	0,120	0,380
Jyrsinturve	i-m <sup>3</sup>	3,24	0,90	0,077	0,320

## Eri energiayksikköjen väliset muuntokertoimet

	toe	MWh	GJ	Gcal
toe	1	11,63	40,868	10,0
MWh	0,0886	1	3,600	0,86
GJ	0,02388	0,2778	1	0,2388
Gcal	0,1	1,163	4,1868	1

Esimerkki: 1 toe = 11,63MWh

100 ppm = 0,01 %

## Etuliitteet

k= kilo =10<sup>3</sup>=1 000

M= mega=10<sup>6</sup>=1 000 000

G= giga=10<sup>9</sup>=1 000 000 000

T= tera=10<sup>12</sup>=1 000 000 000 000

P= peta= 10<sup>15</sup>=1 000 000 000 000 000

# Symbolit ja lyhenteet

Käytetyt symbolit ja lyhenteet noudattavat pääosin ISO:n standardia (International Organisation for Standardisation) Solid Mineral Fuels ja SI-mittayksikköjärjestelmää.

$M_{ar}$	Kokonaiskosteus saapumistilassa $M$ = moisture, kosteus, $ar$ = as received, saapumistilassa, vastaanotettuna
$M_{ad}$	Analyysinäytteen kosteus, $ad$ = analyse dry, analyysikuiva, ilmakeiva
$Q_{gr}$	Kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo $Q$ = lämpöenergian tunnus termodynamiikassa $Q_{gr}$ = gross calorific value, higher heating value, HHV, kokonais- $Q_{gr, d}$ = kuiva-aineen (kuivan näytteen) kalorimetrinen lämpöarvo, $d$ = dry, kuiva $Q_{gr, ad}$ = analyysikostean (ilmakuivan) näytteen kalorimetrinen lämpöarvo, $ad$ = analyse dry, analyysikuiva
$Q_{net}$	Tehollinen eli alempi lämpöarvo $Q_{net}$ = net calorific value, netto, lower heating value, LHV $Q_{net, d}$ = tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, $d$ = dry, kuiva $Q_{net, ar}$ = tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, net calorific heating value as received, $ar$ = as received, saapumistilassa, vastaanotettuna
$E_{ar}$	Energiatiheys saapumistilassa Johdettu tunnus = Energy density density = tiheys (määrä/tilavuusyksikkö)
$W$	Toimitettu energiamäärä $W$ = SI-järjestelmän mukainen energian tunnus
$A_d$	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa $A$ = ash, tuhka, $d$ = dry, kuiva
$D_{ar}$	Irtotiheys saapumistilassa (tilavuuspaino) $D$ = density, tiheys, $ar$ = as received, saapumistilassa, vastaanotettuna
k.a.	kuiva-aine
ka	keskiarvo
p-%	paino-%, (tässä julkaisussa pääominaisuudet on ilmoitettu painoprosentteina, vaikka prosenttimerkin edessä ei aina ole p-kirjainta tai paino-sanaa)
$m^3$	puulla kiintokuutiometri ( $\approx 2,5$ irto- $m^3$ )
i- $m^3$	puulla irtokuutiometri
p- $m^3$	pinokuutiometri

# Ominaisuuksiin liittyviä määritelmiä

Määritelmät on laadittu julkaisun lähteiden perusteella.

**Alkuaineanalyysi, elementaarianalyysi (%)**, on polttoaineen hiilen (C), vedyn (H), hapen (O), typen (N) ja rikin (S) määrittäminen täydellisen polton avulla (happi voidaan määrittää myös erotuksena).

**Asettumiskulma** ks. kitkakulma.

**Fraktio** jae, partikkeli, rae. vrt. palakoko.

**Haihtuvat aineet (%)** polttoaineen sisältämien orgaanisten aineiden kaasumuodossa poistuvia komponentteja ja hajoamistuotteita kuumennettaessa polttoainetta 900 °C:ssa hapettomassa tilassa. Haihtuvien aineiden pitoisuus lasketaan kuumentamisen aikana syntyvästä ainehäviöstä. Haihtuvat aineet määritetään painoprosenteina kuiva-aineesta. Haihtuvien aineiden määrä vaikuttaa liekin käyttäytymiseen.

**Hienoaines (%)** palamaisen polttoaineen joukossa olevaa tuotanto- ja käsittelyvaiheessa syntyneitä aineita, jonka osuus määritetään seulomalla.

**Hiukkaspitoisuus** (mg/m<sup>3</sup>) savukaasuissa olevien kiintoaineiden massa tilavuutta kohti. Hiukkaspitoisuus ilmoitetaan normaalioloissa (0°C, 101,3 kPa) olevan kuivan kaasun tilavuutta kohti.

**Hiukkaspäästöt** ks. Päästöt ja hiukkaspitoisuus.

**Hivenaineet** ovat aineita, joiden määrä kasveissa ja eläimissä on vähäinen, mutta jotka ovat välttämättömiä niiden normaalille kehitykselle. Tärkeimmät hivenaineet ovat rauta (Fe), kupari (Cu), sinkki (Zn), mangaani (Mn), magnesium (Mg), fluori (F), pii (Si), kromi (Cr), seleeni (Se), jodi (I), boori (B) ja molybdeeni (Mo). Hivenaineet ovat pääosin sitoutuneet epäorgaaniseen osaan ja jotkut hivenaineet kuten Be, Cr, Ni ja Sb, voivat esiintyä myös orgaaniseen osaan sitoutuneena.

**Kiinteä hiili** on hiiltä, joka ei poistu haihtuvien aineiden mukana (terva-aineisiin tai kaasuihin) vaan jää hiiltojäännökseksi, josta on poistettu tuhkan osuus. Teknisessä analyysissä kiinteän hiilen määrä prosentteina saadaan laskemalla kosteus, tuhka ja haihtuvat aineet yhteen ja vähentämällä saatu summa sadasta.

**Kitkakulma** (°) materiaalien juoksevuustekninen ominaisuus. *Asettumiskulma* ilmoittaa sen kartion sivukulman vaakatason kanssa, johon aine vapaasti valuessaan asettuu. *Vierimiskulma* tarkoittaa kulmaa, johon asettumiskulma pienenee, kun tasapainotilassa olevaa kekoa tärytetään. Virtauskulma on se luonnollinen kulma, joka muodostuu esimerkiksi tuettuna olleen materiaalin ja raakatason välille sen jälkeen, kun materiaali on saanut purkautua. Materiaalin *liukumiskulma* saadaan siten, että tasolevyä,

jolla materiaali on, kallistetaan vakionopeudella, kunnes materiaali alkaa liukua. Tällöin tason kallistaminen lopetetaan ja saatu kulma määritetään.

**Kosteus** (M, paino-%, p-%, m-%) polttoaineen sisältämä vesimäärä, joka ilmoitetaan joko kostea tai kuivaa ainetta kohti. Kosteusprosentti eli kosteus on veden prosenttiosuus aineen kokonaismassasta. *Tasapainokosteudella* tarkoitetaan vesimäärää, jonka polttoaine kykenee pidättämään tietyissä oloissa. *Toimituskosteudeksi* kutsutaan kosteutta, jossa polttoaine on, kun se toimitetaan kuluttajalle. *Käyttökosteus* tarkoittaa käyttöön valmiin polttoaineen kosteutta. Puupolttoaineiden yhteydessä puhutaan *tuorekosteudesta*, joka tarkoittaa kuivattamattoman polttoaineen kosteutta. (ks. tarkemmin ominaisuuksien määrittäminen). Kosteussuhde (u) on polttoaineen vesimäärän suhde kuiva-aineeseen.

**Klooripitoisuus**, Cl (% , mg/kg) tarkoittaa polttoaineen sisältämää kokonaiskloorin määrää. Kloori esiintyy polttoaineessa pääasiassa natriumkloridina. Kloori poistuu poltossa kaasun muodossa (happoina) ja saattaa aiheuttaa höyrykattiloissa korroosio-ongelmia.

**Kuiva-aine** ( $m_{ka}$ , DS) polttoaine- ja muiden analyysien raportointiperusta. Kuiva-aineen massa (kg) on polttoaineen vedettömän osan kokonaismäärä, jota käytetään kuiva-aineosuusvertailuperustana. Polttoaineen kuiva-aineessa on sekä palavia että palamattomia ainesosia. Kuiva-aine koostuu hiilestä, vedystä, hapestä, typestä, rikistä ja palamattomasta epäorgaanisesta ainesosasta eli mineraaliaineksestä (tuhka).

**Kuiva-tuoretiheys** ks. tiheys.

**Leimahduspiste** ilmoittaa alimman lämpötilan, jossa polttoöljy on höyrystynyt ilmaan niin paljon, että muodostunut seos leimahtaa ulkopuolisen kipinän vaikutuksesta.

**Liukumiskulma** ks. kitkakulma.

**Lämpöarvo** (Q, MJ/kg) täydellisessä palamisessa kehittyvän lämmön määrä polttoaineen massaa kohti. Usein ilmoitetaan lämpöarvo myös tilavuutta kohti eli ns. energiatiheys, E (MJ/m<sup>3</sup> tai MWh/m<sup>3</sup>). *Kalorimetrinen lämpöarvo* eli ylempi lämpöarvo tarkoittaa lämpömäärää, joka vapautuu, kun massayksikkö polttoainetta palaa täydellisesti ja palaessa syntyvä ja polttoaineessa ollut vesi on palamisen jälkeen nesteinä peruslämpötilassa (+25°C). Kalorimetrinen lämpöarvo määritetään pommikalorimetrissä. *Teholliseksi lämpöarvoksi* eli alemmaksi lämpöarvoksi kutsutaan lämpömäärää, joka syntyy poltettaessa yksi massayksikkö polttoainetta, kun palamisen yhteydessä kehittyvä vesi – jonka määrä riippuu vetypitoisuudesta – höyrystyy ja jäähtyy takaisin alkulämpötilaan pysyen höyryn muodossa. Kalorimetrinen ja tehollinen lämpöarvo ilmoitetaan yleensä kuiva-ainetta kohti. Toimituskostean tai *saapumistilassa olevan polttoaineen lämpöarvo* lasketaan kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta (ks. laskentakaavat ominaisuuksien määrittäminen).

**Maatumisaste** turpeen amorfisen humusaineen määrä verrattuna alkuperäisen rakenteensa säilyttäneisiin kasvisolukkoihin. Yleisin maatumisasteen määrittystapa on von Postin menetelmä. Siinä maatumisaste määritetään puristamalla tuoretta turvetta kädessä ja tarkkailemalla sekä puristettua vettä että käteen jäävää turvemassaa. Maatumisaste ilmoitetaan ns. H-arvona, joka voi vaihdella 1:stä 10:een. Kun H-arvo on 1, turve on käytännöllisesti katsoen maatumatonta, ja kun arvo on 10, turvetta muodostava kasvi-aines on täysin hajaantunut. Von Postin menetelmä soveltuu kostealle luonnontilaiselle turpeelle. Heikkoutena on menetelmän subjektiivisuus. Muita maatumisasteen määrittämenetelmiä ovat esimerkiksi sentrifugimenetelmä ja ns. Pjajtshenkon menetelmä.

**Metallipitoisuus** polttoaineista määritetään ensisijaisesti seuraavia metalleja arseeni (As), kadmium (Cd), koboltti (Co), kromi (Cr), kupari (Cu), elohopea (Hg), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), torium (Th), uraani (U) ja sinkki (Zn). Lisäksi määritetään seuraavia metalleja tai epämetalleja; pii (Si), alumiini (Al), rauta (Fe), mangaani (Mg), kalsium (Ca), kalium (K), natrium (Na) ja fosfori (P).

**Mineraalit** ovat sitoutuneet pääasiassa polttoaineen epäorgaaniseen osaan. Polttoaineet sisältävät suuren määrän mineraaleja (joista erittäin pieninä pitoisuuksina esiintyvät ovat hivenaineita). Mineraali-koostumus pohjautuu polttoaineen syntytapaan ja -paikkaan, minkä vuoksi pitoisuudet vaihtelevat suuresti. Mineraalit voivat esiintyä tulipesän pohjatuhkassa, lämmönsiirtopinnoilta puhdistetussa tuhkassa tai savukaasun puhdistimelta erotetussa tuhkassa.

**Murska, murske (%)** palamaisen polttoaineen joukossa olevaa hienoaainesta sekä murskautuneita paloja. Murskeeksi taas voidaan kutsua vasiten murskattua ainesta vrt. hienoaines.

**Palakoko** palamaiselle polttoaineelle ominaisen palan koko. Kunkin polttoaineen palakokojakauma (partikkelikokojakauma, raekokojakauma, hiukkaskokojakauma, fraktiojakauma) määritetään seulonnan avulla tai analysointilaitteilla (pienikokoiset hiukkaset). Seula-analyyseissä määritetään eri silmäkokoja oleville seulalevyille jäävä osuus tasapainokostean näytteen painosta.

**Palaminen** aineen kemiallista yhtymistä happeen, jolloin samalla vapautuu reaktiolle ominainen energia lämpönä. Jokaisessa polttoprosessissa muodostuu vettä (H<sub>2</sub>O) ja jos polttoaine sisältää hiiltä myös hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Mikäli polttoaine sisältää rikkiä, muodostuu myös rikkidioksidia (SO<sub>2</sub>). Yleensä palaminen on jossain määrin epätäydellistä, jolloin muodostuu hiilen palamisessa häkää eli hiilimonoksidia (CO) ja muita haitallisia päästöjä (mm. tuhkaa, palamatonta polttoainetta, hiukkaspäästöjä ja hiilivetyjä (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)). Typen oksidien (NO<sub>x</sub>) muodostumiseen vaikuttavat palamisilman ja tulipesän lämpötila sekä polttoaineen typpipitoisuus. Mikäli polttoaine sisältää klooria (Cl), voi huonoissa ja huonosti hallituissa palamisolosuhteissa muodostua erittäin myrkyllisiä furaaneja ja dioksiineja.

**Pienhiukkaset** ovat hiukkasia, joiden halkaisija on alle 2,5 µm. Pienhiukkasiin sitoutuneet yhdisteet kulkeutuvat hengitysilman mukana keuhkoihin.

**Polyaromaattiset hiilivedyt** (PAH-yhdisteet) ovat kahdesta tai useammasta bentseenirenkaasta muodostuneita, vain hiiltä ja vetyä sisältäviä yhdisteitä. PAH-yhdisteiden joukko on suuri. Osa PAH-yhdisteistä on mutageenisia ja/tai karsinogeenisia eli syöpää aiheuttavia. PAH-yhdisteistä erittäin karsinogeenisia ovat mm. bentzo[a]pyreeni (BaP), dibents[a,h]antraseeni, 7,12-DMBA ja 3-metyylikolantreeni.

**Puristuvuus (%)** Puristuvuus ilmoittaa vapaasti asettuneen ja tiivistetyn massamateriaalin tiheyksien eron suhteessa tiivistettyyn arvoon.

**Päästöt** polton yhteydessä syntyviä haitallisia, savukaasuissa olevia yhdisteitä ja epäpuhtauksia. Näitä ovat mm. hiukkas-, hiilimonoksidi-, hiilidioksidi-, rikkidioksidi-, hiilivetyjen ja typen oksidien päästöt (ks. pienhiukkaset, orgaaniset yhdisteet).

**Orgaaniset yhdisteet (OC, OM)** ovat hiiliyhdisteitä. Kaikki hiiliyhdisteet eivät kuitenkaan ole orgaanisia, esim. hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), natriumkarbonaatti (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ja kaliumsyaniidi (KCN) ovat epäorgaanisia yhdisteitä. Orgaaniset yhdisteet luokitellaan mm. alkaani, alkeenit, aromaattiset hiilivedyt, alkoholit, aldehydit, halogenoidut yhdisteet, amidit, amiinit, areenit, karboksyylihapot, esterit, eetterit, ketonit, ntriilit, sulfidit ja thiolit. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ovat yhdisteitä, joiden höyrynpaine on korkea. Orgaaniset yhdisteet muodostavat suuren osan ulkoilman pienhiukkasmassasta.

**Raskasmetallit** ovat metalleja, joiden tiheys on yli 5 g/cm<sup>3</sup>; ks. myös metallipitoisuus. Raskasmetalleja ovat mm. antimoni (Sb), vismutti (Bi), kadmium (Cd), lyijy (Pb), elohopea (Hg), tallium (Tl) ja tina (Sn).

**Rummutuslujuus (%)** palamaisten kiinteiden polttoaineiden kestävyys mekaanisia rasituksia vastaan. Erityisesti brikketien, koksen ja pellettien osalta rummutuslujuudella on suuri merkitys. Eniten käytetään määrittämissä menetelmää, jossa polttoainetta rasitetaan pyörivässä rummussa ja muuttunut raekokojakauma ja hienoaineksen määrä määritetään seulonnalla (= raekokojakauma).

**Tiheys (ρ) [kg/m<sup>3</sup>]** Polttoaineen massa tilavuusyksikköä kohti. Kotimaisten polttoaineiden tiheys vaihtelee suuresti. Tiheys riippuu sekä tilavuudessa olevasta kuiva-ainemäärästä että kosteudesta. Homogeenisen materiaalin *irtotiheys* (tilavuuspaino) on polttoaineen massa laskettuna kehystilavuutta (eli kuormatilavuutta) kohti. *Kuivatiheys* osoittaa aineen ja veden yhteenlasketun massan tilavuusyksikköä kohti. Puun *kuiva-tuoretiheys* osoittaa vastaavasti pelkän puuaineen kuivamassan tuoreessa tilassa mitattuna tilavuusyksikköä kohti eli kuiva-tuoretiheys (kg/m<sup>3</sup>) on kuivamassa (kg) jaettuna tilavuudella tuoreena (m<sup>3</sup>). Polttoaineen *näennäisellä tiheydellä* tarkoitetaan tiheyttä, joka saadaan, kun tilavuuteen ei lueta mukaan (palojen välistä) ilmatilaa. *Näennäinen tiheys* ("vesitiheys") saadaan, kun polttoaineen massa jaetaan tilavuudella, jonka polttoaine syrjäyttää, kun se upotetaan esim. veteen. *Kiintotiheys* (todellinen tiheys) saadaan, kun polttoaineen massa jaetaan materiaalin todellisella tilavuudella, jolloin tilavuudessa ei ole mukana materiaalin sisältämien huokostenkaan tilavuutta. Huokoisuus on näennäistiheyden ja todellisen tiheyden suhde.



Kiintokuutiometri, m <sup>3</sup>	Kuorellinen kiintokuutiometri, Keskimäärin 2,5 i-m <sup>3</sup> eli energiana n. 2 MWh
Irtokuutiometri, i-m <sup>3</sup>	Hakekuutiometri tai pilkkeiden heittokuutiometri
Irtotiheys, kg/i-m <sup>3</sup>	Massa ja tilavuus mitataan toimitustilassa
Pinokuutiometri, p-m <sup>3</sup>	Kehysmitoiltaan 1 m <sup>3</sup> :n pinottu pilkkeiden muodostelma.

**Tiiviyys** puun kiintotilavuus (m<sup>3</sup>)/tilavuus hakkeena (i-m<sup>3</sup>) tai pilkkeenä (p-m<sup>3</sup>). Esimerkiksi hakemittauksissa kiintotilavuus (kuutiometripaino, m<sup>3</sup>) määritetään haketiiviyysmuuntoluvun avulla kuorman irtotilavuudesta (i-m<sup>3</sup>). Hakkeen kuutiometripaino määräytyy puuaineen tiheyden, hakkeen tiiviyden ja puun kosteuden mukaan.

**Tuhka** epäorgaanisen aineen massa, joka jää jäljelle poltettaessa polttoainenäyte täydellisesti hapettavassa kaasukehässä. Tuhkapitoisuus (A<sub>d</sub>) (%) on tuhkan paino-osuus polttoaineen kuiva-aineen painosta. Tuhkan koostumus on peräisin polttoaineen mineraalikoostumuksesta ja se vaikuttaa tuhkan sulamisominaisuuksiin. Tuhkasta määritetään mm. seuraavia yhdisteitä SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub> ja P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Tuhkan määrä ei vastaa ei vastaa suoraan sitä epäorgaanisen aineen määrää, joka polttoaineessa on alkuperäisessä tilassaan, sillä esimerkiksi useat mineraalit voivat hajota tai hapettua polton aikana.

**Tuhkan sulamiskäyttäytyminen** (°C) Polttoaineiden poltosta jäävän tuhkan sulamiskäyttäytyminen (sintraantuminen, kuonaantuminen, likaantuminen) saattaa olla erilaista. Tällä on oma vaikutuksensa esimerkiksi polttolaitteiden toimintaan, mikä otetaan huomioon jo polttolaitetta suunniteltaessa. Sulamiskäyttäytymisessä erotetaan nykyisissä normin mukaisissa määrittelyissä neljä vaihetta: muodonmuutospiste, pehmenemispiste, puolipallopiste ja juoksevuuspiste.

**Turvelaji** Suomessa, kuten useissa muissa Euroopan maissa, turpeet luokitellaan kasvitieteellisen koostumuksen perusteella eri turvelajeiksi.

Rahkaturpeet (S)	S-turve ErS-turve CS-turve LS-turve
Saraturpeet (C) SC-turve	C-turve LC-turve BC-turve
Puuturpeet (L)	SL-turve CL-turve
Ruskosammalturpeet (B)	B-turve CB-turve
Lyhenteet	S Sphagnum Er Eriophorum vaginatum C Carex L puuaines B Bryales

Näiden pääturvetekijöiden lisäksi turpeessa on monien muiden kasvien jäännöksiä.

**Viskositeetti**,  $\text{mm}^2/\text{s}$  (kinemaattinen viskositeetti. Lukuarvoltaan yhtä suuri on vanha yksikkö cSt, senttistoke. Lämmitysöljyn viskositeetti eli juoksevuus riippuu öljyn lämpötilasta. Mitä matalampi on öljyn lämpötila, sitä heikommin öljy juoksee eli sen viskositeetti on tällöin korkea. Bioöljyjen viskositeetti määritetään ASTM D 445 -menetelmällä.

# Polttoaineiden määritelmät

## PUUPOLTTOAINEET

**Energiapaju** Lyhytkiertoisella viljelmällä energiakäyttöön kasvatettu pajupuusto tai pajubiomassa.

**Energiapuu** Polttoon tai muuhun energiakäyttöön tarkoitettu puu tai puutavara muodosta ja lajista riippumatta.

**Hakkuutähdehake** Hakkuutähteestä tehty hake. Hakkuutähdettä on teollisuudelle menevän runkopuun hakkuun yhteydessä syntyvä metsään jäävä puuainne, kuten oksat ja latvat. Myös hakkuualueille jäävä, pienikokoinen puu, ns. raivauspuu sekä hylkypölkyt luetaan hakkuutähteeksi.

**Halko** Halot ovat noin 1 m:n pituisia, polttokäyttöön tarkoitettuja halkaistuja tai pyöreitä karsittuja pölkkyjä.

**Harvennuspuu** Harvennushakkuissa poistettava osa metsikön puustosta, harvennushakkuista korjattu puutavara.

**Hiontapöly** Puutavaran ja puulevyjen hionnassa syntyvä pölymäinen puutähde.

**Kantohake** Kannoista tai liekopuista tehty hake.

**Kokopuuhake** Puun koko maanpäällisestä biomassasta eli kokopuusta (runkopuu, oksat, neulaset) tehty hake.

**Kokopuu** Karsimaton runko tai siitä tehty puutavara.

**Kuori** Ainespuuta kuorittaessa syntyvä tähde, jonka joukossa saattaa kuoren lisäksi olla puuainetta.

**Kutterinlastu** Puutavaran höyläyksessä syntyvä puutähde.

**Metsähake** Ranka-, kokopuu- ja hakkuutähdehakkeen yleisnimitys haketuspaikasta riippumatta.

**Metsätähdehake** Ainespuun korjuun jälkeen oksista ja latvuksista viheraineineen tehty hake.

**Metsätähdehake** Ainespuun korjuussa ja nuorta metsää harvennettaessa tähteeksi jääneistä oksista, latvuksista ja hukkarunkopuusta tehty hake. Metsätähdehakeen kuivumisesta riippuen viheraines on mukana tai puuttuu.

**Pilke, klapi, pienhalko, nalikka** Koti- ja maatalouden keskuslämmityskattiloissa ja tulisijoissa käytettävä 0,25–0,50 m pitkä katkaistu ja halkaistu puu. Termit tarkoittavat samaa. Pilkkeellä voidaan tarkoittaa myös vain 50–150 mm:n pituisia rangasta (viistosti tai suoraan) pätkittyjä ja halkaistuja paloja, joita käytettiin mm. sodan aikana puukaasuttimissa.

**Polttohake** Yleisnimitys polttoon käytettävälle eri tekniikoilla tehdyille hakkeelle tai murskeelle.

**Polttopuu** Yleisnimitys kaikelle puupolttoaineelle puu-, kuori- ja viheraines mukaan lukien. Polttopuu nimitystä käytetään tilastoissa vain koti- ja maatalouden puupolttoaineille (halot ja hake).

**Puuperäiset polttoaineet** Yleisnimitys kaikille puu- ja kuoriaineksesta peräisin oleville polttoaineille sisältäen myös metsäteollisuuden puutähteet ja mustalipeän.

**Puubriketti** Puubriketit valmistetaan kuivasta purusta, hiontapölystä ja kutterin lastusta puristamalla. Sideaineita ei tavallisesti käytetä, sillä puun omat ainekset pitävät puristeen koossa. Puubriketti on yleensä poikkileikkaukseltaan pyöreä tai neliön muotoinen. Sivun pituus tai halkaisija on 50–80 mm.

**Puuhiili** Puuhiili on orgaanista hiiltä, joka valmistetaan kuumentamalla puuta ilmattomassa tilassa (hiiltämällä eli pyrolyysin avulla). Puuhiili on haurasta huokoista materiaalia, jolla on puun alkuperäinen muoto ja jonka mikrorakenne säilyttää kasvisolurakenteensa. Pyrolyysissä eli puun hitaassa hiillossa syntyy kaasuja, kondensoituvia nesteitä ja kiinteää hiiltä. Puuhiilen valmistukseen käytetään mm. miiluja ja retortteja.

**Puupelletti** Puupelletit ovat puristamalla sahanpurusta tai kutterinlastusta valmistettuja, pyöreitä, joskus neliömäisiä rakeita. Pellettien halkaisuja on 8–12 mm ja pituus on 10–30 mm.

**Puutähdehake** Teollisuuden kuorellista ja kuorettomista puutähteistä (rimat, tasauspätkät, yms) tehty hake, joka ei sisällä maalattua tai muuten käsiteltyä puuta.

**Ranka** Karsittu runko ja pölkky, joka ei yleensä täytä ainespuulle asetettuja vaatimuksia. Termiä käytetään ensisijaisesti pienikokoisesta puusta.

**Rankahake** Karsitusta runkopuusta tehty hake. Rankahake valmistetaan yleensä runkohukkapuusta. Runkohukkapuu sisältää yleensä korjuussa ja metsänhoitotöiden yhteydessä metsään käyttämättä jäävän runkopuun kuorineen.

**Ruskea hake** Kuorimattomista rangoista, kokopuusta tai hakkuutähteestä tehty polttohake, jossa lehti- ja neulasmassan osuus on vähäinen.

**Sahanhake** Sahateollisuuden sivutuotteena syntyvä kuorellinen tai kuoreton hake.

**Sahanpuru** Sahauksessa syntyvä sahauspuru.

**Vaneritähde** Vaneriteollisuudessa syntyvä viilu- ja vaneri- ja muu puutähde (ei saa sisältää haittaavassa määrin liima-aineita).

**Vihreä hake, viherhake** Tuoreesta hakkuutähteestä tai kokopuusta tehty polttohake, jossa lehdet ja neulaset ovat mukana.

## MUSTALIPEÄ

**Mustalipeä** Sulfaattisellun keitossa puusta liuennut runsaasti ligniiniä sisältävän aineksen ja keittokemikaalien seos, joka otetaan talteen massan pesuvaiheessa, väkevöidään haihduttamossa ja poltetaan soodakattilassa kemikaalien regeneroimiseksi ja energian tuottamiseksi. Noin puolet puun kuivamassasta liukenee keitossa mustalipeään. Mustalipeä kuuluu puuperäisiin polttoaineisiin.

## KIERRÄTYSPOLTTOAINEET

**Energiajäte** Energiakäyttöä varten syntypaikalla lajiteltu polttokelpoinen jäte.

**Jäte** Jätteellä tarkoitetaan ainetta tai esinettä, jonka sen haltija on poistanut, aikoo poistaa käytöstä taikka on velvollinen poistamaan käytöstä.

**Jätepuu** Jätepuulla tarkoitetaan rakennus-, purku- ja korjaustoiminnassa syntyvää jättepuuta sekä puunjalostusteollisuudessa syntyvää jättepuuta, joka sisältää liima-, maali-, kyllästys- tms. aineita. Poikkeuksena on painekyllästetty puu, joka on ongelmajätettä.

**Kierrätyspolttoaine (REF)** Kierrätyspolttoaineella tarkoitetaan yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoisista, kuivista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua polttoainetta.

**Kierrätyspuu** Rakennusten ja yhdyskuntien kemikaaleilla käsittelemättömistä puutähteistä tehty polttohake.

**Kuivajäte** Kuivajakeella tarkoitetaan jäljelle jäävää polttokelpoista jätettä, kun yhdyskuntajätteestä on lajiteltu erilleen biojäte, ongelmajäte ja muu kierrätyskelpoinen jäte.

**RDF (Refuse Derived Fuel)** Lajittelemattomasta yhdyskuntajätteestä mekaanisella käsittelyprosessilla valmistettu polttoaine.

**REF tai RF (Recovered Fuel)** Syntypaikalla lajitellusta ja erilliskerätystä kuivajätteestä mekaanisella käsittelyprosessilla valmistettu polttoaine.

**Sekajäte** Sekajätteellä tarkoitetaan lajittelematonta yhdyskunta-, teollisuus- tai rakennusjätettä.

**Yhdyskuntajäte** Yhdyskuntajätteellä tarkoitetaan asumisessa syntyvää jätettä sekä ominaisuuksiltaan, koostumukseltaan ja määrältään siihen rinnastettavaa teollisuudessa, kaupassa tai muussa vastaavassa toiminnassa syntyvää jätettä.

## TURVE JA PELTOBIOMASSAT

**Turve** on suokasvien hitaan maatumisen seurauksena syntynyttä, epätäydellisesti hajonnutta eloperäistä maalajia, joka on varastoitunut kasvupaikalleen erittäin märissä olosuhteissa. Happen puutteen ja runsaan veden takia kasvin jäänteet eivät hajoa kunnolla, ja näin syntyy jatkuvasti kasvava turvekerrostuma.

**Jyrsinturve** Jyrsinturve on polttoturvetta, joka on tuotettu jyrsimällä turvetta suon pinnasta ja kuivaamalla se tuotantokentällä. Jyrsinturvetuotannon päävaiheet ovat jyrsintä, kääntäminen, karheaminen ja kokoaminen. Jyrsinturve on raekooltaan epähomogeenista sisältäen pääosin pölymäistä turvetta ja sen lisäksi erikokoisia turverakeita. Turveaineksen ohella jyrsinturve voi sisältää vaihtelevan määrän maatumattomia tai huonosti maatuneita, karkeita kasvinosia (liekopuuta, varpuja, tupasvillaa yms.) sekä epäpuhtauksia.

**Palaturve** Palaturvemenetelmässä kenttään jyrsitään ura, josta irrotettu turvemassa muokataan, tiivistetään ja puristetaan suutinosan läpi palaturpeeksi kuivumaan kentän pinnalle. Jyrsintä tapahtuu joko nostokiekolla tai nostoruuvilla yleensä noin 0,5 m syvyydeltä. Yleisimmät palamuodot ovat sylinteripala eli ns. pyöreä pala ja lainepala.

**Peltobiomassat** ovat pelloilla tai soilla kasvatettuja energiakasveja (ruokohelpi, öljykasvit) tai energiametsää (paju) sekä viljakasvien osia (olki), joita voidaan käyttää polttoaineena tai joista voidaan jalostaa joko kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita. Myös järviruoko kuuluu ominaisuuksien puolesta tähän ryhmään. Tässä julkaisussa pajun ominaisuudet on käsitelty puupolttoaineissa.

## LIETTEET

**Kuorimolietteet** Kuorimossa syntyy monenlaisia lietteitä, mm. kuoriliete, hiekanerottimen hiekkaliete ja selkeyttimen liete.

**Primääriliete** on esiselkeytyksestä laskeuttamalla saatua lietettä. Metsäteollisuuden primäärilietteet sisältävät kuori-, kuitu-, täyte- ja lisäaineita sekä pigmenttejä.

**Bioliete** on jäteveden biologisessa puhdistuksessa syntyvää lietettä. Metsäteollisuuden biolietettä voi verrata yhdyskuntien puhdistamolietteeseen. Siinä on mikrobimassan lisäksi myös puun uuteaineita, ligniiniyhdisteitä ja absorboituneita klooriorganisia yhdisteitä.

**Siistausliete** syntyy keräyspaperin siistausprosessissa (deinking), jossa jät paperista poistetaan painomuste, täyteaineet ja päällysteet, jolloin jäljelle jää uusiokuitu.

**Yhdyskuntaliete** on pääasiassa jäteveden puhdistamoiden lietteitä. Etenkin isommilla puhdistamoilla on primääriselkeytin ennen biologista puhdistusta, jolloin jätevedenpuhdistamolla muodostuu sekä primääriettä biolietettä. Lisäksi muodostuu sako- ja umpikaivolietteitä, välppäjätettä ja hiekanerotuskaivojen liettä.

## KIVIHIILI

**Antrasiitti** on geologiselta iältään vanhin ja pisimmälle kehittynyt kivihiililaatu, jonka haihtuvien aineiden pitoisuus on alhainen (alle 10 %). Antrasiitin tehollinen lämpöarvo on suurin n. 33 MJ/kg.

**Höyryhiili eli voimalaitoshiili** on hiili, jota käytetään voimalaitoksilla lämmön ja sähkön tuottamiseen.

**Kivihiili** Kivihiilellä tarkoitetaan kiinteää orgaanista fossiilista polttoainetta, jonka lämpöarvo on yli 24 MJ/kg tuhkatomassa aineessa. Kivihiililaadut luokitellaan pääasiassa haihtuvien aineiden määrän ja lämpöarvon perusteella.

**Koksi** Kivihiilestä kuivatislaamalla valmistettu polttoaine, jota käytetään pääasiassa rauta- ja metalliteollisuudessa. Koksia voidaan valmistaa myös turpeesta.

**Ligniitti** on ruskohiiltä, jossa on vielä näkyvissä puun rakenne. Sanaa käytetään myös kaikkien ruskohiililajien yleisnimityksenä. Ruskohiili on vähemmän hiiltynyt ja sisältää vähemmän hiiliainesta, mutta enemmän happea ja vetyä.

## ÖLJYTUOTTEET

**Mineraaliöljyksi** kutsutaan nestemäisiä, kallioperästä tavattavia hiilivetyseoksia ja niistä valmistettuja tuotteita. Raaka-öljy on maan sisällä miljoonien vuosien kuluessa eloperäisen luonnon jäänteistä syntyntä tuotetta. Raakaöljyn hiilivetyliiketjua pilkotaan lämmön ja paineen sekä katalyyttien avulla eli krakataan sekä tislataan useassa vaiheessa erilaisin menetelmien. Lopputuotteena saadaan kaasuja, liuottimia, bensiinejä, petroleja, keskitisleitä eli diesel- ja kevytpolttoöljyjä, raskaita polttoöljyjä, laivapolttoöljyjä sekä bitumeja.

**Bioöljyjä** voidaan valmistaa kasveista (mm. rypsiä, rapsista, ohrasta), puusta ja metsäteollisuuden sivutuotteista.

**Biodiesel** on yleisnimitys kasviöljypohjaiselle dieselpolttoaineelle. Öljykasvien siemenistä erotettu öljy ei karstoittumisongelmiin vuoksi sovellu sellaisenaan nykyisten dieselmoottorien polttoaineeksi. Esteröimällä kasviöljy alkoholilla saadaan tavallisiin dieselmoottoreihin sopivaa polttoainetta.

**Puuöljy, pyrolyysiöljy** Pyrolyysissä puu (kosteus <10 %) lämmitetään hyvin nopeasti korkeaan lämpötilaan (500–600 °C), jolloin pääosa puuaineesta muuttuu kaasuiksi, jotka nesteytetään kaasujen lauhduttimessa. Muut tuotteet, lauhtumattomat kaasut ja hiiltojäännös käytetään yleensä prosessin energiaksi. Pyrolyysiöljyn saanto on noin 70 % kuivan puun painosta.

## KAASUMAISET POLTTOAINEET

**Biokaasu** Biokaasu on orgaanisen aineksen anaerobisen hajoamisen tuote. Hajottajina toimivat hapettomassa tilassa kasvavat bakteerit. Lopputuotteena saadaan mädätettyä biomassaa ja runsaasti metaania (55–75 %) ja hiilidioksidia (45–25 %) sisältävä seos.

**Maakaasu** Maakaasu on luonnon lähteistä sellaisenaan tai öljyn tuotannon yhteydessä erotettavissa oleva kaasumainen kevyt hiilivety. Pääosa maakaasusta käytetään Suomessa polttoaineena sekä vähäisessä määrin myös kemian teollisuuden raaka-aineena (vedyn tuotanto sekä sen jatko-prosessointi). Maakaasu on pääasiassa metaania sekä pieniä määriä etaania, propaania, butaania ja typpeä sisältävä seos.

**Masuuni- ja koksikaasu** Koksen valmistuksesta tai masuunista sivutuotteena saatava vetyä, kevyitä hiilivetyjä ja hiilidioksidia sisältävä kaasu. Sisältää myös masuuninkaasuun rinnastettavan ferrokromin talteenotetun CO-kaasun.



# 1. Johdanto

Tässä julkaisussa on käsitelty polttoaineiden ominaisuuksia kirjallisuuden sekä VTT Energian analyysien tulosten perusteella. Polttoaineiden tärkeimmät ominaisuudet ovat

- lämpöarvo
- polttoaineen kemiallinen koostumus (elementaarianalyysi, mm. alkalit ja metallit, epämetallit, raskasmetallien sekä hivenaineet)
- kosteus
- tuhkapitoisuus, tuhkan koostumus ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen
- tiheys, jauhautuvuus, viskositeetti sekä muut käsittelytekniset ominaisuudet.

Julkaisussa käsitellään erilaisten

- puupolttoaineiden (hake, pilke, sahanpuru, kuori, briketti, pelletti ja puuhiili)
- mustalipeän
- jyrsin- ja palaturpeen
- peltobiomassojen (viljat, öljykasvit ja viljan siemenet, olki, ruokohelpi ja järviruoko)
- kierrätyspolttoaineiden (jätepuu, muovit, kuitumaiset pakkaukset, rengasjäte, teollisuuden jättepolttoaineet)
- lietteiden (lähinnä metsäteollisuuden lietteet)
- kivihiilen (lähinnä höyryhiili)
- öljyjen (kevyt- ja raskaspolttoöljy ja bioöljyt) ja
- kaasumaisten polttoaineiden (maakaasu, nestekaasut, prosessikaasut sekä biokaasu) ominaisuuksia.

Julkaisun alussa esitellään myös polttoaineiden ominaisuuksien määrittämenetelmiä ja laskentakaavoja. Lopussa on polttoaineiden ominaisuuksien vertailua sekä poltto-

aineiden laatuluokitukset. Julkaisussa ei käsitellä liikenteen polttoaineita eikä turvebrikettien, kaksin eikä pellettien ominaisuuksia, koska näiden valmistus on lopetettu Suomessa. Teollisuuden prosessikaasuja on käsitelty hyvin lyhyesti. Kotimaisten polttoaineiden osalta on kuvattu myös polttoaineiden tuotantotekniikkaa ja potentiaalit.

## **2. Ominaisuuksien määrittäminen**

### **2.1 Näytteenottoon liittyviä määrittämiä**

#### **Toimituserä**

Se polttoaine-erä, johon polttoainelajien keskeiset, säännöllisesti valvottavat laatuvaatimukset kohdistetaan. Toimituserän koko sovitaan tapauskohtaisesti.

#### **Yksittäisnäyte**

Pienin määrä polttoainetta, joka otetaan kerrallaan kokoomanäytteen muodostamiseksi.

#### **Kokoomanäyte**

Yleisnimitys näytteelle, joka muodostetaan yhdistämällä samasta polttoaine-erästä otetut yksittäisnäytteet. Kokoomanäyte voidaan muodostaa myös yhdistämällä homogenisoiduista yksittäisnäytteistä jakamalla erotetut osanäytteet yhdeksi näytteeksi.

#### **Laboratorionäyte**

Toimituserästä tai sen osasta kootusta kokoomanäytteestä homogenisoimalla ja jakamalla muodostettu osanäyte, joka toimitetaan laboratorioon. Vertailuja varten voidaan samasta kokoomanäytteestä muodostaa useampia rinnakkaisia laboratorionäytteitä esimerkiksi kosteuden määrittämistä varten.

#### **Kosteusnäyte**

Laboratorionäytteestä homogenisoimalla ja jakamalla muodostettu osanäyte, joka kuivataan kosteuden määrittämiseksi.

#### **Varanäyte**

Laboratorionäytteen osa, joka säilytetään määrittämiä tarkistamista varten.

#### **Analyysinäyte**

Muodostettu murskaamalla, homogenisoimalla ja jakamalla lämpöarvonäytteestä. Analyysinäyte on se näyte, josta määritetään lämpöarvo, tuhkapitoisuus ja analyysikosteus sekä tehdään tarvittavat kemialliset analyysit.

## 2.2 Polttoaineiden ominaisuuksien määrittäminen

### 2.2.1 Yleistä polttoaineiden määrittämisestä

Suomessa on kehitetty sekä kiinteiden polttoaineiden että nestemäisten polttoaineiden määrittämismenetelmiä. Yleensä menetelmien kehitystyön pohjana ovat kansainväliset menetelmät. Tässä kohdassa kuvataan lähinnä kiinteiden polttoaineiden määrittämismenetelmiä (Nieminen & Ranta, 1982).

Bioöljyjen ja nestemäisten poltto- ja voiteluaineiden analyyseja on kuvattu mm. VTT Publications 306 -julkaisussa (Oasmaa et al. 1997).

Tärkeimpiä ominaisuuksia, joita määritetään ovat teknillinen analyysi, alkuainekoostumus, lämpöarvo ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Näiden lisäksi tarvitaan usein tietoja myös tiheydestä, palakoosta ja muista käsittelyteknisistä ominaisuuksista. Ympäristösyistä tai polttoteknisistä syistä selvitetään myös raskasmetallipitoisuuksia sekä erilaisten metallien tai epämetallien pitoisuuksia joko polttoaineesta tai tuhkasta. Hienojakoisista polttoaineista tarvitaan tietoa myös turvallisuuteen liittyvistä ominaisuuksista mm. itsesyttymislämpötilasta ja pölyräjähdysominaisuuksista (ISO 6184/1) (Wilén et al. 1999).

Polttoaineiden *teknillinen analyysi* on kosteuden, haihtuvien aineiden, kiinteän hiilen (erotus) ja tuhkan määrittäminen tarkoin määrättyillä menetelmillä. Teknistä analyysiä käytetään polttoaineen laatua arvioitaessa ja se antaa lämpöarvomäärittämisohjeiden perustan polttoaineiden kaupalle (Ranta & Korhonen 1983).

### 2.2.2 Kosteuden määrittäminen

Seuraavassa kuvattu kosteuden määrittäminen perustuu pääasiassa ISO 589 -menetelmään, jota käytetään kotimaisten polttoaineiden analyyseihin. Muita menetelmiä ovat SS 18 71 84 (Biobrännslin och torv) ja kivihiilelle käytettävä DIN 51 718 -menetelmä. Nestemäisten polttoaineiden mm. bioöljyjen määrittämiseen käytetään ASTM E 203 ja ASTM D 1744 -menetelmiä.

Kosteusnäytteiden koko määräytyy käytettävän punnitustarkkuuden sekä polttoaineen palakoon mukaan. Kun punnitustarkkuus on 0,01 g, punnitaan vähintään kaksi 30–100 g suuruista näytettä ja, kun punnitustarkkuus on 0,1 g, punnitaan kaksi 200–400 g suuruista näytettä.

Näytteet kuivataan ilmastoidussa lämpökaapissa  $105 \pm 2$  °C lämpötilassa vakiopainoon. Useimmiten 16 tunnin kuivausaika on riittävä, kun näyte on enintään 30 mm paksuisena kerroksena. Näytteitä ei saa kuivata yli 24 tuntia. Laittaessa kosteita näytteitä kuivumaan lämpökaappiin on kaapissa mahdollisesti ennestään olevat kuivat näytteet poistettava.

Kuivauksen jälkeen näytteiden annetaan jäähtyä eksikaattorissa huoneen lämpötilaan, minkä jälkeen näytteet punnitaan. Mikäli eksikaattoria ei ole käytettävissä, voidaan näytteet punnita kuumina. Kuumana punnittaessa näytteet on punnittava välittömästi sen jälkeen, kun ne otetaan lämpökaapista. Ilmoitustarkkuus on 0,1 prosenttiyksikköä.

Mikäli suoritetaan kosteusmääritysvertailuja, on käytettävä menetelmä sovitettava etukäteen (jäähdytys eksikaattorissa/kuumana punnitseminen).

Kosteusmäärityksiä tehtäessä on varmistettava se, ettei käytettäviin astioihin ole imeytynyt kosteutta ja että nämä kestävät kuivauslämpötilan.

Näytteiden kosteus lasketaan kuivauksen aikana tapahtuvasta massanmuutoksesta yhtälön 1 mukaisesti.

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

missä  $M_{ar}$  on märkápainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%)  
 $m_1$  on määrän näytteen massa (g)  
 $m_2$  on kuivatun näytteen massa (g).

### 2.2.3 Lämpöarvojen määrittäminen

Kiinteiden polttoaineiden kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo määritetään noudattaen standardeja ISO 1928, DIN 51900, ASTM D 1989-96 ja ASTM D 3286-96, ASTM E711, tai BS 1016; part 105 (Nieminen & Ranta 1982).

*Kalorimetrisessä lämpöarvossa* eli ns. ylemmässä lämpöarvossa on otettu huomioon palamisen yhteydessä höyrystyvän veden höyrystymisenergia. Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan yleensä kuitenkin *tehollisena lämpöarvona* (ns. alempi lämpöarvo), joka saadaan muunnoskaavan avulla kalorimetrisestä lämpöarvosta ottamalla huomioon polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa syntyvän ja savukaasuissa poistuvan vesihöyryn haihduttamiseen kuluva lämpömäärä.

Kolmantena lämpöarvona voidaan ilmoittaa *tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa eli saapumistilassa*. Tämä lämpöarvo on alin, koska siinä lämpöarvoa laskettaessa vähennetään energiamäärä, joka joudutaan käyttämään polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen. Lämpöarvo ilmoitetaan yleensä megajouleina polttoainekiloa kohti (MJ/kg, 1 MJ = 0,2778 kWh).

### 2.2.3.1 Kalorimetrinen lämpöarvo

Ilmakuivasta (tasapainokostea) analyysinäytteestä punnitaan noin 1 g, joka poltetaan nesteeseen upotetussa kalorimetripommissa happiatmosfäärissä ja vapautuva lämpö mitataan. Samanaikaisesti määritetään analyysinäytteen kosteus, jonka avulla ilmakuivan näytteen lämpöarvo muunnetaan vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Tuloksena ilmoitetaan kahden rinnakkaismäärittelyn keskiarvona saatu kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo absoluuttisen kuivalle näytteelle, joka lasketaan yhtälön 2 mukaisesti. Rinnakkaismäärittelysten välinen ero saa olla korkeintaan 0,120 MJ/kg. Lämpöarvomäärittelysten ilmoitustarkkuus on 0,01 MJ/kg.

$$Q_{gr,d} = Q_{gr,ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (2)$$

missä  $Q_{gr,d}$  on kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{gr,ad}$  on analyysikostean (ilmakuivan) näytteen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)

$M_{ad}$  on näytteen (ilmakuivan) analyysikosteus (%).

### 2.2.3.2 Tehollinen eli alempi lämpöarvo

Absoluuttisen kuivan polttoaineen tehollinen lämpöarvo saadaan vastaavasta kalorimetrisestä lämpöarvosta yhtälön 3 mukaisesti.

$$Q_{\text{net, d}} = Q_{\text{gr, d}} - 0,02441 \times M \quad (3)$$

missä  $Q_{\text{net, d}}$  on kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{\text{gr, d}}$  on kuiva-aineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo (MJ/kg)

0,02441 (MJ/kg) on veden höyrystyslämmöstä aiheutuva korjaustekijä (+25 °C)

$M$  on polttoaineen kuiva-aineen sisältämän vedyn palaessa syntynyt vesimäärä prosentteina.

### 2.2.3.3 Saapumistilassa olevan polttoaineen tehollinen lämpöarvo

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa lasketaan yhtälön 4 mukaisesti.

$$Q_{\text{net, ar}} = Q_{\text{net, d}} \times \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100} - 0,02441 \times M_{\text{ar}} \quad (4)$$

missä  $Q_{\text{net, ar}}$  on saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{\text{net, d}}$  on kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (MJ/kg)

$M_{\text{ar}}$  on vastaavan polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa (%) painotettuna kostean polttoaineen massalla

0,02441 (MJ/kg) on veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä (+25 °C).

#### 2.2.3.4 Energiatiheys saapumistilassa

Energiatiheys saapumistilassa lasketaan yhtälön 5 mukaisesti.

$$E_{ar} = \frac{1}{3600} \times Q_{net,ar} \times D_{ar} \quad (5)$$

missä  $E_{ar}$  on saapumistilaisen polttoaineen energiatiheys (MWh/i-m<sup>3</sup>)

$Q_{net,ar}$  on saapumistilaisen polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg)

$D_{ar}$  on saapumistilaisen polttoaineen irtotiheys eli tilavuuspaino (kg/i-m<sup>3</sup>)

$\frac{1}{3600}$  on energiayksikön muuntokerroin (MWh/MJ).

#### 2.2.3.5 Toimitettu energiamäärä

Toimitettu energiamäärä  $W$  (MWh:na) lasketaan yhtälön 6 mukaisesti.

$$W = \frac{Q_{net,ar}}{3,6} \times m \quad (6)$$

missä  $\frac{Q_{net,ar}}{3,6}$  on saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon (MJ/kg) muunto yksiköihin  
MWh/t

$m$  on toimitetun polttoaineen massa (tonnia).

#### 2.2.4 Tuhkapitoisuus, $A_d$

Menetelmä perustuu ISO 1171 ja DIN 51719 -standardimenetelmiin. Kuivaa (tai tasapainokosteudessa olevaa) analyysinäytettä punnitaan 0,0001 g:n tarkkuudella 1–2 g hehkutettuun, vakiopainotettu polttoupokkaaseen. (Samanaikaisesti punnitaan tasapainokosteudessa olevasta analyysinäytteestä näytteet analyysikosteuden määrittämiseksi.) Polttoupokkaina käytetään halkaisijaltaan 30–40 mm:n ja korkeudeltaan 10–20 mm:n upokkaita. Upokas asetetaan sisältöineen huoneen lämpötilassa olevaan uuniin. Uunin lämpötila nostetaan 60 minuutissa noin 500 °C:seen. Seuraavien 60 minuutin aikana lämpötila nostetaan 815 ± 15 °C:seen, jossa näyte pidetään vähintään 60 minuuttia. Polton jälkeen upokas sisältöineen jäähdytetään eksikaattorissa ja punnitaan. Näytteistä tehdään kaksi rinnakkaismäärittystä, joiden perusteella lasketut



tuhkapitoisuudet saavat erota toisistaan tietyn verran (puulla korkeintaan 0,2) prosenttiyksikköä. Muulloin määrittäminen on uusittava.

Näytteen tuhkapitoisuus lasketaan yhtälön 7 mukaisesti.

$$A_d = \frac{m_2 \times 100}{m_1} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (7)$$

missä  $A_d$  on kuiva-aineen tuhkapitoisuus (%)

$m_1$  on analyysikostean näytteen massa (g)

$m_2$  on polttojäännöksen massa (g)

$M_{ad}$  on näytteen analyysikosteus (%).

Kierrätyspolttoaineiden tuhkapitoisuus kuiva-aineessa voidaan määrittää myös noudattaen standardeja ASTM D 5142, ASTM E 830 (RDF) tai BS 1016; part 14. Muita kiinteiden polttoaineiden tuhkapitoisuuden määrittämenetelmiä ovat SS 18 71 71, ASTM D 3174-89 ja ASTM E 1755-95.

Tulos ilmoitetaan 0,1 painoprosenttiyksikön tarkkuudella rinnakkaismäärittysten keskiarvona.

### 2.2.5 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen

Määrittäminen tehdään standardien ISO 540, DIN 51730 tai ASTM D 1857 mukaisesti. Pehmenemispiste, puolipallopiste ja juoksevuuspiste määritetään hapettavassa kaasukehässä. ASTM:n standardin mukaan määritetään muodonmuutospiste (IT tai ID), pehmenemispiste (ST), puolipallopiste (HT) ja juoksevuuspiste (FT). Kierrätyspolttoaineiden tuhkansulamiskäyttäytyminen voidaan määrittää myös ASTM E 953 ja BS 1016:part 10 -menetelmin (SFS 5875). Tuhkan sulamisella on tärkeä merkitys kattilan kuonaantumiseen (slagging) ja likaantumiseen (fouling). Slagging-sana kuvaa kattilan kuonaantumista tulipesän säteilyalueella. Tällaiset kerrostumat ovat yleensä paksuja ja ulkopinnaltaan usein selvästi sulaneita. Fouling-sana kuvaa likaantumista kattilan konvektio-osassa, joissa lämpötila kerrostumassa on alhaisempi ja tuhkerostuma suurimmalta osin kiinteässä muodossa.

## 2.2.6 Kemialliset analyysit

Kemialliset analyysit, joista tärkein on alkuainekoostumuksen määrittäminen, voidaan tehdä joko erilaisia analysointimenetelmiä käyttäen (Nieminen & Ranta 1982, SFS 5875):

Rikkimääritys	ISO 334, DIN 51724, ASTM D 4239 , ASTM E 775, ASTM E 778, ISO 351, tai BS 1016; part. 106.4.
Hiili- ja vetymääritys	ISO 609 tai ISO 625, DIN 51721, ASTM D 5373, ASTM E 777, ASTM D 4372, ASTM D 3179
Typpipitoisuus	ISO 333 tai ISO 625, DIN 51722, ASTM D 5373-93, ASTM 778-87, ISO 609, ISO 625, ISO 1994,
Fosforipitoisuus	ISO 622, DIN 51725, ASTM 2795
Klooripitoisuus	DIN 51727, ASTM D 2361-95, ASTM D 4208, ASTM E 776, ISO 352, ISO 587, tai BS 1016; part 8.
Haihtuvat aineet	ISO 562, DIN 51720, ASTM E 897, ASTM D 3175 tai BS 1016; sect. 104.3.
Raskasmetallit	ISO 601 (As), ISO/DIS 15238 (Cd), ISO/DIS 15237 (Hg), ISO/DIS 8983 (Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V ja Zn)
Muut kemialliset	DIN 51723, ASTM D 3761, ASTM D 5987, ASTM E 885.

## 2.2.7 Tilavuus ja tiheys

*Irtotiheys* saapumistilassa ( $D_{ar}$ ) saadaan jakamalla kuorman punnittu massa sen tilavuudella. Polttoaineen irtotiheys voidaan määrittää myös laatikkomenetelmällä VTT:n ohjeen (ENE38/24/97) mukaan. 125 litran (0,5 x 0,5 x 0,5 m) mittalaatikko täytetään polttoaineella ja punnitaan. Laatikkomenetelmä antaa hieman pienempiä irtotiheyden arvoja kuin laitoksella kuormista lasketut tiheydet. Irtotiheyden määrittämiseen eri tilanteissa ovat käytettävissä myös seuraavat standardit: ASTM E 1109, DIN 517052, ISO 1013 ja ISO 567.

Puun tai turpeen kuorman *tilavuus* määritetään laitoksen vastaanottoaikalla ennen kuorman purkamista toteamalla kuormatilan täyttöaste tai muulla vastaavalla

ajoneuvossa tapahtuvalla mittauksella. Jos tällaista mittausta ei tehdä, kuorman tilavuudeksi katsotaan kuljetusositteeseen merkitty kuorman tilavuus.

Puuta mitataan yleisesti pinomenetelmällä. Ensin määritetään kehystilavuus, jolloin mitataan pinon pituus, korkeus ja leveys. Näiden tietojen perusteella lasketaan pinon kehystilavuus. Kehysmitta muutetaan *kiintotilavuudeksi* prosenttikertoimien avulla. Muutettaessa irtotilavuuksia kiintomitoiksi käytetään kertoimena tiiviyslukua (Tapion taskukirja 1997).

Puuaineen *kuiva-tuoretiheys* määritetään esim. upottamalla tuore puukappale vesiasiaan. Kappaleen syrjäyttämä vesimassan paino osoittaa sen tilavuuden. Tämän jälkeen puukappale kuivataan uunissa (103 °C, 48 h) ja punnitaan. Jakamalla kuivatun puukappaleen paino sen tilavuudella tuoreena saadaan kuiva-tuoretiheys (Tapion taskukirja 1997).

### **2.2.8 Palakoko**

Kiinteiden palamaisten polttoaineiden palakoko (partikkelikoko) ja -kokojakauma määritetään erillisestä vähintään 20 litran näytteestä erikseen sovitulla seulontamenetelmällä ja seulasarjoilla. Seulan reikäkokoja valittaessa huomioidaan esim. puupolttoaineiden laatuluokitustaulukoissa annetut partikkelien kokorajat. Hienoaineksen palakokojakauma määritetään analysaattoreilla (esim. Malvern 2600 C) mm. ranskalaisen standardin NF X 11-666 (liite A1, Impola 1998, Wilén et al. 1999).

### **2.2.9 Kivihiilen jauhautuvuus (Hargrove-indeksi)**

Hardgrove-testin avulla tutkitaan hiilen kovuutta ja siten jauhautuvuutta erityisellä Hardgrove-laitteella käyttäen vertailuna standardihiiltä. Tulokset ilmoitetaan ns. Hardgrove-indeksinä, jossa vertailuhiilen, suhteellisen pehmeän laadun, jauhautuvuus on asetettu sadaksi. Mitä vaikeammin jauhautuvaa hiili on, sitä pienempi on sen indeksi. Suomessa käytettyjen kivihiilien jauhautuvuutta esitetään liitteessä B1 (Taipale 1996, Miettinen & Mutanen 1985).

### **2.2.10 Kivihiilen paisumisluku (FSI-indeksi, leipoutuvuusindeksi)**

Paisumisluku kuvaa kivihiilen paisumis- ja koksautumiskäyttäytymistä nopeassa kuumennuksessa hapettomassa tilassa. Osa kivihiilestä käyttäytyy termoplastisesti eli ne muodostavat kuumennettaessa lähes nestemäisen olomuodon, mutta koksautuessaan

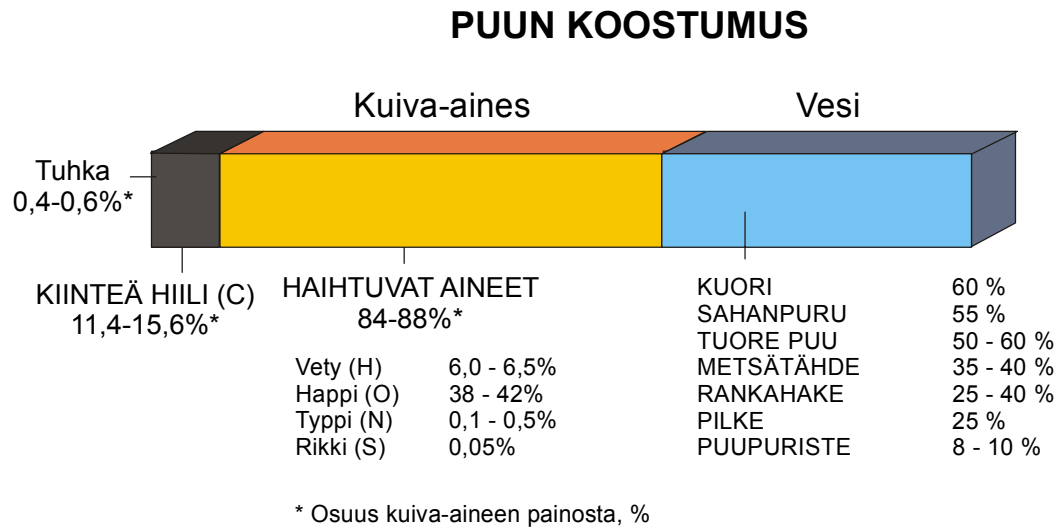
muuttuvat kuitenkin jälleen kiinteäksi. Termoplastisessa vaiheessa ne voivat paisua moninkertaiseksi alkuperäiseen tilavuuteensa verrattuna ja koksautuessaan ne myös säilyttävät tämän tilan. Määrittäminen tehdään siten, että näyte kuumennetaan nopeasti korkeaan lämpötilaan (820 °C) suljetussa upokkaassa, jolloin koksautuva hiili sulaa ja paisuu. Paisumisluvun arvo (0–9) määritetään vertaamalla syntyneen koksautusjäännöksen profiilia standardiprofiileihin, jotka on esitetty ISO 501 -menetelmän kuvauksessa. Suomessa käytettyjen kivihiilien leipoutuvuusindeksejä esitellään liitteessä B (Raiko et al. 1995, Taipale 1996).

### 3. Puupolttoaineiden ominaisuuksia

#### 3.1 Yleistä puupolttoaineista

Puun tärkeimmät rakenneaineet ovat selluloosa, hemiselluloosat ja ligniini. Männyssä, kuudessa ja koivussa selluloosaa on 40–45 % ja hemiselluloosia 25–40 % kuiva-aineen painosta. Männy ja kuusen hemiselluloosapitoisuus on alhaisempi (25–28 %) kuin lehtipuiden, kuten koivun (37–40 %). Havupuiden ligniinipitoisuus on 24–33 % ja lehtipuiden 16–25 %. Ligniini sitoo puun kuidut toisiinsa ja antaa puulle tarvittavan mekaanisen lujuuden. Ligniinissä on paljon hiiltä ja vetyä, siis lämpöä tuottavia aineita. Puussa on lisäksi uuteaineita (terpeeneja, rasva-aineita ja fenoleja), sellaisia yhdisteitä, jotka voidaan uuttaa puusta neutraaleilla orgaanisilla liuottimilla. Esimerkiksi puun pihka koostuu näistä aineista. Puussa on uuteaineita yleensä vajaat 5 %, mutta kuoressa niitä voi olla 30–40 %. Männy pihkapitoisuus on 2,5–4,8 %, kuusen 1,0–2,0 % ja koivun 1,1–3,6 % (Jensen 1977, Hakkila & Heiskanen 1978, Kärkkäinen 1971, Sjöström 1978, Verkasalo 1988).

Haihtuvia aineita puussa on paljon, 80–90 %. Tästä syystä se on pitkäliekkinen polttoaine ja vaatii suuren palotilan (Kytö et al. 1983, kuva 1).



Kuva 1. Puun koostumus (Alakangas et al. 1987).

Puun biomassan jakautuminen runkopuuhun, kuoreen, oksiin ja lehtiin (neulasiin) vaihtelee suuresti puulajin ja puun iän mukaan.

Puun alkuainekoostumus muodostuu pääasiassa hiilestä, vedystä ja hapestä (taulukko 1 ja 2). Näiden osuus puun kuiva-aineen massasta on noin 99 %. Typpipitoisuus jää selvästi alle 0,2 %, ja suurin typpipitoisuus on lepällä. Männy ja kuusen

typpipitoisuus on noin 0,05 %, koivun 0,08–0,1 %, haavan 0,06 % ja harmaalepän 0,19 %. Rikkiä puu sisältää alle 0,05 % (taulukko 3). Eri puulajit poikkeavat alkuainekoostumukseltaan vain vähän toisistaan (Moilanen et al. 1996, Laine & Sahrman 1985, Wilén et al. 1996, Nurmi 1993).

*Taulukko 1. Puun ja kuoren alkuaineiden vertailu (Moilanen et al. 1996).*

Alkuaine, p-% k.a.	Puu	Kuori
C	48–50	51–66
H	6–6,5	5,9–8,4
N	0,5–2,3	0,3–0,8
O	38–42	24,3–40,2
S	0,05	0,05
Cl	< 0,01	< 0,01–0,03

*Taulukko 2. Eri puupolttoainelajien alkuainepitoisuuksia (Taipale 1996, Wilen et al. 1996).*

Puupolttoainelaji	Alkuainekoostumus, p-% kuiva-aineessa					
	C	H	N	O	S	Cl
Kokopuuhake, mänty	51,8	6,1	0,3	41,19 (erotus)	0,01	0,0042
Metsätähdehake	51,3	6,1	0,4	40,85 (erotus)	0,02	0,0076
Havupuuhake					0,02–0,045	
Lehtipuuhake					0,02–0,09	
Sahanpuru, mänty, kuoreton	51	5,99	0,08	42,82 (erotus)	0	< 0,0050
Paju	49,7	6,1	0,4	42,59 (erotus)	0,03–0,05	0,0037
Männyn kuori*	52,5	5,7	0,4	39,65 (erotus)	0,03	0,0085
	54,5	5,9	0,3	37,7		
Kuusen kuori*	49,9	5,9	0,4	41,43 (erotus)	0,03	0,0279
	50,6	5,9	0,5	40,2		
Koivun kuori	56,6	6,8	0,8	34,2		

\* arvot kahdesta eri lähteestä.

*Taulukko 3. Havu- ja lehtipuiden eri osien kuiva-aineen rikkipitoisuuksia (Hakkila & Kalaja 1983).*

Havupuu	Rikkipitoisuus k.a.:ssa (p-%)	Lehtipuu	Rikkipitoisuus k.a.:ssa (p-%)
Runkopuu	0,0116	Runkopuu	0,0090
Runkopuun kuori	0,0343	Runkopuun kuori	0,0341
Oksat	0,0203	Oksat	0,0218
Neulaset	0,0673	Neulaset	0,0965
KOKO PUU	0,0236	KOKO PUU	0,0212

Pajun kuiva-aineen rikkipitoisuus on keskimäärin 0,03 % (Tahvanainen 1995). Taulukoissa 4 ja 5 käsitellään puupolttoaineen mineraali- ja raskasmetallipitoisuuksia.

*Taulukko 4. Havu- ja lehtipuiden eri osien mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa (Hakkila & Kalaja 1983).*

Puulaji/osa	Päämineraali kuiva-aineessa, p-%				Hivenainepitoisuus kuiva-aineessa, ppm				
	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	B	Cu
HAVUPUU									
Runkopuu	0,01	0,06	0,12	0,02	147	41	13	3	2
Runkopuun kuori	0,08	0,29	0,85	0,08	507	60	75	12	4
Oksat	0,04	0,18	0,34	0,05	251	101	44	7	4
Neulaset	0,16	0,60	0,50	0,09	748	94	75	9	6
KOKO PUU	0,03	0,15	0,28	0,05	296	85	30	6	4
LEHTIPUU									
Runkopuu	0,02	0,08	0,08	0,02	34	20	16	2	2
Runkopuun kuori	0,09	0,37	0,85	0,07	190	191	131	17	13
Oksat	0,06	0,21	0,41	0,05	120	47	52	7	4
Neulaset	0,21	1,17	1,10	0,19	867	135	269	21	10
KOKO PUU	0,05	0,21	0,25	0,04	83	27	39	6	5

*Taulukko 5. Puupolttoaineiden ja puun osien raskasmetallipitoisuuksia (Taipale 1996).*

Puuaine	Raskasmetallipitoisuus kuiva-aineessa, mg/kg								
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	V	Zn	Ni
Puupolttoaine	0,04–0,4	0,1–0,4	1–2	0,6–6	0,01–0,02	0,6–14	0,3–5,0	5–40	
Oksa, kuusi		0,23	0,15	6,68		9,25		71,2	3,34
Kuori				4,6				90	
Neulainen, kuusi		0,09	0,06	2,48		0,30		14	1,62
Neulainen, mänty		0,30	0,08	3,76		1,25		65	1,45
Koivunlehti		0,30	0,08	3,76		1,25		65	1,45
Pajut		0,8–1,7	3	2–4		0,4–2,0		40–105	

Kuorettoman runkopuun tuhkapitoisuus on tavallisesti alle 0,5 %, havupuun kuoren alle 2 % (vrt. taulukko 6). Puun tuhkan koostumus on taulukosta 8. Puun tuhkapitoisuus on tavallisesti pienempi kuin muiden kiinteiden polttoaineiden, mikä helpottaa tuhkan käsittelyä ja pienentää tuhkan käsittelyn kustannuksia. (Kytö et al. 1983, Wilen et al. 1996).

Puun tuhkan sintraantuminen alkaa 900–1000 °C:n lämpötilassa (Solantausta & Asplund 1979a). Muodonmuutospiste (IT) on eri lähteiden mukaan 1 150–1 490 °C,

pehmenemispiste (ST) 1 180–1 525 °C puolipallo piste (HT) 1 230–1 650 °C ja juoksevuuspiste (FT) 1 250–1 580 °C (Kytö et al. 1983, Wilén et al. 1996) (taulukko 7).

Taulukossa 8 esitetään puun tuhkan koostumus ja taulukossa 9 puun polton raskasmetalleja arina- ja lentotuhkassa.

*Taulukko 6. Puun tuhkapitoisuus (Taipale 1996, Wilén et al. 1996, Tahvanainen 1995).*

Puupolttoainelaji	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, p-%
Halko/naiikat, Halko ja klapi	0,5 / 1,2
Kokopuuuhake, mänty,/Kokopuuuhake, sekapuu	0,6 / 0,5
Koivuhake	0,4–0,6
Hakkuutähdehake	1,33
Hakkuutähdehake, kuusi	2,0–6,0
Kantohake	0,50
Pajuhake	1,7
Sahanpuru, kuorineen sahanpuru, mänty, kuoreton	1,1 / 0,08
Kutterinlastu	0,40
Männyn kuori	1,70
Kuusen kuori*	2,34 / 2,8
Koivun kuori	1,60

\* kaksi eri arvoa kirjallisuudesta.

*Taulukko 7. Puun tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Wilén et al. 1996).*

Polttoaine	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen, °C							
	Hapettava ilmakehä				Pelkistävä ilmakehä			
	IT	ST	HT	FT	IT	ST	HT	FT
Kokopuuuhake, mänty	1 210	1 25	1 250	1 275	1 230	1 240	1 245	1 290
Metsätähdehake	1 175	1 205	1 230	1 250	1 175	1 225	1 245	1 260
Sahanpuru, mänty	1 150	1 180	1 200	1 225	1 135	1 165	1 185	1 205
Kuori, kuusi	1 405	1 550	1 650	1 650	1 565	1 580	1 650	1 650
Kuori, mänty	1 340	1 525	1 650	1 650	1 375	1 504	1 506	1 507
Paju	1 490			1 580	1 570			1 580



Taulukko 8. Eräiden puupolttoaineiden tuhkan koostumus (p-%) pääkomponenttien oksideina (Taipale 1996, Kytö et al. 1983, Moilanen et al. 1996).

Puulaji	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Koivu 1)*	57,80	11,50	7,70	7,70		3,80	3,80	7,70		
Koivu 2)*	46,00	15,00	14,90	11,60	1,30	2,60	0,90	8,60		
Mänty	42,00	15,20	1,00	16,00	5,50	4,50	4,60	3,00		
Kuusi	36,70	29,60	1,00	10,00	8,50	4,20	1,00	3,20		
Paju	30,80	26,50	4,80	5,10	0,20	2,10	0,43	0,30	0,30	0,02
Männyn kuori 1)*	40,00	3,30	2,60	2,60	5,00	3,70	14,50	2,00		
Männyn kuori 2)*	40,60	7,60	4,80	4,50	0,30	2,00	1,30	0,50	5,30	0,10
Kuusen kuori	50,50	3,50	2,60	4,20	1,80	1,60	21,70	2,80		
Koivun kuori	60,30	4,10	3,50	5,90	1,00	4,80	3,00	0,70		
Sahanpuru, mänty	41,80	12,30	5,20	11,80	1,90	1,90	8,30	0,20	2,00	0,10

\* lähteessä Kytö et al. on kahdet arvot.

Taulukko 9. Puun poltossa syntyneiden raskasmetallien pitoisuudet arina- ja lentotuhkissa (Taipale 1996).

Alkuaine	Alkuainepitoisuus, mg/kg	
	Pohjatuikka	Lentotuikka
As (arseeni)	0,2–3,0	1–60
Cd (kadmium)	0,4–0,7	6–40
Co (koboltti)	0–7	3–200
Cr (kromi)	60,0	40–250
Cu (kupari)	15–300	200
Hg (elohopea)	0–0,4	0–1
Mn (mangaani)	2 500–5 500	6 000–9 000
Ni (nikkeli)	40–250	20–100
Pb (lyijy)	15–60	40–1 000
Se (seleeni)		5–15
V (vanadiini)	10–120	20–30
Zn (sinkki)	15–1 000	40–700

Tuoreen puun kosteus on yleensä 40–60 % (taulukot 10 ja 11). Kosteuteen vaikuttavat, kasvupaikka, puulaji sekä puun ikä, ja lisäksi kosteus vaihtelee puun eri osissa. Kasvavan lehtipuun kosteus vaihtelee vuodenajoin. Elävässä puussa soluseinä on kyllästynyt vedellä ja soluontelo sekä soluvälit ovat veden täyttämiä. Kuivattaessa puusta poistuu ensin nk. vapaa vesi eli onteloissa oleva vesi. Viimeisenä poistuu sidottu eli soluseinämän vesi. Puun fysikaaliset ominaisuudet alkavat muuttua, kun tämä sidottu vesi alkaa poistua eli alitetaan nk. puun solujen kyllästymispiste. Puuta kuivattaessa sen tilavuus kutistuu.

*Taulukko 10. Havupuiden eri osien kosteuspitoisuudet (Kytö et al. 1981, Pellikka & Saviharju 1983, Taipale 1996).*

Puun osa	Kosteuspitoisuus, p-%	
	Mänty	Kuusi
Runkopuu	45–50	40–60
Oksat	50–56	42–46
Latva	60	60 (50*)
Kuori:		
kaarna	36–60	38–58
muu kuori	53–67	47–63

\* Pohjois-Suomen kuuset

Puupolttoaineiden käyttötapa määrää yleensä, miten kosteana sitä voidaan käyttää. Suuremmat laitokset voivat käyttää kosteaa polttoainetta, mutta esimerkiksi kotitaloudessa käytettävän puun on oltava kuivaa. Tavallisesti kotitaloudessa ja maataloilla käytettävä polttopuu kuivataan ennen käyttöä. Vanha kuivaustapa on rasikuivatus, jossa puut kaadetaan levälleen alkukesästä ja käytetään hyväksi lehtien ja neulasten haihdutuskykyä. Puut voidaan myös kerätä karsimattomina tai karsittuina kasoihin kuivumaan. Halot kuivuvat myös pinoissa ja pilkkeet. Tulisijoissa käytettävän polttoaineen kosteuden tulisi olla 15–20 %. Keskuslämmityskattiloissa hakkeen varastointikosteus ei saisi ylittää 25 %:a hakkeen säilyvyyden kannalta. Mikäli haketta käytetään alle 1 MW:n tehoisessa laitoksessa, ei polttoaineen kosteus saisi ylittää 40 %:a (Laine & Sahrman 1985, Linna et al. 1983, Siltanen & Rantasalo 1984, Simola & Mäkelä 1976).

*Taulukko 11. Puupolttoaineiden kosteuspitoisuuksia (Pellikka & Saviharju 1983, Immonen & Seppälä 1984, Taipale 1996, Tahvanainen 1995).*

Puupolttoainelaji	Kosteuspitoisuus, p-%	
	Puristamaton	Puristettu
Halot ja pilkkeet, juuri hakatut	45	
Halot ja pilkkeet, yhden kesän yli varastoidut	25	
Halot ja pilkkeet, kahden kesän yli varastoidut	20	
Rankahake, tuore	50	
Rankahake, rasikuiva	40	
Rankahake, ilma-kuiva, ylivuotinen	25–30	
Metsätähdehake, mänty	60	
Metsätähdehake, kuusi	50–57	
Metsätähde, oksahake	50	
Kantohake	35	
Pajuhake	35–40	
Hakkeen seulontajäte	50–55	
Sahaustähde		
Sahanpuru ja hake, kuivaamaton	50–55	
Sahanpuru, kuivatusta sahatavarasta	5–15	
Tasauspätkien hake	15	
Hiomapöly	5–10	
Hiomapöly, puusepän kuiva	15–20	
Kutterinpuru, puusepän kuiva	5–10	
Kutterinpuru, ilma-kuiva	15–20	
Puusepänteollisuuden jäte	5–10	
Puusepänteollisuuden jäte, ilma-kuiva	15–20	
Vanerijäte	35–50	
Vanerin tasausreunat	5–10	
KUITUPUUN KUORI		
Havupuu, kuiva kuljetus		
• kuiva kuorinta	40–50	
• märkä kuorinta	60–70	55–62
Havupuun märkä kuljetus tai varastointi vedessä	70–85	55–62
Koivupuu		
• märkä kuorinta	65–70	55–62
• kuiva kuorinta	40–50	
SAHANPUUN KUORI		
Havupuu		
• kuiva käsittely	40–50	
• märkä käsittely	60–80	55–62
Koivu	35–50	

Puuaineksen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 18,3–20,0 MJ/kg. Latvojen, oksien ja pienikokoisten puiden lämpöarvo on hieman suurempi kuin kokopuun (Kytö et al. 1983, Nurmi 1993, 1997 ja 2000). Esimerkiksi männyllä oksien lämpöarvo on 19,99 MJ/kg ja rungon 19,53 MJ/kg (Nurmi 2000). Suurimmat vaihtelut puun eri osien välillä on lepällä ja haavalla. Puun lämpöarvo on muihin kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna pieni, mikä asettaa omat vaatimuksensa puun käsittely- ja polttolaitteille. Myös varastotilaa tarvitaan yleensä enemmän kuin muita kiinteitä polttoaineita käytettäessä. (Laine & Sahrman 1985, Wilén 1996.) Taulukot 12–15 havainnollistavat puun tehollisen lämpöarvon vaihteluja.

*Taulukko 12. Puun osien teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa (MJ/kg) puulajeittain (Nurmi 1993, 2000).*

Puulaji	Rungon puuaine	Rungon kuori	Koko runko	Latvus	Lehdet/Neulas et	Kokopuu	Kannot
Mänty ( <i>Pinus sylvestris</i> ), pienpuu Varttunut puu	19,31	19,53	19,33 19,55	20,23 20,09	21,00 21,04	19,53 19,63	22,36
Kuusi ( <i>Picea abies</i> ) pienpuu varttunut puu	19,05	18,80	19,02 19,16	19,77 19,41	19,22 19,19	19,29 19,24	19,18
Hieskoivu ( <i>Betula Pubescens</i> ), pienpuu varttunut puu	18,62	22,75	19,19 19,06	19,94 19,33	19,77 19,36	19,30 19,09	18,61
Rauduskoivu, ( <i>Betula pendula</i> ) pienpuu varttunut puu	18,61	22,53	19,15 18,96	19,53 19,61	19,72 19,76	19,21 19,05	18,50
Harmaaleppä ( <i>Alnus incana</i> ); pienpuu varttunut puu	18,67	21,57	19,00 19,14	20,03 19,74	20,57 20,54	19,18 19,22	19,27
Tervaleppä ( <i>Alnus glutinosa</i> ), pienpuu varttunut puu	18,89	21,44	19,31 18,90	19,37 19,47	20,08 19,78	19,31 19,00	18,91
Haapa ( <i>Populus tremula</i> ), pienpuu varttunut puu	18,67	18,57	18,65 18,62	18,61 18,96	19,18 19,02	18,65 18,66	18,32

*Taulukko 13. Oksien (yli ja alle 5 mm) eri osien tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg (Nurmi 1997).*

Puulaji	Puuaines			Kuori				Lehdet	Latvus ilman lehtiä/neulasia
	>5 mm	< 5 mm	Koko oksa	Sisäkuori	Ulkokuori	< 5mm	Koko kuori		
Mänty	20,01	19,96	19,99	19,28	20,36	31,39	20,30	21,04	20,09
Kuusi	19,36	19,23	19,30	17,87	20,77	20,27	19,60	19,19	19,41
Hieskoivu	18,68	18,57	18,64	18,49	28,53	20,58	21,03	19,36	19,33
Rauduskoivu	18,53	18,65	18,57	19,07	29,87	20,13	21,78	19,76	19,61
Harmaa leppä	18,83	19,11	18,88	20,11	25,15	21,85	21,69	20,54	19,74
Tervaleppä	18,48	18,66	18,51	19,55	23,92	21,76	21,29	19,78	19,47
Haapa	18,76	19,00	18,81	18,46	20,48	19,69	19,20	19,02	18,96

*Taulukko 14. Latvuksen eri osien tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (Nurmi 1997).*

Puun osa	Mänty	Kuusi	Hieskoivu	Rauduskoivu	Harmaa leppä	Tervaleppä	Haapa
Kuori	20,30	19,60	21,03	21,42	21,69	21,25	19,20
Puuaines	19,99	19,30	18,64	18,57	18,87	18,51	18,81
Latvus ilman lehtiä	20,09	19,41	19,33	19,61	19,74	19,47	18,96
Lehdet/neulasat	21,04	19,19	19,36	19,76	20,37	19,78	19,85
Latvus lehtineen/neulasineen	20,33	19,33					

*Taulukko 15. Eri puupolttoainelajien tehollisia lämpöarvoja kuiva-aineessa (Pellikka & Saviharju 1993, Hakkila et al. 1978, Laine & Sahrman 1985, Tahvanainen 1995, Taipale 1996, Wilén 1996).*

Puupolttoainelaji	Puulaji	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg
Kuorellinen pinopuu	Mänty	19,3
	Kuusi	19,1
	Koivu	19,5
Taimistojen kokopuuhake	Mänty	20,5
	Kuusi	19,6
	Koivu	19,6
Harvennusten kokopuuhake	Mänty	19,6
	Kuusi	19,2
	Koivu	19,0
Hakkuutähdehake neulasitta	Mänty	20,4
	Kuusi	19,7
	Koivu	19,7
Hakkuutähdehake neulasineen	Mänty	20,5
	Kuusi	19,8
Metsätähdehake		19,3
Kanto- ja juuripuu	Mänty	19,5
	Kuusi	19,1
Sahanpuru		18,9
	Mänty, kuoreton	19,0
Kutterinlastu		18,9
Kuori	Mänty	20,0
	Kuusi	18,6
	Koivu	22,7
Hake	Paju	16,2

Puun tiheys (kuiva-tuoretiheys) voi vaihdella kasvupaikan, geneettisen perimän ja iän mukaan, ja samankin lajin samalla paikalla kasvavien runkojen tiheyksissä saattaa olla eroja (ks. taulukoita 16–18). Koivun tiheys on yleensä 470–500, männyn 380–420, kuusen 380–400, harmaalepän 360–370, haavan 400, pihlajan 540, tammen 600, saarnin 590, katajan 510 ja nuorten pajujen 380 kg/m<sup>3</sup> (Kytö et al. 1983, Björklund 1984, Björklund & Ferm 1982, Hakkila et al. 1978, Tahvanainen 1995).

Taulukko 16. Kuiva-tuoretiheyksien vaihteluita eri puulajien eri osissa (Kytö et al. 1983).

Puulaji	Kuiva-tuoretiheys, kg/m <sup>3</sup>				
	Koko puu	Runkopuu	Oksat	Kanto	Kuori
Mänty	385	390–410	450	450	300
Kuusi	400	380–400	610	410	340
Koivu	475	490	530	510	550
Leppä	370	360–430	405–440		
Haapa	385	360	450		
Pyökki		575–625	750		

Taulukko 17. Eri puutavaralajien keskimääräisiä kuiva-tuoretiheyksiä (Hakkila et al. 1978).

Puutavaralaji	Puulaji	Kuiva-tuoretiheys, kg/m <sup>3</sup>
Kuorellinen pinopuu	Mänty	390
	Kuusi	380
	Koivu	490
	Leppä	360
Harvennusten kokopuuhake	Mänty	385
	Kuusi	400
	Koivu	475
	Leppä	370
Hakkuutähdehake neulasitta	Mänty	405
	Kuusi	465
	Koivu	500
Hakkuutähdehake neulasineen	Mänty	395
	Kuusi	425
Sahausjäte kuorellinen	Havupuu	415
Kanto- ja juuripuu	Mänty	475
	Kuusi	435

Taulukko 18. Vesipajun kuivatuoretiheys, kosteusprosentti ja kuoriprosentti eri-ikäisillä vesoilla talvella (Hytönen & Ferm 1984).

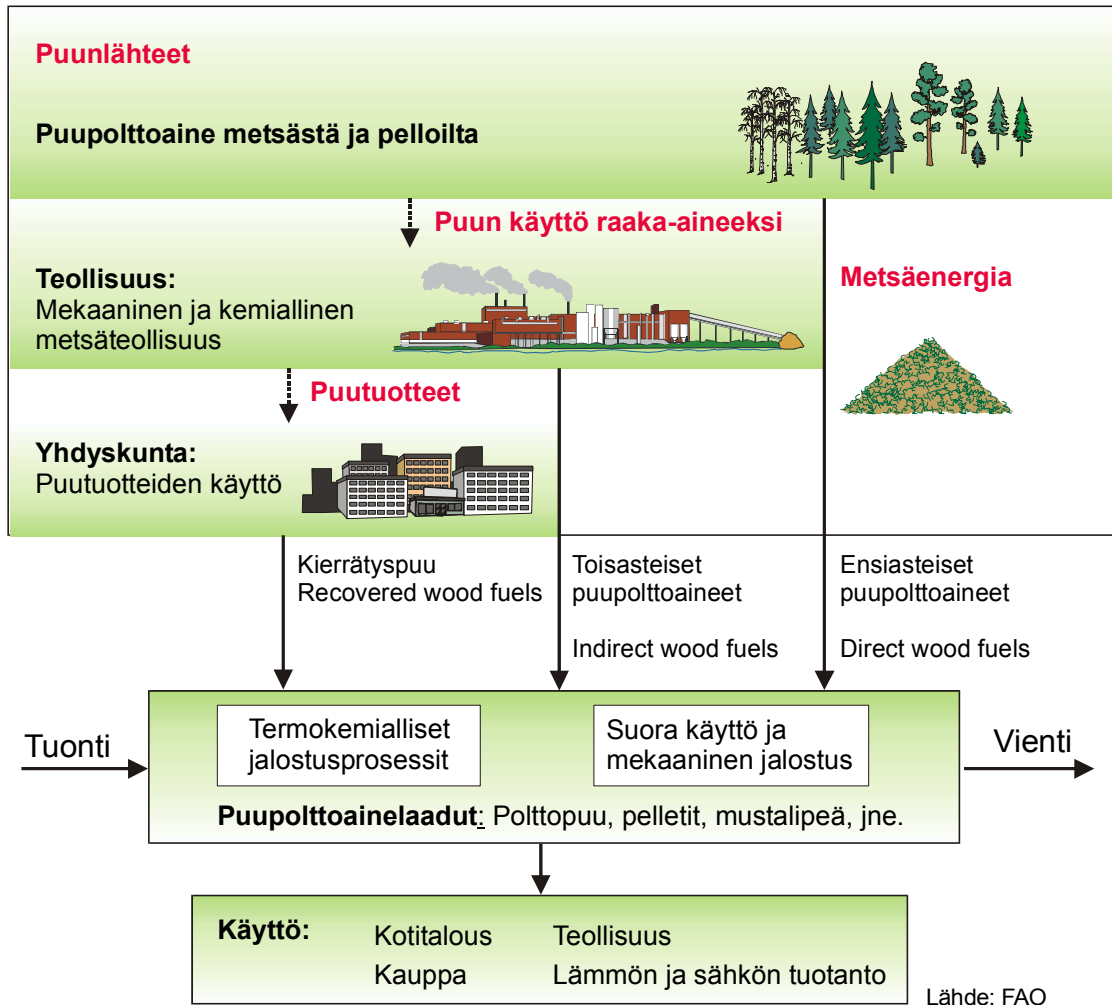
Ikä vuosia	Kuivatuoretiheys kg/m <sup>3</sup>	Kosteus %	Kuori %
1	284	64	34
2	356	57	22
4	360	57	13
5	382	56	11

Puupolttoaineet voidaan luokitella eri luokkiin niiden laadun (hake, kuori, pilke, jalostetut puupolttoaineet, kuten pelletit, briketit ja puuhiili) tai niiden alkuperän mukaan, kuten esim. FAOn metsäosasto luokittelee puupolttoaineet (kuva 2). FAOn luokitus puupolttoaineille on

- ”Ensiasteiset”, kiinteät, nestemäiset tai kaasumaiset puupolttoaineet (direct wood fuels) ovat metsästä tai pelloilta kasvatetusta puusta tai puunosista valmistettuja polttoaineita.
- ”Toisasteiset”, kiinteät, nestemäiset ja kaasumaiset puupolttoaineet (indirect wood fuels) ovat teollisuuden sivutuotteina tai puutähteinä saatavia puupolttoaineita.
- Kierrätyspuupolttoaineet (recovered wood fuels) ovat käytetyistä puutuotteista valmistettuja puupolttoaineita.

Tässä julkaisussa puupolttoaineita käsitellään laadun mukaan, ja kierrätyspuupolttoaineet käsitellään kierrätyspolttoaineet-luvussa.





Kuva 2. Puupolttoaineiden luokittelu alkuperän mukaan (FAO).

## 3.2 Hake

### 3.2.1 Yleisesti hakkeesta polttoaineena

Polttohake on hakkurilla kokopuusta, rangoista, metsätähteestä tai muusta puuaineksesta tehtyä polttoainetta. Kokopuuhake valmistetaan karsimattomasta puusta ja rankahake karsituista rangoista. Hakkuutähteestä eli latvoista, oksista ja raivauspuusta tehdään hakkuutähdehaketta ja kannoista kantohaketta tai -murskettä. Sahanhake on sahauksen sivutuotteena valmistettua haketta (Hakkila 1992).

Haketta käytetään rakennusten lämmityskattiloissa, lämpölaitoksilla ja teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksilla. Kosteus onkin polttohakkeen tärkein laatuominaisuus. Hakepalan keskimääräinen tavoitepituus on tavallisesti 30–40 mm.

Kun kosteus tunnetaan, merkittävin epävarmuustekijä on tiiviys, joka vaihtelee, sillä se riippuu haketuksen, murskauksen ja kuljetuksen teknisistä ratkaisuista. Hakkeen tiiviys osoittaa kiintotilavuuden ja irtotilavuuden suhteen eli sen, kuinka paljon kiintokuutioita tulee yhdestä irtokuutiosta. Tärkeimmät tekijät, jotka vaikuttavat tiiviyyteen ovat palakoko, palan muoto, puulaji, oksat, kosteus, vuodenaika, kuormausmenetelmä ja painuminen (Hakkila 2000).

Hakkeen palakoko on epäyhtenäinen, pienet palaset täyttävät suurten välisiä tiloja kuormauksen ja kuljetuksen aikana. Kokopuuraaka-aineesta ja hakkuutähteestä tehdyssä hakkeessa on enemmän hienoainesta kuin esimerkiksi palakooltaan tasajakeisemmassa kuitupuuhakkeessa, joten polttohakkeen tiiviys on yleensä hieman suurempi. Jos hakkeeseen sekoitetaan sahanpurua, tiiviys kasvaa merkittävästi. Mitä suurempi on hakepalasen pinnan lävistäjän suhde palan paksuuteen, sitä alhaisempi on hakkeen tiiviys (Hakkila 2000).

Hauraista puulajeista kuten harmaalepystä tehty hake sisältää tavanomaista enemmän hienojaetta, joka siis lisää hakkeen tiiviyyttä. Tuoreista oksista, erityisesti norjista lehtipuuoksista syntyy ylipitkiä kappaleita, jotka alentavat hakkeen tiiviyyttä. Kuivuneen raaka-aineen haurastuneista oksista syntyy vähemmän ylipitkiä oksanpätkiä. Siksi raaka-aineen kuivuminen lisää hakkeen tiiviyyttä. Jäätynyt raaka-aine on haurasta ja tuottaa haketuksessa enemmän hienoainesta. Siksi jäätyneestä puusta tehdyn hakkeen tiiviys on yleensä normaalia korkeampi (Hakkila 2000).

Hakkurin torven läpi puhallettu hake tuottaa tiiviimmän kuorman kuin kuljettimelta, kippilavalta, etukuormaajan kauhasta tai siilosta vapaasti putoava hake. Tulos riippuu kuitenkin hakkurin puhallusvoimasta sekä hakkeen lentokaaresta ja -etäisyydestä.

Kuorman päältä puhaltava hakkurin torvi tuottaa tiiviimmän kuorman kuin perästä puhaltava. Kuljetuksen aikana suurten palojen välisiä ilmatiloja täyttyy pienemmillä paloilla, minkä seurauksena kuorma tiivistyy ja painuu. Painuminen riippuu lähtötiivyydestä, kuljetusmatkasta, tien tasaisuudesta sekä hakkeen mahdollisesta jäätymisestä kuormassa (Hakkila 2000).

Painuminen on tuntuvaa heti matkan alussa mutta tasaantuu jo 0–20 km:n kuluttua. Milloin kuorman koon rajoitteena on pikemminkin hakkeen tilavuus kuin massa, lähtötiivyyden merkitys on kuljetustalouden kannalta tärkeämpi kuin lopputiivyyden. Lopputiiviyys kuitenkin ratkaisee mittaustuloksen, jos kuorma mitataan vastaanottopäässä kehysmitanmitan mukaan. Eri tekijöiden vaikutus hakkeen tiivyyteen ei ole kuitenkaan aina helposti ennustettavissa, sillä vaikutukset ovat myös laitekohtaisia. Yleensä polttihakkeen tiiviyys on 0,37–0,45 ja kuorimurskeen 0,3–0,4. Nyrkkisääntö hakkeelle on 0,4 (Hakkila 2000).

Yksiselitteistä laadun määrittämistä varten on laadittu puupolttoaineiden laatuohje (liite A 2). Laatuohje määrittelee menettelyn, jota käyttäen puupolttoaineiden – polttihakkeen, purun ja kuoren – laatu ja energiamäärä voidaan ilmoittaa ja todeta yksikäsitteisesti ja tarkoituksenmukaisesti. Laatuohjetta ja puupolttoaineiden laatu-luokitusta hyödynnetään ensisijaisesti puupolttoainekaupassa toimitussopimusten liitteenä. Muita laatuohjeen hyödyntäjiä ovat mm. laitos- ja laitesuunnittelijat sekä polttoaineen tuottajat. Laatuvarmuus tarkoittaa, että hake on keskipalakooltaan ja kosteuspitoisuudeltaan haluttua laitoskohtaista tuotetta; hakkeen joukossa ei saa olla kuntaa, kiviä tai metallia tai pitkiä tikkuja tai oksakeppejä (Impola 1995, 1998).

Vuoden 1999 aikana on käynnistynyt myös eurooppalaisen kiinteiden biopolttoaineiden standardin (CEN Solid biofuels standardisation) valmistelu.

## **3.2.2 Hakkuutähteet**

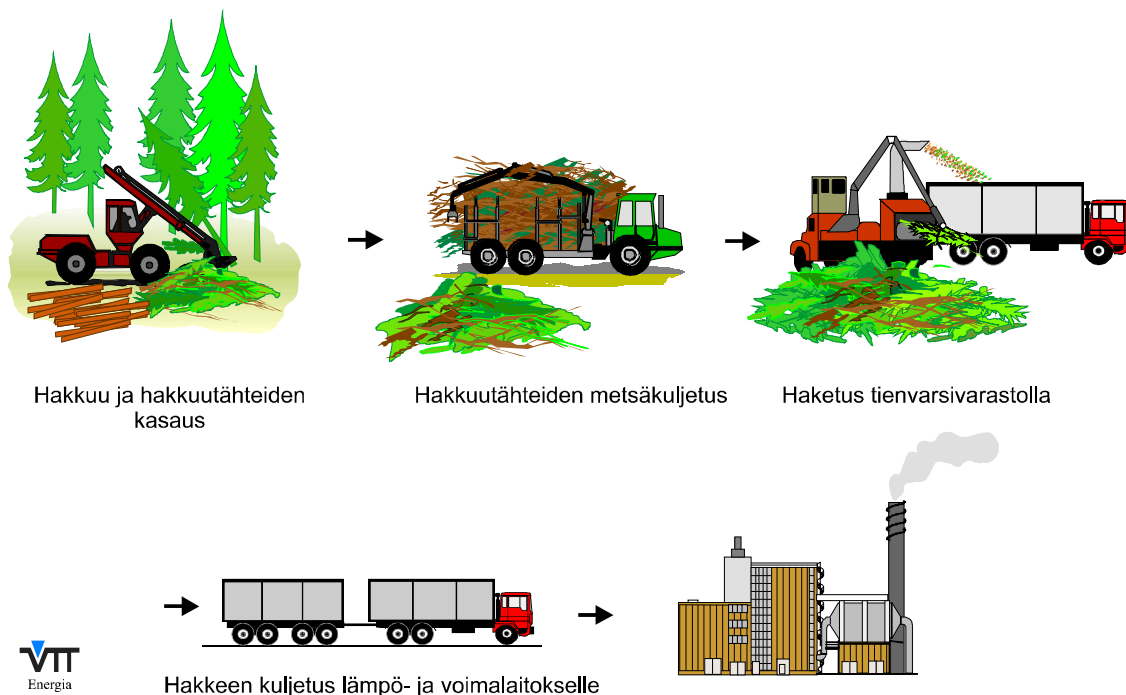
### **3.2.2.1 Hakkuutähteiden käyttö ja potentiaali**

Hakkuutähteet muodostavat käyttökelpoisen ja määrällisesti merkittävän raaka-ainelähteen puupolttoaineiden tuotannossa. Ainespuun hakkuuvaiheessa muodostuvan hakkuutähteen määrä ja koostumus vaihtelee huomattavasti hakkuukohteittain. Koivikoiden ensiharvennuksilla metsään jää hakkuutähteeksi lähinnä alle ainespuukokoisia latvoja ja niihin sitoutuneet oksat ja kertymä on varsin pieni. Uudistushakkuukoiksilla sen sijaan hakkuutähdekertymä on huomattavasti suurempi ja koostuu lähinnä oksista ja niihin sitoutuneista neulasista sekä jopa huomattavasta määrästä hylkypölkkyjä, mikäli hakkuukohteella on tyvilahoja runkoja. Pääte-

hakkuukuusikoista saatavalla hakkuutähdehakkeella onkin metsähakkeista parhaat mahdollisuudet tuottaa lämpöenergiaa kilpailukykyiseen hintaan (Alakangas et al. 1999).

Hakkuutähdettä voidaan korjata joko heti hakkuun jälkeen tuoreena neulasineen tai kesäkauden jälkeen kuivahtaneena, jolloin huomattava osa neulasista sekä pieni määrä kuorta ja ohuita oksia jää hakkuualalle. Kuivahtanutta hakkuutähdettä korjattaessa talteensaanto pienenee ja korjuun kannattavuus heikkenee. Ruotsissa hakkuutähteet korjataan neulasitta, jotta neulasten sisältämä ravinnemäärä jää hakkuualalle. Suomessa sen sijaan hakkuutähteet korjataan usein pääosin tuoreena (Alakangas et al. 1999).

Suomessa yleisempiä käytettyjä menetelmiä on tienvarsihaketuksen perustuva hakkuutähteen tuotantomenetelmä, joka on esitetty kuvassa 3. Menetelmässä hakkuutähteet kasataan palstalle ainespuun korjuun yhteydessä. Hakkuutähdekasat kuljetaan tienvarsivarastoon, josta ne haketetaan suoraan hakeautoon, joka vie ne laitokselle. Lisäksi hakkuutähteet voidaan hakettaa palstahakkurilla tai monitoimihakkurilla jo palstalla tai hakettaa käyttöpaikalle joko hakkurilla tai murskaimella. Uusin kehitteillä oleva menetelmä on paalaus, jossa hakkuutähteet paalataan ja muuten käytetään ainespuun korjuun kalustoa. Hakkuutähteet paalataan noin 450–550 kg nippuihin, jolloin ne myös tiivistyvät. Niput kuljetaan laitokselle ja haketetaan. (Alakangas et al. 1999).



Kuva 3. Tienvarsihaketuksen perustuva hakkuutähteen korjuumenetelmä (Alakangas et al. 1999).

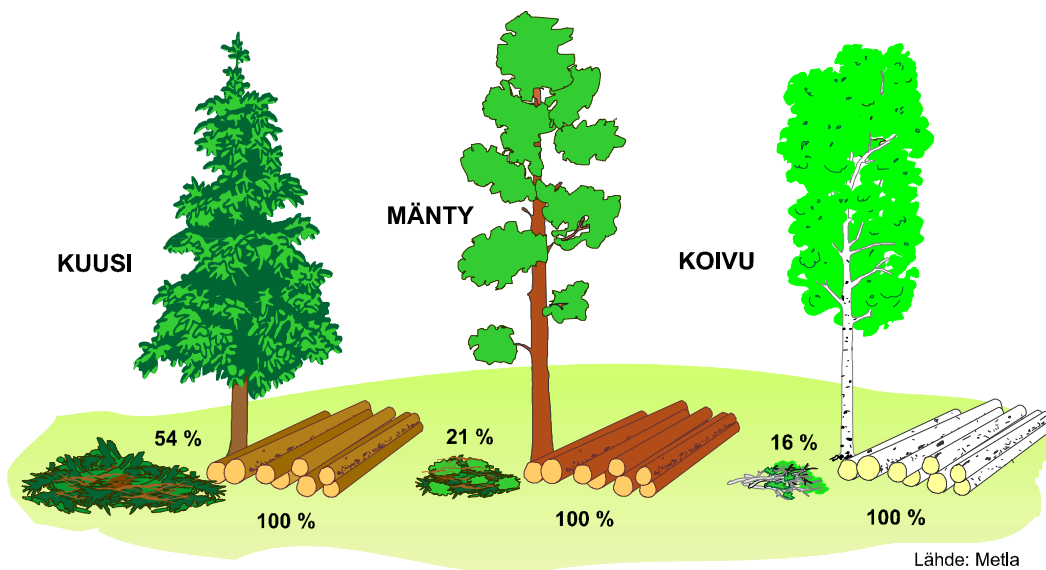
Vuotuinen ainespuun hakkuumäärä on 62 milj. m<sup>3</sup>. Näissä hakkuissa hakkuutähdettä jää metsään 29 milj. m<sup>3</sup> vuodessa (24 milj. m<sup>3</sup> latvusmassaa ja 5 milj. m<sup>3</sup> kuorellista runkokuuta). Arvioiden mukaan tästä hakkuutähdemäärästä hyödynnetään nykyisin alle 1 %, kun kaikkien metsähakkeiden nykyinen käyttökin on vain 1 TWh/a (Hakkila & Fredriksson 1996, Hakkila 1989). Hakkuutähteiden käyttö on ollut viime vuosina noin 0,6 milj. m<sup>3</sup> (Hakkila & Alakangas 2000).

Metsäntutkimuslaitos arvioi tuoreen hakkuutähteen korjuukelpoiseksi määräksi vuodessa kuusikoiden ja männiköiden päätehakkUILTA 8,6 milj. m<sup>3</sup> (energiasisältö 18,1 TWh). Jos hakkuutähde korjataan kuivahtaneena ja ilman neulasia, vuotuinen talteensaantomäärä on 5,6 milj.m<sup>3</sup> (12,3 TWh). Laskelmissa on ainespuun vähimmäiskertymänä kuusella ollut 200 m<sup>3</sup>/leimikko ja männyllä 400 m<sup>3</sup>/leimikko. Hakkuutähteen talteensaanto on laskelmissa ollut 70 %. Kun hakkuutähteen annetaan kuivahtaa maastossa, osin neulasettoman hakkuutähteen talteensaanto jää alle 50 %:iin. Arviossa hakkuutähteitä ei ole laskettu korjattavaksi kivisiltä, ravinneköyhiltä tai muutoin herkiltä uudistusaloilta.

VTT Energia arvioi hakkuutähdehakkeen vuotuiseksi taloudelliseksi tuotantopotentiaaliksi 3,7 milj. m<sup>3</sup> eli energiasisällöltään 7,7 TWh. Jos hakkuutähteet korjattaisiin maastossa kuivahtaneena, olisi kuivaa hakkuutähdettä korjattavissa vuosittain n. 2,4 milj. m<sup>3</sup> (5,0 TWh). Tämä huomattavasti Metsäntutkimuslaitoksen arvioita pienempi määrä perustuu vain uudistushakkuukuusikoista saatavaan hakkuutähteeseen. Määrä on arvioitu yksityismetsien kunnittaisten kymmenvuotiskaudelle tehtyjen hakkuusuunnitteiden perusteella. Laskelma on laajennettu koskemaan myös muiden omistajien: valtion, yritysten ja yhteisöjen metsiä kunnittaisten pinta-alaosuuksien perusteella. Hakkuusuunnitteen perusteella kuusikoitten uudistushakkuualueille jäävien hakkuutähteiden kokonaismäärä on 10,7 milj. m<sup>3</sup> (Helynen & Nousiainen 1996, Helynen 1999).

Hakkuutähdettä on korjattavissa pääasiassa sellaisilta alueilta, joissa metsät ovat varttuneita ja kuusivaltaisia. Eniten hakkuutähdettä kertyykin Keski- ja Etelä-Suomesta.

Hakkuualalle jäävän hakkuutähteen määrään vaikuttavat puulaji, puumäärä, puuston järeys ja oksaisuus sekä lahon määrä. Kuusikoilla hakkuutähteen määrä on yli kaksinkertainen männiköihin ja koivikoihin verrattuna (kuva 4). Järeämmästä puustosta muodostuvassa hakkuutähteessä on enemmän oksamateriaalia kuin pienemmistä puista muodostuvassa. Mikäli puusto on lahoa, kasvaa hakkuutähteeksi jäävien hylky-pölkkyjen määrä merkittäväksi. Tyypilliselle kuusikon uudistushakkuualalle jää hakkuutähdettä Etelä-Suomessa noin 100 m<sup>3</sup>/ha, kun ainespuuta on korjattu 200–250 m<sup>3</sup>/ha.

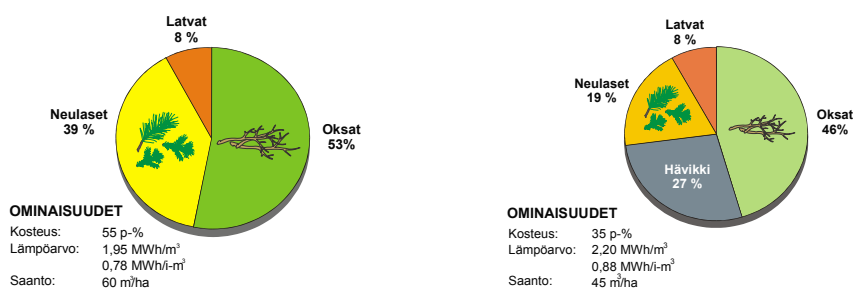


Kuva 4. Uudistuskypsan puuston biomassakertymät (latvusmassa/runkomassa, %) (Hakkila 1992).

### 3.2.2.2 Hakkuutähteen polttoaineominaisuudet

Jos hakkuutähteen annetaan kuivahtaa palstalla pari kesäkuukautta, kosteus laskee 50–60 %:sta jopa 20–30 %:iin. Hakkuutähteen kuivumisen myötä neulasen varisevat, ohuet oksat katkeilevat ja kuorikin irtoaa osittain. Hakkuutähteen puuainepitoisuus nousee ja kosteus vähenee, mutta toisaalta korjattavissa olevan hakkuutähteen määrä vähenee jopa 20–30 % pääasiassa neulasen karisemisen takia. Myös talteensaanto on pienempi kuin tuoreella hakkuutähteellä. Kuivahtaneen hakkuutähteen talteensaanto on 45 %.

Tuoreessa hakkuutähtehakkeessa on puuainetta keskimäärin 40 %, kuorta 23 % ja neulasia 37 % (kuva 5). Kuivahtaneesta hakkuutähteestä tehdyn hakkeen vastaavat luvut ovat: puuainetta yli 60 %, kuorta alle 30 % ja neulasia alle 10 % (Alakangas et al. 1999).

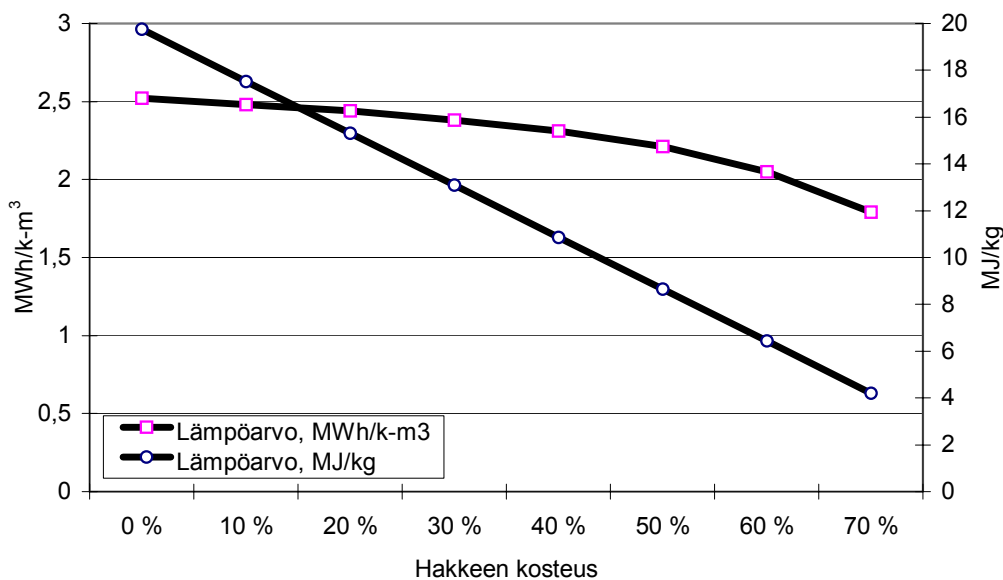


Kuva 5. Kuusihakkuutähteen koostumus tuoreena (vasen) ja kuivahtaneena (oikea) (Alakangas et al. 1999).

Talteen saatavan hakkuutähteen määrät vastaavat kuusikoissa yleensä 25–30 % hakkuualalta korjattavan runkopuun määrästä.

Hakkuutähdehakkeen tärkeimmät käyttötekniset laatuominaisuudet ovat irtokuutiometrin kuivamassa eli tiheys, kosteus, tehollinen lämpöarvo laitoksella ja palakokojakauma.

*Kosteus* vaikuttaa teholliseen lämpöarvoon, koska veden höyrystäminen vaatii energiaa. Laitoksen saama energiahyöty kasvaa hakekuution sisältämän kuivamassan kasvaessa ja kosteuden alentuessa (kuva 6).



Kuva 6. Hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/m<sup>3</sup> tai MJ/kg).

Lehdet tai neulaset ovat latvuksen pääkomponentti. Neulasten osuus on päähakkuumännnyissä 25,5 % ja kuusissa 37,6 % Etelä-Suomessa. Männyn neulasettoman oksamassan *tehollinen lämpöarvo* kuiva-aineessa on 20,09 ja kuusen 19,41 MJ/kg (ks. myös taulukot 12–14). Vastaavasti neulasten lämpöarvot ovat 21,04 ja 19,19 MJ/kg. Männyn neulasten lämpöarvo on siis muuta latvusmassaa korkeampi, kun taas kuusella ero neulasten ja oksien välillä on pieni. Tästä seuraa, että neulasten varisemisella tulisi männyllä olla suurempi vaikutus keskimääräiseen lämpöarvoon kuin kuusella. Mikkelissä tehdyissä kokeissa keskimääräiset kuiva-aineen teholliset lämpöarvot vaihtelivat välillä 19,8–20,1 MJ/kg (kalorimetrinen lämpöarvo 21,2–21,4 MJ/kg). Lieneekin niin, että vaikka tähteen nettolämpöarvo alenee neulasten varisemisen, lahoamisen ja uuteaineiden vapautumisen kautta, pysyy keskimääräinen

kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo samana hiilen ja vedyn suhteen pysyessä lähes samana varastoinnin aikana. Näin ollen vain kosteus jää jäljelle merkittävänä tehollista lämpöarvoa säätelevänä tekijänä. (Hakkila et al. 1995, Nurmi 1993, Nurmi 1999).

Hakeirtokuutiometrin kuiva-ainesisältö vaihtelee huomattavasti. Siihen vaikuttavat puun kuiva-tuoretiheys sekä hakkeen tiiviys. Keskimääräinen kuiva-tuoretiheys viheraineettomalla kuusihakkuutähteellä on  $465 \text{ kg/m}^3$  ja viheraineen sisältävällä  $425 \text{ kg/m}^3$  (Hakkila 1985).

Hakkeen tiiviyyteen vaikuttavat eniten hakkurin tekniset ominaisuudet: palakokojakauman tasaisuus, hakkurin puhallusvoima ja kuormaustapa. Myös hakkuutähteen kuivatusajalla ja kaukokuljetuksen aikana tapahtuvalla painumalla on merkitystä tiiviyslukuihin (ks. myös sivu 48). Tiiviyttä (kiintotilavuusosuutta) tarvitaan muutettaessa irtomitat kiintomitoiksi esimerkiksi haketus- ja kuljetusmaksuja määritettäessä. Tiiviyslukuna on yleisesti käytetty arvoa 0,40, joka on käyttökelpoinen keskiarvoluku. Taulukossa 19 on hakkuutähdehakkeen tiiviyslukuja (Uusvaara & Verkasalo 1987, Hakkila 2000).

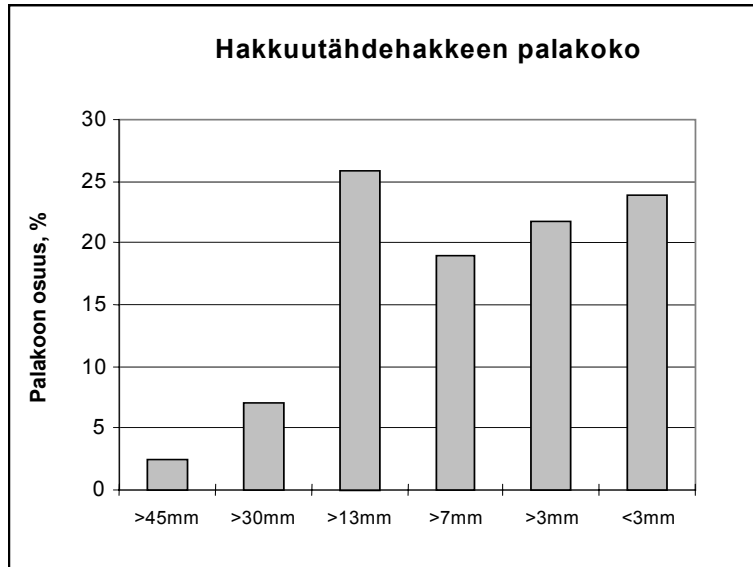
*Taulukko 19. Hakkuutähdehakkeen tiiviys ( $\text{m}^3/\text{i-m}^3$ ) eri vuodenaikoina (Verkasalo 1988).*

Hakkurityyppi ja kuormauserä	Vuodenaika	Tuore	Ylivuotinen
Rumpuhakkuri, puhallus kuormatilan takaa	Kesä	0,36	0,39
	Talvi	0,38	0,41
Murskain, purku hihnakuuljettimella	Kesä	0,39	0,39
	Talvi	0,39	0,39

Neulaset alentavat hakkeen tiiviyttä, minkä vuoksi ylivuotinen hakkuutähdehake on tiiviimpää kuin tuoreesta hakkuutähteestä hakettu. Osasyynä on myös ylivuotisen hakkuutähdehakkeen suurempi hienoainepitoisuus (Uusvaara & Verkasalo 1987, Hakkila 2000).

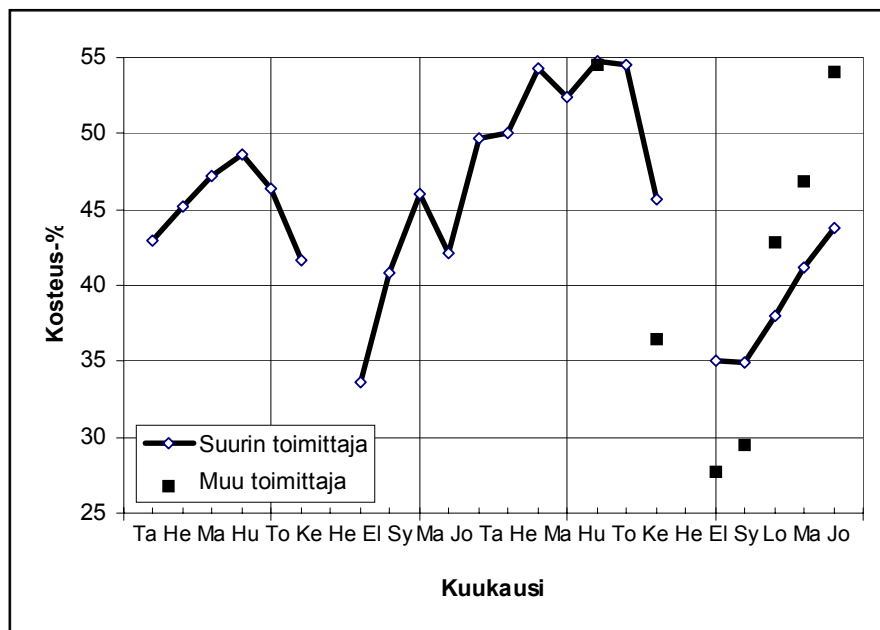
Hakkuutähdehake on *palakooltaan* ja kosteudeltaan epähomogeenista (kuva 7). Palakoko vaihtelee purumaisesta neulas- ja kuoriaineksesta puukapuloihin ja oksanpätkiin. Palakokoon vaikuttavat hakettava raaka-aine, hakkuri tai murskain, hakkurin terien kunto sekä käytettävän seulan reikäkoko. Mitä enemmän runkopuuta hakettava raaka-aine sisältää, sitä tasaisempi hakkeen palakokojakauma on. Murskaimilla tehtävä hake on palakooltaan karkeampaa kuin hakkureilla tehtävä hake (Alakangas et al. 1999).





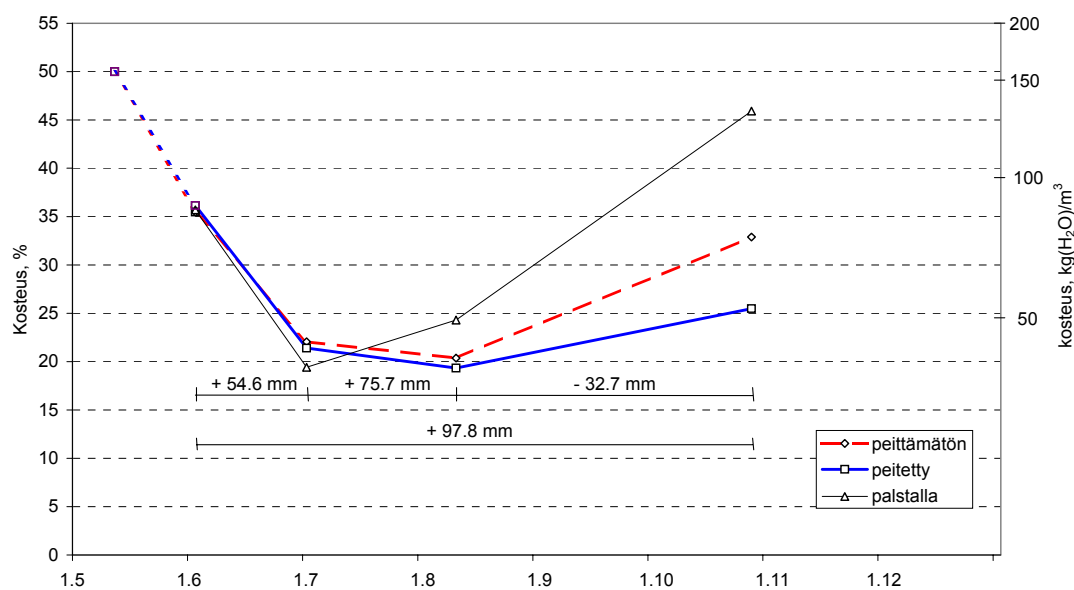
Kuva 7. Esimerkki hakkuutähdehakkeen palakoon jakaumasta (Alakangas et al. 1999).

Tuoreen hakkuutähteen *kosteus* on 50–60 painoprosenttia koko hakemäärän massasta. Hakkuutähteestä tuotettavan hakkeen kosteus on kuitenkin 25–65 %. Kosteuteen vaikuttaa mm. vuodenaika ja varastointi. Kesäaikana voidaan päästä alle 30 %:n kosteuksiin, kun hakkeen raaka-aine kuivuu palstalla, mutta vastaavasti talvella kosteudet saattavat nousta jopa 65 %:iin, kun hakkeen joukkoon joutuu lunta ja jäätä (kuvat 6 ja 8). Kosteus vaikuttaa merkittävästi hakkeen energiatiheuteen. Käytännössä hakkuutähdehakkeen energiatiheys on 0,6–1,0 MWh/i-m<sup>3</sup> (Alakangas et al. 1999).



Kuva 8. Metsähakkeiden toimituskosteuden vuodenaikainen vaihtelu Mikkelin Pursialan voimalaitoksella (Impola 1995).

Varastokasojen peittäminen ns. tervapaperilla on Ruotsissa varsin yleistä. Paperi suojaa kasaa kastumiselta, joten haketus voidaan tehdä huonojenkin sääolosuhteiden aikana. Paperi voidaan haketta hakkuutähdehakkeen joukkoon, joten se ei jää varastopaikalle. Ruotsalaisten tutkimusten mukaan peitetystä hakkuutähteestä tuotettu hake on talviaikaan noin 10 prosenttiyksikköä kuivempaa kuin peittämättömästä hakkuutähteestä tuotettu hake. Kuvassa 9 on esimerkki VTT Energian tutkimuksista hakkuutähteen kosteudesta palstalla, peitettyssä aumassa tai peittämättömässä aumassa. Kosteus on ilmoitettu sekä painoprosentteina että  $\text{kg (H}_2\text{O)/i-m}^3$ . Tulosten perusteella peitettyssä kasoissa hakkuutähteen kosteus oli 7–10 %-yksikköä alhaisempi kuin peittämättömissä. Hakkuutähteen kuivuminen oli VTT:n tutkimusten mukaan tehokkainta varastojakson alussa, jolloin hakkuutähteet kuivuivat 14–20 %-yksikköä ensimmäisten kahden kuukauden aikana. Tänä aikana haihdunta oli yli 100 mm suurempi kuin sademäärä. Lokakuussa kosteudet alkoivat kohota sateiden takia (Hillebrand & Nurmi 2000).



Kuva 9. Hakkuutähteen kosteus palstalla, peittämättömässä ja peitettyssä aumassa (janalla on merkitty haihdunta–sade, mm) (Hillebrand & Nurmi 2000).

Eri lämpö- tai voimalalaitosten vastaanotto-, kuljetin- ja polttolaitteet poikkeavat toisistaan. Tämän takia käyttöpaikka asettaa hakkeelle tietyt laatuvaatimukset, joista tärkeimmät ovat kosteus ja palakokojakauma. Mikäli hakkeessa on pitkiä tikkuja, saattavat ne aiheuttaa käsittelylaitteissa holvaantumista ja tukkeutumista. Tasalaatuisen, suhteellisen hienojakoisen hakkuutähdehakkeen käsittelyominaisuudet eivät eroa merkittävästi sahauksen sivutuotteiden, purun ja kuoren, ominaisuuksista.

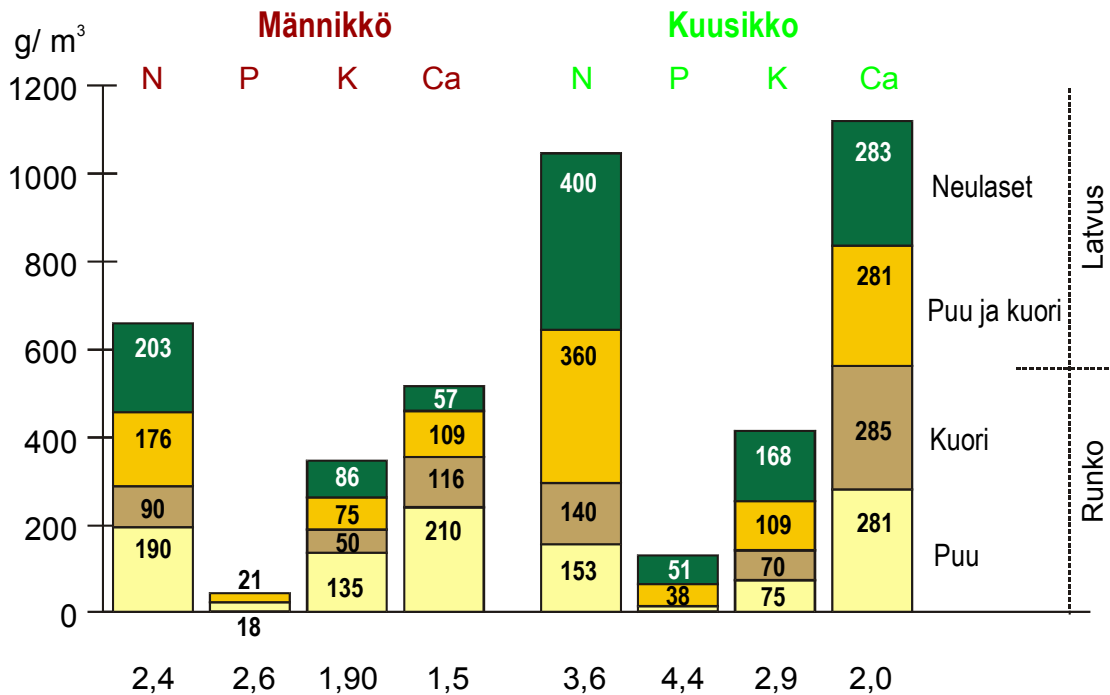
Kostea hakkuutähdehake soveltuu hyvin läpi vuoden suurten monipolttoainelaitosten käyttöön, mikäli laitos on suunniteltu märälle puupolttoaineelle. Esimerkiksi polttoturpeelle mitoitetuissa kaukolämpölaitoksissa hakkuutähdehake ei yksistään sovellu talvikäyttöön, koska hakkeella ei saavuteta kattilassa riittäviä tehoja. Lisäksi talvella märkä hakkuutähde voi jäätymään tai holvaantua siiloissa ja kuljettimilla. Kosteus vaikeuttaa myös sekoittumista. Esim. lämmin turve ja kylmä, kostea hake sekoittuvat vaikeasti. Pienemmillä laitoksilla kostean hakkuutähteen käyttö onnistuu yleensä vain kesäaikana, jolloin laitosta käytetään vain osateholla eikä käsittelyketjussa ole jäätymisvaaraa (Impola 1995).

Ravinnepitoisuus alentaa hakkuutähdehakkeen tuhkan sulamislämpötilaa verrattuna kuoren ja turpeen tuhkaan. Ravinnepitoisuus on suurimmillaan neulasissa ja lehdissä. Neulasmassan osuus hakkuutähteistä on hyvin merkittävä. Uudistuskypsässä kuusikossa elävän latvuksen kuivamassasta neulasten osuus on noin 35 % ja hakkuutähteen kuivamassasta 30 %. Männyllä vastaavat luvut ovat 23 % ja 20 %. Variseminen edellyttää neulasten kuivumista. Pääosa varisemisesta tapahtuu kesällä (Nurmi 1999).

Tuhkan sulamiskäyttäytymisellä on merkitystä erityisesti sellaisissa polttotekniikoissa, joissa tuhkan sulaminen voi estää esim. palamisilman kulkeutumista. Myös tuhkan pehmenemisestä aiheutuvan kattilan likaantumisen estämiseksi on hyödyllistä tuntee *tuhkan sulamiskäyttäytyminen*. Sulamiskäyttäytymiseen vaikuttavat tuhkan koostumus, polttolaitteet ja poltto-olot. Vaikka metsätähdehakkeen pehmenemislämpötila (noin 1 175 °C) on korkea, voi puupolttoaineilla sintrautuminen eli tuhkahiukkasten yhteentarttuminen alkaa jo huomattavasti alhaisemmissa lämpötiloissa.

Kuusen rungon ja oksien puuaineen *tuhkapitoisuus* on 0,30–0,63 % kuivamassasta. Kuorta sisältävän oksamassan tuhkapitoisuus on 1,9 % ja kuoren 3,0 %. Neulasten tuhkapitoisuus on tätäkin korkeampi (4,2–5,1 %). Kuusen hakkuutähteen tuhkapitoisuus on 2–2,5 %. Välivarastoinnin pidentyessä niin neulasten kuin hakkuutähteenkin tuhkapitoisuus lisääntyi ja oli 4,5–5 % pisimpään varastoiduissa kasoissa. Lisäksi katetuissa kasoissa tuhkaa on vähemmän kuin kattamattomissa. (Nurmi 1999).

Ravinneaineisiin sisältyy myös *kloori* (Cl), joka voi aiheuttaa kuumakorroosiota höyrykattiloiden tulistimissa, kun höyryn lämpötila ylittää 480 °C. Pienempitehoisissa kattiloissa tätä ongelmaa ei esiinny, koska lämpötilat jäävät alle 480 °C. Polton kannalta olisi eduksi, jos metsähakkeen neulas- tai lehtiaines irtoaa tai hake on kuivaa, jolloin kloori- ja kaliumpitoisuudet laskevat murto-osaan paljon viherainetta sisältävään hakkeeseen verrattuna (Antikainen 1998).



Kuva 10. Päätehakkuvaiheen männikön ja kuusikon biomassaositteitten sisältämät ravinteet ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) laskettuina rungon kuorellista kuutiometriä kohti (Mälkönen 1977).

Viherainetta sisältävä märkä hake voi lisätä likaantumista suurempien *alkalipitoisuuksien* takia, joista polton kannalta hankalia ovat mm. kalium (K) ja natrium (Na). Kuorelliseen runkopuuhun verrattuna esimerkiksi kuusen neulasten typpi-, kalium-, fosfori- ja kalsiumpitoisuudet ovat moninkertaisia kuivamassayksikköä kohden (kuva 10). Kuusen neulasten natriumpitoisuus on 0,020–0,040 % ja kloorin <0,4 %. Männyn neulasten natriumpitoisuus on hyvin pieni ja klooripitoisuus <0,2 %. Kloorin kulkeutuminen tulistinputken pinnalle pyritään estämään. Kulkeutumisessa alkalit toimivat välittäjinä. Tällöin seospoltossa on suotavaa käyttää rikki- ja klooripitoista polttoainetta, esimerkiksi turvetta tai kivihiiltä, jolloin alkalit sulfatoituvat ja kloori vapautuu kloorivedyksi ja kulkee savukaasun mukana pois systeemistä aiheuttamatta. Turpeen ja hakkuutähteiden seospoltto on myös tehokas keino, jolla metsähakkeen aiheuttamaa kattilan likaantumista eli kuonaantumista ja kuumakorroosion riskiä voi vähentää. Kattilan konvektio-osan korroosiosuojauksessa pääkeinot ovat korkeaseosteiset tulistinmateriaalit ja kloorin kulkeutumisen estäminen tulipesästä tulistinputken pinnalle. Tähän voidaan vaikuttaa myös tulistimien sijoittelulla. (Mälkönen 1974, 1977, Raiko et al. 1995, Antikainen 1998, Hakkila et al. 1998).

Voimalaitoksien kattiloissa voidaan metsähaketta polttaa seuraavin edellytyksin (Antikainen 1998):

- Metsähake sekoitetaan muuhun polttoaineeseen, esim. turpeeseen tai kivihiiileen.
- Vältetään polttamasta tuoreista oksista tehtyä paljon viherainetta sisältävää haketta suuria määriä yksinään ja, jos hake on pääpolttoaine, lisätään metsätähdehakkeen joukkoon turvetta 15–20 %.

### 3.2.3 Kokopuu- ja rankahake

*Kokopuuhaketta* käytetään pienemmissä lämpökeskuksissa ja koti- ja maatalouden lämpökattiloissa. Hake valmistetaan karsimattomista rangoista, jotka ovat joko hukkarunkopuuta tai teollisuudelle kelpaamatonta pienpuuta (mm. vajaatuottoiset metsät, taimikot, ensiharvennukset). *Rankahake* valmistetaan karsitusta runkopuusta, yleensä runkohukkapuusta. Runkohukkapuu sisältää yleensä korjuussa ja metsänhoitotöiden yhteydessä metsään käyttämättä jäävän runkopuun kuorineen. Kokopuuhaketta käytetään tällä hetkellä eniten kiinteistöjen lämmitykseen sekä pienemmissä kaukolämpökeskuksissa, joissa polttoaineen laatuvaatimukset ovat tiukemmat kuin suuremmissa laitoksissa. Kiinteistöjen polttoaineilla hakkeen kosteuden on oltava alhaisempi (max. 40 %) ja palakoon tasaisemman. Myös polttotekniikka asettaa rajoituksia palakoolle, esim. pienet kaasutuslaitokset. Kokopuuhaketta tuotetaan pääsääntöisesti manuaalisin menetelmin, jossa metsuri katkoo ja kasaa pienpuut ns. siirtelykaatomenetelmällä.



*Kuva 11. Kokopuuhakkeen korjuu siirtelykaatomenetelmällä ja kokopuuhakkeen varastokasa. Lähde: Työtehoseura ja Oulun yliopisto.*

Tuottavuuden ja työn ergonomian parantamiseksi apuna käytetään kaatokahvaa (kuva 11), johon moottorisaha kiinnitetään. Katkotut pienpuut kasataan ajouran tuntumaan ja varastoidaan rankakasoissa, joista ne haketaan ja kuljetaan käyttäjälle.

Metsäntutkimuslaitos on arvioinut vuotuiseksi kokopuuhakkeen potentiaaliksi noin 9,5–13,5 TWh. Energiapotentiaaliin vaikuttaa ensiharvennusleimikoitten kuitupuun vähimmäisläpimitta, joka laskelmissa on vaihtoehtoisesti joko 5 cm tai 7 cm (Hakkila & Fredriksson 1996, Hakkila 1985, 1978).

Taulukoihin 20–23 on koottu keskeisiä ominaisuuksia pienpuun alkuaineista, lämpöarvosta sekä tuhkapitoisuuksista ja tuhkan koostumuksesta.

Taulukko 20. Pieniläpimitaisten puiden eri osien alkuainepitoisuuksia (Nurmi 1993).

PUULAJI/ALKUAINE	PUU			SISÄKUORI		ULKO-KUORI		KUORI	LEHDET
	Runko	Oksat		Runko	Oksat	Runko	Oksat	Oksat	
		> 5mm	< 5mm						
HIILIPITOISUUS, k.a. p-%									
Mänty	52,34	53,53	50,83	40,83	52,33	55,75	56,35	54,99	52,20
Kuusi	52,43	53,36	50,37	49,70	50,20	55,56	56,10	54,02	51,30
Hieskoivu	50,97	50,97	48,39	52,20	52,49	72,64	68,37	57,82	49,12
Rauduskoivu	47,43	48,67	48,05	48,00	48,60	66,71	64,34	50,24	48,68
Harmaaleppä	49,09	48,21	49,17	49,67	48,34	64,09	60,58	51,53	49,75
Tervaleppä	46,64	47,90	48,45	50,29	50,09	58,52	62,06	53,97	50,95
Haapa	46,21	46,84	50,23	48,95	47,81	52,71	52,94	48,05	48,23
VETYPITOISUUS, k.a., p-%									
Mänty	6,09	6,03	5,23	6,17	6,36	5,68	6,12	6,70	6,82
Kuusi	5,86	5,61	5,14	5,59	5,62	5,85	5,77	5,95	6,28
Hieskoivu	5,86	5,80	5,15	5,79	6,10	9,37	8,43	6,55	6,13
Rauduskoivu	5,22	5,25	5,18	5,10	5,01	9,41	8,40	5,33	6,08
Harmaaleppä	5,77	5,16	5,71	6,15	5,94	8,59	7,66	6,48	6,22
Tervaleppä	5,01	5,84	5,89	5,77	5,57	6,37	7,56	6,23	5,90
Haapa	4,98	5,09	5,98	5,74	5,73	6,42	6,18	5,77	5,95
TYPPIPITOISUUS, k.a., p-%									
Mänty	0,08	0,10	0,19	0,48	0,55	0,15	0,38	0,68	0,88
Kuusi	0,01	0,03	0,14	0,47	0,52	0,33	0,43	0,74	0,79
Hieskoivu	0,12	0,18	0,28	0,63	0,86	0,28	0,47	12,0	1,73
Rauduskoivu	0,07	0,18	0,28	0,33	0,65	0,79	0,59	0,74	1,59
Harmaaleppä	0,44	0,59	0,83	1,49	1,74	1,28	1,23	1,72	2,79
Tervaleppä	0,20	0,46	0,62	1,06	1,26	1,15	1,06	1,33	2,22
Haapa	0,15	0,29	0,61	0,84	1,30	0,59	0,88	1,00	2,50

k.a.=kuiva-aineesta

Taulukko 21. Rangan ja kokopuun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo eri puulajeille (Nurmi 1993).

Puulaji	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	
	Ranka	Kokopuu
Mänty	19,33	19,53
Kuusi	19,02	19,29
Hieskoivu	19,19	19,30
Rauduskoivu	19,15	19,21
Harmaaleppä	19,00	19,18
Tervaleppä	19,31	19,31
Haapa	18,65	18,65

*Taulukko 22. Puhtaan tuhkan määrä vastakaadetusta pienpuusta tehdyssä polttihakkeessa (Hakkila & Kalaja 1983).*

Hakkeen raaka-aine	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa , p-%				
	Koivu	Leppä	Haapa	Mänty	Kuusi
Karsittu ranka	0,68	0,92	0,92	0,74	1,04
Kokopuu lehdittä	0,79	1,08	1,09	0,8	1,25
Kokopuu lehtineen	0,98	1,25	1,3	0,86	1,56

*Taulukko 23. Tuhkapitoisuus pienpuiden eri osien kuiva-aineessa (Voipio & Laakso 1992).*

Puulaji	Runko 20 %			Runko 80 %			Oksat >5mm			Oksat <5mm		Lehdet
	Puu	Sisä-kuori	Ulko-kuori	Puu	Sisä-kuori	Ulko-kuori	Puu	Sisä-kuori	Ulko-kuori	Puu	Ulko-kuori	
Mänty	0,3	1,2	1,0	0,3	1,8	1,2	0,4	1,9	1,5	0,7	1,8	2,2
Kuusi	0,3	3,5	3,3	0,5	3,0	2,6	0,5	5,1	3,9	1,0	2,9	4,2
Rauduskoivu	0,3	2,7	0,7	0,4	2,3	0,6	0,7	4,6	2,0	1,1	3,4	4,9
Hieskoivu	0,3	2,0	0,5	0,4	1,8	0,5	0,5	3,2	0,9	0,7	2,4	4,2
Harmaaleppä	0,4	3,2	2,4	0,6	3,2	1,7	0,7	2,9	2,0	1,0	2,2	5,4
Tervaleppä	0,3	2,5	1,4	0,4	2,1	1,5	0,5	2,0	1,5	0,7	2,1	4,8
Haapa	0,4	5,0	11,1	0,5	4,9	10,2	0,7	5,5	6,8	2,0	5,2	8,7

Kokopuuhakkeen ominaisuuksia eniten tutkittu viime vuosina ensiharvennusmänniköillä (taulukot 24–26). Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköiden kuiva tuoretiheys oli kuorettomalle runkopuulle keskimäärin  $395 \text{ kg/m}^3$  ja kuorelliselle runkopuulle  $376 \text{ kg/m}^3$ . Kuoren kuiva tuoretiheys on  $266 \text{ kg/m}^3$ . Kaatotuoreen ensiharvennusmännyn keskimääräinen kosteus oli kesäaikana kuorellisella runkopuulla 58,3 % ja latvusmassalla 52,4 %. Tämä vaikuttaa voimakkaasti ensiharvennusmännyn lämpöarvoon. Lämpöarvo on tuoreella kuorellisella männyllä  $1,64 \text{ MWh/m}^3$ , kuorettomalla puulla  $1,71 \text{ MWh/m}^3$  ja kuorella  $1,18 \text{ MWh/m}^3$  (Hakkila et al. 1995).



*Taulukko 24. Ensiharvennuskannan tehollinen lämpöarvo ja tuhkapitoisuus kiinto-kuutiometriä kohti laskettuna (Hakkila et al. 1995, Nurmi 1993.)*

Biomassa-komponentti	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineesta MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo 40% kosteudessa, MWh/m <sup>3</sup>	Tehollinen lämpöarvo 50% kosteudessa, MWh/m <sup>3</sup>	Tuhka, % kuiva-aineesta	Tuhka, kg/m <sup>3</sup> biomassaa
RUNKO					
Kuoreton puu	19,31	1,95	1,86	0,40	1,6
Kuori	19,53	1,32	1,26	2,55	6,8
Kuorellinen puu	19,33	1,86	1,78	0,62	2,3
OKSAT					
Kuorellinen puu	20,23	1,97	1,89	1,03	3,9
Neulaset	21,0	2,01	1,92	2,35	8,8
Elävä latvus	20,49	1,99	1,90	1,48	5,6
Koko latvus	20,38	2,02	1,93	1,25	4,9
KOKO PUU	19,56	1,89	1,81	0,76	2,9

*Taulukko 25. Etelä-Suomen ensiharvennuskannan biomassakomponenttien keskimääräiset massaosuudet ja kuiva-tuoretiheydet (Hakkila et al. 1995).*

Biomassakomponentti	Massaosuus, %	Kuiva-tuoretiheys, kg/m <sup>3</sup>
RUNKO		
Puu	89,5	395
Kuori	10,5	266
Puu + kuori	100	376
ELÄVÄT OKSAT		
Puu	9,2	424
Kuori	5,4	311
Puu + kuori	14,6	382
Neulaset	7,5	373
Elävä latvus	22,1	379
Kuolleet oksat	5,9	424
Koko latvus	28,0	388
Koko puu	128,0	379

Taulukko 26. Eteläsuomalaisen ensiharvennumännyn runkopuun keskimääräiset ominaisuudet pystypuustossa (Hakkila et al. 1995.)

Ominaisuus	Koko runko	Runko		Latvan hukkapuu, cm		
		>6 cm	>8 cm	6–8	4–6	1–4
KUOREN MÄÄRÄ						
Paksuus	4,5	4,6	5,0	2,4	2,3	1,8
Tilavuusosuus, %	15,4	15,2	15,6	13,5	17,4	25,5
Kuivamassaosuus, %	10,1	9,8	9,8	10,5	13,9	21,4
KUIVA-TUORETIHEYS, kg/m <sup>3</sup>						
Kuoreton puu	395	397	399	377	371	365
Kuorellinen puu	376	377	379	361	352	340
Kuori	267	266	265	275	274	278
KUORELLISEN PUUN VESI						
Kosteus, %	59	58	58	61	62	63
Kosteussuhde, %	141	140	138	158	164	170
KOOSTUMUS, kg/m <sup>3</sup>						
Uutteeton puuaines	327	329	331	312	293	258
Puuaineen asetoniuute	11	11	11	11	10	9
Kuori	38	37	37	38	49	73
Vesi	530	528	523	570	577	578
Yhteensä = tuoretiheys	906	905	902	931	929	918
ENERGIATIHEYS, MWh/m <sup>3</sup> , tuoreena						
Kuorellinen puu	1,85	1,85	1,86	1,78	1,73	1,67
Kuoreton puu	1,94	1,95	1,96	1,85	1,82	1,79
Kuori	1,18	1,17	1,17	1,21	1,21	1,23
KUORELLISEN PUUN TUHKA, kg/m <sup>3</sup>	2,3	2,3	2,3	2,3	2,5	2,9

Kuten hakkuutähteellä myös kokopuuhakkeen tiiviyslukuihin vaikuttavat hakkuri, vuodenaika sekä puulaji (taulukko 27). Taulukossa 28 on hakkeen liukumiskulma ja kitkakerroin.

Taulukko 27. Kokopuuhakkeen tiiviyslukuja (Uusvaara & Verkasalo 1987).

Hakelaji	Laikkahakkuri, takaa puhaltava	Laikkahakkuri, päältä puhaltava	Laikkahakkuri, kippaava	Rumpuhakkuri, päältä puhaltava	Rumpuhakkuri, kippaava
	Kesä Talvi	Kesä Talvi	Kesä Talvi	Kesä Talvi	Kesä Talvi
Mäntykokopuuhake	0,47 0,50	0,48 0,49	0,45 0,48	0,46 0,49	0,41 0,44
Mäntyrankahake		0,49 0,50	0,42 0,42		
Koivukokopuuhake	0,44 0,46	0,45 0,50	0,38 0,43	0,43 0,44	0,40 0,42
Koivurankahake	0,44 0,44	0,43 0,46	0,46 0,46	0,43 0,44	
Kuusikokopuuhake	0,44 0,44	0,44 0,44	0,39 0,39		
Leppäkokopuuhake		0,54 0,54	0,48 0,48		0,52 0,53
Leppärankahake		0,56 0,56			

Taulukko 28. Hakkeen liukumiskulma ja kitkakerroin eri alustoilla (hakkeen palakoko 5–55 mm ja kosteus 9,2 %) (Rautalin et al. 1986).

Alusta	Liukumiskulma		Kitkakerroin	
	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta
Teräslevy, Fe 37, kirkas	24,4	1,28	0,48	0,02
Maalattu levy, "Miranol"	23,5	2,17	0,43	0,04
Vesivaneri	21,9	1,72	0,40	0,03
Maalattu levy, "Inerta 51 HB"	23,5	1,13	0,43	0,02
Maalattu levy, "Inerta 160"	27,0	1,90	0,51	0,03
Lasilevy	29,4	3,06	0,56	0,05
Akryylilevy	28,4	1,77	0,54	0,03

### 3.3 Kuori ja kannot

Puun kuori muodostuu ulkokuoresta ja sisäkuoresta eli nilasta. Kuoren ja puun välissä sijaitseva jälsi tuottaa sisäpuolelleen puuainetta ja ulkopuolelleen nilaa, jota pitkin puu kuljettaa yhteyttämistuotteita latvuksesta runkoon ja juuristoon. Kaarna ja tuohi ovat ulkokuorta. Kuoren osuus runkopuusta on 10–20 %, mutta pienissä oksissa sen osuus voi olla jopa 60 %. Kuoren osuus lasketaan kuorellisen puun kokonaistilavuudesta tai kokonaismassasta. Se voidaan määrittää esim. mittasaksilla, ksylometrillä tai kuoren läpi painettavalla mittarilla. Runkopuun määrästä laskettu kuoren määrä oli vuonna 1998 noin 8,8 miljoonaa m<sup>3</sup>. Metsään jäävän kuoren määräksi on arvioitu noin 1 miljoonaa m<sup>3</sup> (Hakkila et al. 1995, Leino 1975, Impola et al. 2000).

Koska kuoressa on huomattavia määriä ligniiniä, sen lämpöarvo on korkea. Lämpöarvo on lähes sama rungon eri korkeuksilla. Sen sijaan eri puulajien kuorten lämpöarvot vaihtelevat huomattavasti siten, että lehtipuilla lämpöarvot ovat pääsääntöisesti selvästi korkeampia kuin havupuilla. Poikkeuksena on haapa, jonka kuoren lämpöarvo on jopa alhaisempi kuin männyllä ja samaa luokkaa kuin kuusella. Ulkokuoren lämpöarvot ovat lehtipuilla selvästi sisäkuoren lämpöarvoja korkeampia: sisäkuoren lämpöarvot ovat keskimäärin 19–20 MJ/kg ja ulkokuoren 20–32 MJ/kg. Kuoren tehollinen lämpöarvo on suurempi rungon kuoressa kuin oksien kuoressa. Lämpöarvo vaihtelee myös puulajeittain ja puun koon mukaan. Vaihtelu on suurempi pienpuussa kuin rungossa. Ensiharvennuskannan kuoren kuiva-aineen lämpöarvo on tuoreena 1,2 MWh/m<sup>3</sup> ja 40 %:n kosteudessa tuoreena 1,3 MWh/m<sup>3</sup> alhaisen kuiva-tuoretiheyden vuoksi (taulukko 24). Myös kasvupaikalla on vaikutusta kuoren lämpöarvoon (Nurmi 1993 ja 2000, taulukko 12, Hakkila et al. 1995).

Käytännössä korkeat kosteus- ja tuhkapitoisuudet heikentävät huomattavasti kuoren polttoaineominaisuuksia. Sen vuoksi kuoren polttamisessa onkin usein kysymys pikemminkin kuorijätteen hävittämisestä kuin energian tuotannosta. Puun kuorta käytetään yleensä metsäteollisuuslaitosten ja lämpökeskusten kattiloiden polttoaineena. Puunjalostusteollisuuden sivutuotteena syntyvästä kuoresta suurin osa on havupuiden kuorta (n. 6,5 miljoonaa m<sup>3</sup>). Kuoren käsittelyn kannalta ongelmallista on kuoren epähomogeenisuus ja lisäksi polttoaineseoksissa kuori aiheuttaa ongelmia käsittely- ja syöttölaitteissa.

Kuoren polttoaineominaisuuksia voidaan parantaa mm. puristamalla, kuivaamalla tai sekoittamalla sitä muiden polttoaineiden joukkoon. Kuori voidaan kuivata lämmön avulla tai mekaanisesti kuoripuristimella. Havupuun kuoren puristus ei aina onnistu riittävän hyvin ja kuoren kuiva-ainepitoisuus jää usein alle 40 %. Kuoren seulonnassa kannattaa suuret kappaleet erottaa tarkemmin alitteesta ja pienet ylitteestä, vältetään suurten kappaleiden aiheuttamat ongelmat puristuksessa. Saavutettava kuiva-ainepitoisuustaso riippuu suuresti sekä kuoren lämpötilasta että partikkelikoosta. Lämpökuivaus on harvinaisempi ja vaatii suuria laitoksia. Lämpökuivaukseen käytetään halpaa jätelämpöä tai savukaasuja. Taulukoissa 29–34 sekä kohdan 3.2 taulukoissa on tietoja kuoren ominaisuuksista (Juvonen & Johanson 1986, Öhman 1980, Impola et al. 2000).

Kuoripolttoaineen laatua voidaan huomattavasti parantaa sekoittamalla kuoren joukkoon esimerkiksi kutterinlastua, jolloin molempien polttoaineiden arvo ja käyttökelpoisuus paranevat. Näin voidaan jopa välttyä kuoren kuivaukselta (Juvonen & Johanson 1986).

Kantoja joutuu turpeen joukkoon tai niitä joudutaan poistamaan esim. rakennustyömailta. Kannot ovat sitkeitä hakettaa, ja ne yleensä murskataan. Kantohakkeen kosteus on yleensä noin 35 %:n luokkaa, ja tuhkapitoisuus voi olla suurempi, jos mukaan on joutunut maa-aineista (3,8–13 %). VTT:llä tehdyissä mittauksissa kantohakkeen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa oli keskimäärin 19,3 MJ/kg, kuiva-aineen massa 182 kg/i-m<sup>3</sup>, kosteus keskimäärin 34 % ja tuhkapitoisuus 0,2 %. Korkein tehollinen lämpöarvo on mäntykannoilla (22,36 MJ/kg, taulukko 12), koska kannoissa orgaanisen aineksen uuteaineiden määrä on suuri (18–20 %). Kantohakkeen palakoko on esitetty taulukossa 29 yhdessä kuoren kanssa (Laine & Sahrman 1985, Pulkkinen 1996).

Kantomurskeelle on tyypillistä paksut palat; yli 8 mm läpimittaisia kappeleita (eli 40 mm ja 8 mm seuloihin jääneitä) oli suurimmalla seulalla tehdyssä murskeessa 34,3 % ja ilman seulaa tehdyssä 44,1 % (Pulkkinen 1996).

*Taulukko 29. Kantojen ja kuoren eri osien tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg (Nurmi 1997).*

Puulaji	Juuren puuaines	Juuren kuori	Koko juuri	Kanto	Kanto ja juuri
Mänty	19,32	20,43	19,51	22,36	21,02
Kuusi	19,33	19,55	19,38	19,18	19,32
Hieskoivu	18,60	19,65	18,84	18,61	
Rauduskoivu	18,50	20,18	18,97	18,50	
Harmaaleppä	18,83	20,38	19,28	19,27	
Tervaleppä	18,93	19,66	19,17	18,91	
Haapa	18,30	19,73	18,78	18,32	

*Taulukko 30. Tyypillisiä kuoren alkuaineanalyysyjä (% kuiva-aineesta) (Leino 1975).*

Kuori	Hiili C, %	Vety H, %	Rikki S, %	Happi O + Typpi, N%	Tuhkapitoisuus, %
Mänty	54,4	5,9	-	38,0	1,7
Kuusi	50,6	5,9	-	40,7	2,8
Koivu	56,6	5,9	-	35,0	1,6

*Taulukko 31. Kuoren tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Leino 1975).*

Kuori	Yhteensulautuminen alkaa, °C	Pehmenemispiste, °C	Puolipallopiste, °C	Juoksevuuspiste, °C
Mänty	1 010	1 240	1 385	1 400
Kuusi	1 020	1 250	1 400	1 420
Koivu	935	1 180	1 440	1 460

*Taulukko 32. Eri puulajien kuoren tuhkapitoisuus sekä tuhkan alkuainekoostumus, p-% (Raiko et al. 1995, Alakangas et al. 1987).*

Puulaji	Tuhka, %	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Muu*
Mänty	1,8	14,5	3,8	2,7	40,0	5,1	2,1	3,4	3,7	22,9
Kuusi	3,4	21,7	1,8	2,7	50,5	4,2	2,8	3,5	1,6	7,8
Koivu	1,6	3,0	1,0	3,0	60,3	5,9	0,7	4,1	4,8	15,6
Tammi	1,5	11,1	3,3		64,5	1,2	8,9	0,2		9,3

\* laskettu erotuksena.

*Taulukko 33. Eräiden puulajien kuoren kuiva-tuoretiheys (Kärkkäinen 1985).*

Puulaji	Kuivatuoretiheys, kg/m <sup>3</sup>	Puulaji	Kuivatuoretiheys, kg/m <sup>3</sup>
Mänty, tavallinen kuori	300	Euroopanlehtikuusi, kaarna	285
Mänty, kaarna	310	Siperianlehtikuusi, kaarna	325
Kuusi, tavallinen kuori	365	Pähkinäpuu	280
Kuusi, kaarna	410	Douglaskuusi	310
Rauduskoivu, tukkipuu	560	Poppeli	410
Hieskoivu, tukkipuu	530	Tammi	425
Hieskoivu, pieni kuitupuu	500	Saarni	455
Hieskoivu, oksat	505	Saksanpihta	460
Harmaaleppä, pieni kuitupuu	390	Vaahtera	530
Harmaaleppä, oksat	425	Pyökki	580
Hieskoivu, 1-vuotinen vesa	535		
Paju, 1-vuotinen vesa	490		
Raita	408		
Halava	358		
Tunturikoivu	560		
Vaivaiskoivu	545		

*Taulukko 34. Kuoren ja kantohakkeen keskimääräiset palakokojakaumat (Laine & Sahrman 1985).*

Seulan silmäkoko, mm	100	78	45	40	25	20	10	6	4	Pohjalaatikko
KUORIMURSKE										
Seulalle jäänyt massaosuus, %		1,7		13,0		24,5	23,3	2,9	0,8	33,8
Keskihajonta, %		2,0		10,6		6,0	4,4	4,6	1,3	19,9
KANTOHAKE										
Seulalle jäänyt massaosuus, %	1,6	2,8	10,2		20,9		35,1	8,5		20,9
Keskihajonta, %	1,9	2,4	1,0		1,4		2,2	1,0		4,8

### 3.4 Sahanpuru ja kutterinlastu

Polttoaineena käytettävää sahanpurua saadaan puutavaran sahauksen sivutuotteena. Kutterinlastu on puolestaan konehöyläyksessä syntyvää puujätettä. Sahanpuru on yleensä märkää ja ilmavaa tavaraa. Sen kosteus voi kuitenkin vaihdella huomattavasti (ilmakuivasta 70 %:iin). Sahanpurua poltetaan metsäteollisuuslaitosten ja lämpökeskusten kattiloissa muiden polttoaineiden ohessa. Kutterinlastu puolestaan on yleensä niin kuivaa ja kevyttä, että sitä ei voida polttaa sellaisenaan vaan se sekoitetaan muihin raskaampiin ja märempiin polttoaineisiin. Sahanpurun tavoin kutterinlastua käyttävät metsäteollisuuslaitokset ja lämpökeskukset. Sahanpurusta ja kutterinlastusta voidaan valmistaa myös puristeita; pellettejä ja brikettejä.

Sahanpurun ja kutterinlastun keskimääräisiä ominaisuuksia on esitetty alla olevissa taulukoissa 35–37.

*Taulukko 35. Sahanpurun ja kutterinlastun keskimääräisiä ominaisuuksia (Hakkila et al. 1978, Laine & Sahrman 1985).*

Ominaisuus	Sahanpuru	Kutterinlastu
Tyypillinen kosteus, %	50–55	5–15
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,9–19,2	18,9
Kuiva-tuoretiheys (kg/m <sup>3</sup> )	380–480	380–480
Kostean polttoaineen tiheys, kg/i-m <sup>3</sup>	250–300	80–120
Energia tiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,4–0,7	0,5
Tuhkapitoisuus	0,4–1,1	0,4

*Taulukko 36. Sahanpurun palakokojakauma (Laine & Sahrman 1985).*

Seulan silmäkoko, mm	40	15	10	8	4	2	1	0,5	0,25	Pohjalaatikko
Seulaan jäänyt massaosuus, %	2,0	3,2	5,9	3,7	13,8	19,2	30,3	14,4	4,9	2,6

Taulukko 37. Sahanpurun (4,0 mm:n seulontafraktio, kosteus 10 %) liukumiskulma ja kitkakerroin (Rautalin et al. 1986).

Alusta	Liukumiskulma		Kitkakerroin	
	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta
Teräslevy, Fe 37, kirkas	37,1	0,90	0,77	0,02
Maalattu levy, "Miranol"	30,25	1,64	0,58	0,03
Vesivaneri	33,02	0,68	0,65	0,01
Maalattu levy, "Inerta 51 HB"	32,71	0,50	0,64	0,01
Maalattu levy, "Inerta 160"	27,71	1,42	0,53	0,02
Lasilevy	32,37	0,79	0,63	0,01
Akryylilevy	28,17	3,33	0,54	0,06

### 3.5 Halot ja pilkkeet

*Halot* ovat noin 1 m:n pituisia, polttokäyttöön tarkoitettuja halkaistuja tai pyöreitä karsittuja pölkkyjä. Halkoja tehdään joko yksinomaan koivusta tai sekahalkoja myös muista puulajeista. Halkoja poltetaan ylä- ja alapaloisissa kattiloissa sekä tulisijoissa. (Immonen & Seppälä 1984).

*Pilkkeet* (pienhalot, nalikat, "klapit") ovat 0,25–0,50 m pitkiä katkaistuja ja halkaistuja puun paloja. Pilkkeiden käyttö polttoaineena vaatii käsityötä, koska niille ei voida järjestää automaattista syöttöä. Jonkin verran niiden käyttöä helpottaa, jos tulisijassa tai kattilassa on varastosiilo, johon voi täyttää esimerkiksi vuorokauden polttoainetarpeen. Pilkkeet ovat lähinnä pienten lämmönkuluttajien ja virkistyskäytön polttoaine. (Virtanen et al. 1984, Immonen & Seppälä 1984).

Sodan aikana pilkkeeksi kutsuttiin kirveellä tai palahakkurilla tehtyjä noin 50–150 mm:n pituisia puun paloja. Näitä käytettiin sodan aikana auton puukaasuttimissa. Tässä julkaisussa pilke-sana tarkoittaa 0,25–0,50 m:n mittaisia puun paloja.

Yleisemmin käytössä oleva noin 33 cm:n pituuteen katkottu ja halkaistu tai aisattu pilke on kätevä ja helposti käsiteltävä polttopuun muoto.



Pilkkeet voidaan jakaa kolmeen laatuluokkaan (kuva 12). Pilke-erän laatuluokkaan vaikuttavat mm. (liite A2, Pirinen 1997)

- pilkkeiden pituus
- paksuus
- kosteus
- katkaisupinta
- puhtaus
- väri
- laho- ja home-esiintymät sekä
- puulajisuhde.



*Kuva 12. Pilkkeiden laatuluokat, vasemmalla luokka 3, luokka 2 ja luokka 1.  
Kuva: Työtehoseura.*

*Pituudeltaan* 25 cm:n ja 33 cm:n pilkkeitä käytetään lähinnä takoissa ja uuneissa, kun taas 50 cm:n pilke soveltuu keskuslämmityskattiloihin ja leivinuuneihin.

*Paksuus* tarkoittaa pilkkeen suurinta läpimittaa. Pilkottuna pilkkeen vähimmäispaksuuden ohjearvoksi suositellaan 4 cm ja enimmäispaksuudeksi laatuluokasta riippuen 10–15 cm. Kun rungon tai pölkyn halkaisija on yli 10 cm, puu pilkotaan neljään osaan ja halkaisijan ollessa alle 10 cm puu halkaistaan puoliksi. Pienemmät 4–5 cm paksut pilkkeet voi jättää halkaisematta, kunhan ne aisataan molemmilta puolilta. Tällaisia pilkkeitä saa kuitenkin laatuluokasta riippuen olla kokonaisuudesta enintään 5–25 %.

Irtomittaus on yleisesti käytetty *pilkkeiden mittausmenetelmä*, jossa pilkkeet mitataan toisiinsa nähden sekalaisessa (satunnaisessa) järjestyksessä tietyn kokoisessa laatikossa tai kasassa. Yleisimmin käytetään 1–3 m<sup>3</sup>:n suuruista mittalaatikkoa tai lavaa, jollaisena voi toimia esim. auton peräkärry. Pilkkeet voidaan kuormata laatikkoon joko käsin tai esimerkiksi traktoriin asennetulla kuormaimella. Perinteinen tapa mitata polttopuuta on mitata ne metrin halkoina pinossa. Menettely vastaa periaatteeltaan kuitupuun pinomittausta (ks. kohta 2.7). (Kouki 1997, Pirinen 1995, 1996). Taulukossa 38 on esitetty eri mittayksiköiden väliset muutokset.

Kaikkien luokkien pilkkeiltä vaaditaan polttoon sopiva riittävän *alhainen kosteustaso*. Ensimmäisen luokan pilkkeiltä vaaditaan <20 %:n kosteus, mikä saavutetaan kuivattamalla pilkkeitä kesän yli. Taulukossa 39 on pilkkeiden lämpöarvoja eri kosteuspitoisuuksilla.

*Taulukko 38. Pilkkeiden mittayksiköiden väliset muuntokertoimet (Pirinen 1995 ja 1996).*

Mittayksikkö	Irtto-m <sup>3</sup>	Pino-m <sup>3</sup>	Kiinto-m <sup>3</sup>
Irtokuutiometri, pilke (33 cm)	1	0,60	0,40
Pinokuutiometri, pilke (33 cm)	1,68	1	0,67
Pinokuutiometri, halko (100 cm)	1,55	1	0,62
Kiintokuutiometri	2,50	1,50	1

Esim. irtokuutiometri pilkettä sisältää 0,40 kiintokuutiometriä eli 400 litraa puuta.

Taulukko 39. Eri puulajien ja niiden seoksista valmistettujen pilkkeiden tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa (Pirinen 1997).

Puulaji	Tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa, kWh/kg	Kosteus %	Energiatiheys	
			kWh/i-m <sup>3</sup>	kWh/p-m <sup>3</sup>
Mänty	4,15	20	810	1 360
Kuusi	4,10	20	790	1 320
Koivu	4,15	0	1040	1 750
		10	1030	1 730
		20	1010	1 700
		30	990	1 660
		40	970	1 620
		50	930	1 550
Leppä	4,05	20	740	1 230
Haapa	4,00	20	790	1 330
Sekalehtipuu		0	790	1 330
		10	780	1 310
		20	760	1 280
		30	740	1 250
		40	720	1 200
		50	680	1 140
Sekahavupuu		0	830	1 380
		10	810	1 360
		20	800	1 340
		30	780	1 310
		40	760	1 270
		50	720	1 200

Lehtipuun oletetaan sisältävän leppää ja haapaa molempia 50% ja havupuun mäntyä ja kuusta molempia 50 %.

VTT Energian Jyväskylän laboratorion tutkimuksissa halkojen ja pilkkeiden kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo oli keskimäärin 18,73 MJ/kg (keskihajonta 0,67 MJ/kg), haihtuvien aineiden osuus 78,3 % (keskihajonta 3,9 %) ja tuhkapitoisuus 1,2 % (keskihajonta 0,8 %) (Alakangas et al. 1987).

Pilkkeiden kuivumiseen vaikuttavat alkukosteus, varastopaikka ja sää. Tärkeimmät ilmastolliset tekijät ovat: ilman suhteellinen kosteus, sademäärä, lämpötila ja tuuliolosuhteet. Tuoreesta puutavarasta (kosteus 40–50 %) valmistetun pilkkeen kuivuminen polttokosteuteen kestää normaalina kesänä ulkona katoksen alla vähintään kaksi kuukautta. Tällöin saavutetaan 20–25 %:n kosteus. Tuore pilke kutistuu 6–7 %. Kutistuminen alkaa vasta 23–25 %:n kosteudessa eli ns. puu syiden kyllästymispisteessä. Puun varastointi talven yli esim. liiterissä ei enää oleellisesti vähennä puun kosteutta, koska puu kuivumisen kannalta otollista on kesäkausi huhtikuusta syyskuun alkuun. Ensimmäisen luokan pilkkeiden katkaisupinnan on oltava

tasainen ja sileä. Tämä edellyttää käytännössä sirkkeli-pilkkojan tai moottorisahan käyttöä. Giljotiini-periaatteella toimivat koneet jättävät pilkkeen päät aina epätasaisiksi, joten tällaiset pilkkeet luokitellaan toiseen tai kolmanteen luokkaan.

Pilkkeen joukossa ei sallita muovia, nokea, metalleja, torjuntakemikaaleja tai muita haitallisia aineita. Myöskään lunta tai jäätä ei sallita. Home-esiintymiä ei sallita ensimmäisen luokan pilkkeissä lainkaan. Pilkkeen on oltava terveen puun väristä. Halkaisupinnoissa ei sallita mustumaa tai muuta käyttöarvoa alentavaa värivikaa. Puun värin käyttö laatukriteerinä koskee lähinnä sisätilojen siisteissä ympäristöissä poltettavaa pilkettä eli ns. elämyspuuta. Pilkkeessä oleva laho alentaa puun lämpöarvoa ja heikentää ulkonäköä. Lahossa puussa polttokelpoisen aineksen määrä ja samalla energiasisältö on pienempi kuin terveessä.

Pilkkeet lajitellaan niiden sisältämän pääasiallisen puulajin mukaan. Ensimmäisen luokan koivupilkkeissä ei sallita muita puulajeja. Lehtipuupilkkeessä ei hyväksytä havupuuta. Havupuupilkkeessä lehtipuuta sallitaan rajoituksetta.

## **3.6 Puubriketit ja pelletit**

### **3.6.1 Puubriketit**

Puubriketit valmistetaan kuivasta purusta, hiontapölystä ja kutterinlastusta puristamalla. Sideaineita ei tavallisesti käytetä, sillä puun omat ainekset (ligniini) pitävät puristeen koossa. Puubriketti on yleensä poikkileikkaukseltaan pyöreä tai neliön muotoinen. Sivun pituus tai halkaisija on 50–80 mm. Pyöreän briketin sisällä voi olla reikä, jonka halkaisija on 10–20 mm. Puristamisen aikana puuaineksen kosteus on alle 15 %. Puubrikettien kuiva-ainemassa on keskimäärin 1000 kg/i-m<sup>3</sup>. Muihin polttoaineisiin verrattuna ne ovat raskasta ja kuivaa polttoainetta. VTT Energian analyysituloksia on taulukossa 40 (Laine & Sahrman 1985).

Suomessa sylinterimäisiä brikettejä valmistetaan Rantasalmella, Suolahdessa ja Kiteellä. Näiden brikettien kuiva-aineen tiheys on 1 080 kg/m<sup>3</sup> ja tilavuuspaino 650 kg/i-m<sup>3</sup>. Briketin halkaisija on 65 mm ja pituus 10–200 mm. Briketin tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on n. 4,8 kWh/kg (17,3 MJ/kg), kosteus noin 6 %:a ja tuhkapitoisuus n. 0,5 %. Lisäksi joillakin mekaanisen metsäteollisuuden yrityksillä on pieniä brikettipuristimia, joilla voidaan tehdä kiekkomaisia brikettejä. Näiden brikettien kestävyys ei ole niin hyvä kuin sylinterimäisen briketin (Suur-Savon Sähkö 2000).

*Taulukko 40. Sylinterimäisen sahanpurusta valmistettujen puubrikettien ominaisuuksia (Laine & Sahrman 1985).*

	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	Kosteus valmistusvaiheessa, %	Haihtuvat aineet %	Tuhkapitoisuus %
Puubriketti	18,93 ka keskihajonta 0,19	5,4 keskihajonta 0,4	83,6 keskihajonta 0,7	0,3

ka=keskiarvo

Suomessa ei briketeille ole laatuluokitusta, joten oheisena ruotsalainen laatuluokitus SS 18 71 21 (taulukko 41).

*Taulukko 41. Brikettien luokitus Ruotsissa (SS 18 71 21).*

Ominaisuus	Testausmenetelmä	Yksikkö	Ryhmä 1	Ryhmä 2	Ryhmä 3
Mitat; halkaisija ja pituus tuottajan varastossa	Määritetään 10 satunnaiserän perusteella	mm	Määritellään tapauskohtaisesti Min. 25 mm < ½ halkaisijasta, mutta max. 300 mm	Määritellään tapauskohtaisesti Min. 25 mm. Min. 10 mm ja max. 100 mm	Määritellään tapauskohtaisesti Min. 25 mm
Tiheys	SS 18 71 78	kg/m <sup>3</sup>	≥550	≥450	≥450
Lujuus tuottajan varastossa	SS 18 71 80	Hienoaineksen määrä, % < 15 mm	≤8	≤10	>10
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	SS-ISO 1928	MJ/kg kWh/kg	≥16,2 ≥4,5	≥16,2 ≥4,5	Määritellään erikseen
Tuhkapitoisuus	SS 18 71 71	%	≤1,5	≤1,5	Määritellään erikseen
Kosteus	SS 18 71 70	%	≤12	≤12	≤15
Rikkipitoisuus	SS 18 71 77	%	≤0,08	≤0,08	Määritellään erikseen
Lisäaineiden määrä			Määritellään erikseen		
Kloori	SS 18 71 85	%	≤0,03	≤0,03	Määritellään erikseen
Tuhkan sulamis-käyttäytyminen	SS-ISO 540	°C	Määritellään erikseen		

### 3.6.2 Puupelletit

Puupelletit ovat puristamalla valmistettuja, sylinterimäisiä, joskus neliömäisiä rakeita. Pelletit ovat halkaisijaltaan 8–12 mm ja niiden pituus on 10–30 mm. Niiden raaka-aineiksi käyvät esim. teollisuuden puutähteet, kuori ja metsähake. Puupelletit sopivat pientalojen, maatilojen ja suurkiinteistöjen lämmityspolttoaineeksi. Puupellettien polttoon tarvitaan erityisesti sitä varten suunnitellut laitteet. Isoissa lämpö- tai voimalaitoksissa pelletit murskataan ennen syöttämistä esim. pölypolttokattilaan. Suomessa puupelletteja valmistetaan Vöyrissä, Turengissa ja Ilomantsissa (Kytö et Äijälä 1981; Jätepuun käyttö ja jalostus energiaksi).

Puupellettien irtotiheys on 600–750 kg/i-m<sup>3</sup> ja kiintotiheys 1 100–1 500 kg/m<sup>3</sup>. Puuta pelletteitaessa katsotaan tehontarpeen, lujuuden ja laitekapasiteetin kannalta ihannekosteudeksi 10–15 %. Pelletteinnin onnistumista kuvaa se, kuinka paljon pellettien joukossa on hienoainesta puristamisen jälkeen.

Puupellettien tehollinen lämpöarvo on saapumistilassa 14–17,5 MJ/kg. Suomessa tuotettujen pellettien tehollinen lämpöarvo on 4,6–4,9 kWh/kg, kosteus 8–10 %, irtotiheys 640–690 kg/i-m<sup>3</sup> ja tuhkapitoisuus 0,3–0,5 % (Kytö et al. 1983; Jätepuun käyttö ja jalostus energiaksi).

Suomessa ei puupelleteille ole laatustandardeja, joten seuraavassa esitellään ruotsalaiset ja saksalaiset standardit (taulukot 42 ja 43).

*Taulukko 42. Ruotsalainen pellettiluokitus SS 18 71 20 mukaan.*

Ominaisuus	Testausmenetelmä	Yksikkö	Ryhmä 1	Ryhmä 2	Ryhmä 3
Halkaisija ja pituus tuottajan varastossa	Mitataan 10:stä satunnaiserästä	mm	Tapauskohtainen <4 kertaa halkaisija	Tapauskohtainen <5 kertaa halkaisija	Tapauskohtainen <5 kertaa halkaisija
Tiheys	SS 18 71 78	kg/m <sup>3</sup>	≥600	≥500	≥500
Lujuus tuottajan varastossa	SS 18 71 80	Hienoaineksen paino <3 mm; %	≤0,8	≤1,5	≤1,5
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	SS ISO 1928	MJ/kg kWh/kg	≥16,9 ≥4,7	≥16,9 ≥4,7	≥15,1 ≥4,2
Tuhkapitoisuus	SS 18 71 71	%	≤0,7	≤1,5	≤1,5
Kosteus saapumistilassa	SS 18 71 70	%	≤10	≤10	≤12
Rikkipitoisuus	SS 18 71 77	%	≤0,08	≤0,08	Määritellään erikseen
Lisäaineiden pitoisuus			Pitoisuus ja tyyppi määritellään erikseen		
Klooripitoisuus	SS 18 71 85	%	≤0,03	≤0,03	Määritellään erikseen
Tuhkan sulamis- käyttäytyminen	SS 18 71 65 tai muu vastaava menetelmä	°C	Lämpötilat määritellään erikseen		

Saksalainen DIN 51731 antaa seuraavat vaatimukset pellettien laadulle:

- Kiintotiheys 1 000–1 400 kg/m<sup>3</sup>
- Kosteus, <12%
- Tuhkapitoisuus <1,5%
- Lämpöarvo käyttökosteudessa 4,8–5,4 kWh/kg.

*Taulukko 43. Pellettien mitat DIN 51731 -normin mukaan.*

Laatuluokka	Pituus, cm	Halkaisija, cm
HP1	>30	>10
HP 2	15–30	6–10
HP 3	10–16	3–7
HP 4	<10	1–4
HP 5	<5	0,4–1

Lisäksi on määritelty seuraavat ylimmät sallitut pitoisuudet: rikki 0,08 %, kloori 0,03 %, typpi 0,3 %, arseeni 0,8 mg/kg, kadmium 0,5 mg/kg, kromi 8 mg/kg, kupari 5 mg/kg, elohopea 0,05 mg/kg, lyijy 10 mg/kg, sinkki 100 mg/kg ja halogeenit 3 mg/kg (DIN 51731).

Joutuessaan kosketuksiin veden kanssa puupelletit kostuvat, turpoavat ja hajoavat. Ne kestävät suoranaista kosteutta huonosti. Siksi puupellettivarasto täytyy suojata sateelta. (Kytö et al. 1983).

### 3.7 Puuhiili

Puuhiilen valmistajia on Suomessa tänä päivänä muutamia kymmeniä. Hiilen valmistus on usein pienimuotoista, metalli- tai tiilimiiluisissa tapahtuvaa tuotantoa.

Puuhiilellä tarkoitetaan usein kotitaloushiiltä eli grillihiiltä. Kuitenkin teollinen puuhiilen käyttö on maailmanlaajuisesti varsin laajaa. Yleisintä käyttö on terästeollisuudessa ja piin valmistuksessa. Hienojakoinen hiili sopii käytettäväksi myös sementin valmistuksessa ja yleensäkin energialähteenä pölynä tai lietteenä. 1930- ja 1940-luvuilla puuhiiltä käytettiin puukaasuttimissa. Aktiivihiilen raaka-aineena puu ja muut kasvipäriset materiaalit ovat yleisempiä ja puhtaimpia.

Puuhiiltä voidaan valmistaa kaikista puulajeista ja kasvien osista. Lopullisen hiilen ominaisuudet riippuvat sekä raaka-aineen ominaisuuksista että valmistusprosessista. Tuotettu hiili voidaan tarvittaessa briketoida sideaineen avulla. Useimmiten vaatimuksena on, ettei hiili ole kovin helposti murskaantuvaa ja että se syttyy helposti ja hehkuu mahdollisimman pitkään. Yleisesti kovapuu eli lehtipuu pidetään parempana grillihiilen raaka-aineena (Ranta 1994).

Taulukossa 44 on esitetty puuhiilen keskimääräisiä ominaisuuksia.

*Taulukko 44. Puuhiilen ominaisuuksia (Ranta 1994).*

Ominaisuus	Yksikkö
Tiheys	100–500 kg/m <sup>3</sup>
Irtotiheys	130–150 kg/i-m <sup>3</sup>
Ominaispinta-ala	1–2 m <sup>2</sup> /g
Lujuus	Puulajin ja valmistusprosessin mukaan
Kosteus	1–16 %
Haihtuvat aineet	7–30 %
Kiinteä hiili C <sub>fix</sub>	80–90 %
Lämpöarvo	30–35 MJ/kg
Rikkipitoisuus	<0,05%
Fosforipitoisuus	<0,03 %
Tuhkapitoisuus	0,5–10 %

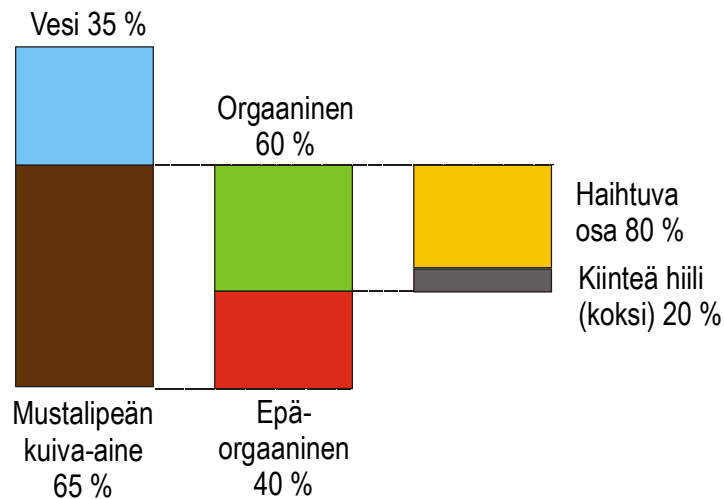
Puuhiilen tiheys riippuu käytetyn raaka-aineen tiheydestä ja kappalekoosta. Pyökkihiilen paino on 190–200, koivuhiilen 160–170, mäntyhiilen 130–140 ja kuusihiilen 110–120 kg/m<sup>3</sup>.

Puuhiilen kosteus on yleensä alle 10 %. Haihtuvien aineiden määrä on yleensä 10–30 %:n välillä. Kotitalouksissa suositaan usein suurta haihtuvien aineiden määrää, koska hiili on tällöin helpompi sytyttää, mutta samalla on syntyvien haitallisten kaasujen määrä suurempi. Puuhiilen tuhkapitoisuus on 0,6–1,5 %, mutta ei ole harvinaista, että epäpuhtauksien (mm. maa-aineksen) mukaan joutuminen aiheuttaa tuhkapitoisuuden nousun jopa yli 10 %:iin (Ranta 1994).



## 4. Mustalipeä

Sulfaattimenetelmä on kehittynyt merkittävimmäksi kemiallisen massan valmistusmenetelmäksi. Menetelmässä poistetaan epäorgaanisten keittokemikaalien avulla suurin osa raaka-ainepuun selluloosakuitujen toisiinsa sitovasta ligniinistä voimakkaasti alkalisissa olosuhteissa. Tämä ei kuitenkaan tapahdu selektiivisesti, vaan osa selluloosasta ja puun muista hiilihydraattikomponenteista (glukomannaanit ja ksylaani) purkautuu samanaikaisesti alifaattisiksi karboksyylihappoiksi. Puun hiilihydraatteihin kohdistuvien saantohäviöiden takia noin puolet puun kuivasta massasta liukenee keiton kuluessa keittoliemeen (kuva 13, taulukko 45). Keittoliemen ns. mustalipeän kuiva-aine sisältää siten epäorgaanisen aineksen lisäksi pääasiassa pilkkoutunutta ligniiniä ja hiilihydraattipohjaisia karboksyylihappoja. Lisäksi lipeässä esiintyy vähäisiä määriä uuteainefraktioita (Raiko et al. 1995, Hupa 1997, Backman et al. 1995).



Kuva 13. Mustalipeän pääaineosat (Raiko et al. 1995).

Mustalipeän kemiallinen koostumus sekä ominaisuudet vaihtelevat kuitenkin merkittävästi ja niihin vaikuttavat (Raiko et al. 1995, Hupa 1997, Backman et al. 1995).

- lipeän kuiva-aine (taulukko 48)
- keittoon annosteltu hakkeen laatu (havu- ja lehtipuu-hake) (taulukot 45–46),
- sovellettu keittomodifikaatio (taulukko 46) sekä
- tehtaan prosessivesien kierrätysaste.

Taulukko 45. Mänty- ja koivupuusta tehdyn mustalipeän tyypilliset koostumukset (% kuiva-aineesta) (Alén 1998).

	Mänty	Koivu
Ligniini	31	25
Alifaattiset hapot	29	31
Muut orgaaniset	7	11
Uuteaineet	4	3
Polysakkaridit	2	7
Muut	1	1
Epäorgaaninen*	33	33

\* sisältää myös orgaaniseen ainekseen sitoutuneen natriumin

Taulukko 46. Lipeäanalyysi eri tehtailta Suomessa ja muissa maissa (Siiskonen & Mäntyniemi 1994, Hupa et al. 1996).

HAIHDUTTAMOLTA	C	H	N	Na	K	S	Cl
Tehdas 1	38,1	3,9	0,2	18,5	1,3	3,7	0,7
Tehdas 2	32,3	3,3	0,2	20,7	1,9	4,6	1,0
Tehdas 3	35,0	3,6	0,1	19,8	1,2	3,8	0,9
Tehdas 4	33,5	3,4	0,2	19,2	3,0	4,5	0,7
Tehdas 5	33,0	3,4	0,1	20,8	1,4	3,9	3,1
POLTTOON	C	H	N	Na	K	S	Cl
Tehdas 1	35,2	3,7	0,2	19,0	1,5	4,1	0,8
Tehdas 2	31,0	3,1	0,1	20,7	2,1	4,2	1,2
Tehdas 3	33,4	3,4	0,1	20,3	1,4	4,4	1,1
Tehdas 4	33,0	3,4	0,1	19,0	3,4	4,8	0,8
Tehdas 5	32,3	3,3	0,1	21,6	1,7	4,4	3,7
MUISTA MAISTA	C	H	N	Na	K	S	Cl
Pohjoismaat, havupuu	35,8	3,6	0,06	21,0	1,8	4,6	0,5
Pohjoismaat, lehtipuu	33,1	3,4	0,07	25,9	1,8	5,0	0,6
Pohjoismaat, havupuu	34,4	3,3	0,06	28,6	1,6	3,7	0,5
Pohjoismaat, havupuu	33,9	3,3	0,07	25,1	3,2	5,7	0,3
Pohjoismaat, havupuu	34,6	3,4	0,07	23,7	3,2	5,4	0,3
Pohjoismaat, havupuu	34,1	3,4	0,07	22,3	1,2	5,5	0,2
Pohjoismaat, havupuu	34,2	3,4	0,07	21,4	1,2	5,1	0,2
Pohjoismaat, havupuu	34,6	3,3	0,07	19,5	1,4	5,2	0,5
Pohjoismaat, lehtipuu	33,2	3,3	0,08	21,1	2,6	5,2	0,3
P-Amerikka, eucalyptus	37,3	3,6	0,09	19,0	1,8	3,4	1,6
P-Amerikka, havupuu	34,3	3,4	0,06	19,7	3,0	5,2	0,9
P-Amerikka, havupuu	36,8	3,7	0,08	21,3	1,3	4,4	0,6
P-Amerikka, bagassi, soodakeitto	34,0	3,7	0,19	22,7	0,6	1,3	0,5
Kaukoitää, olki, soodakeitto	35,4	3,8	0,75	17,1	1,9	1,6	3,6
P-Amerikka, havu/lehti	35,0	3,5	0,11	18,5	3,1	4,0	0,4
P-Amerikka, havupuu	38,0	3,7	0,09	21,9	1,0	3,6	1,7
Pohjoismaat, lehtipuu	33,5	4,0	0,2	14,2	1,1	7,6	0,4

Taulukko 47. Mustalipeän koostumus (% kuiva-aineesta) (Söderhjelm et al. 1989).

	Tehdas 1	Tehdas 2	Tehdas 3	Tehdas 4	Tehdas 5	Tehdas 6
Malli	Lehtipuu	Havupuu	Lehtipuu	Havupuu	Lehtipuu	Lehtipuu
Tuhka, 700 °C	50,3	47,9	55,8	44,8	51,8	48,9
C	32,8	35,8	30,5	37,8	33,3	33,4
H	3,3	3,5	3,4	4,2	3,6	3,9
N	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
S	4,6	4,1	6,4	4,8	5,4	4,4
Na	20,7	19,9	21,0	17,9	19,9	20,7
K	-	1,1	1,1	1,2	1,5	1,7
Ca	-	0,006	0,02	0,007	0,02	0,01
Cl	-	0,2	0,7	2,9	0,6	0,25
Si	-	0,03	0,05	0,04	0,03	0,08
NaHS	4,3	5,3	4,2	5,5	3,8	3,2
NaOH <sup>1)</sup>	1,8	6,3	2,0	4,3	3,0	2,4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	2,3	-	2,3	5,8	3,4
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12,5	8,0	12,3	5,1	8,9	10,0
Teholl. alkaalit <sup>1,2)</sup>	4,9	10,0	5,0	8,2	5,7	4,7
Kalorim. lämpöarvo k. a., MJ/kg		14,1	11,9	15,4	13,2	13,2
Mäntyöljy	0,26	-	0,22	0,45	0,88	1,6
Ligniini	36,0	-	31,2	-	29,7	33,7
Karbosyylihapot	9,4	-	8,7	-	7,8	-
Ligniini-hiilihydraatti kompleksi	11	7	10	9	13	-
Polysakkariidit	5,0	2,8	3,6	2,2	1,6	-
Moolimassan fraktio <sup>3)</sup>	5	-	5	11	4	3
TGA (thermogravimetri)						
Siirtolämpötila. °C	789	757	785	740	801	781
Häviö syttymisessä, %	16,8	18,8	16,4	23,4	23,5	15,5
Häviö ennen syttymistä, %	25,0	23,7	20,1	24,6	24,5	23,2
Viskositeetti, mPa•s	430	365	215	200	~ 30	90
Tavoite kappaluku	~20	30-32	~22	~34	~20	~15

<sup>1)</sup> Arvot ovat korkeita mutta vertailukelpoisia <sup>2)</sup> Laskettu NaOH:na <sup>3)</sup> Moolimassan fraktio >10 000 prosenttiosuutena kokonaisligniinistä

Mustalipeä poltetaan haihdutuksen jälkeen sulfaattitehtaan soodakattilassa keittokemikaalien regeneroinnin yhteydessä, jolloin samalla tuotetaan lämpöenergiaa.

Silmiinpistävä ero muihin polttoaineisiin verrattuna on mustalipeän sisältämän veden määrä ja epäorgaanisen ainekseen suuri määrä. Mustalipeän kalorimetrinen lämpöarvo kuiva-aineessa on tyypillisesti alueella 13–15 MJ/kg (Backman et al. 1995, Raiko et al. 1995).

Mustalipeän fysikaalisten ominaisuuksien määrittäminen ovat voimakkaan tutkimustoiminnan kohteena. Fysikaalisten ominaisuuksien määrittäjiä ovat mm. lipeän tiheyden ja kalorimetrinen lämpöarvon määrittäminen, mitkä riippuvat merkittävästi lipeän kuiva-ainesta, lämpötilasta ja kemiallisesta koostumuksesta. Sen sijaan esim. lipeän pintajännitystä, viskositeettia, lämmönjohtavuutta sekä kiehumispisteen nousua mittaavat menetelmät eivät ole toistaiseksi kaikilta osiltaan yksiselitteisiä.

Kiristyvät päästörajoitukset ja -määräykset, ympäristön laadun noustessa yhä tärkeämpään asemaan muuttavat selluprosesseja. Kemikaali- ja vesikiertojen yhä täydellisempi sulkeutuminen muuttaa mustalipeän aineominaisuuksia, kuten myös uudet rikin käsittelytekniikat ja jatkuvasti noussut sulfiditeettitaso (Vakkilainen 1993).

*Taulukko 48. Mustalipeän ominaisuuksien kehitys (Vakkilainen 1993).*

Ominaisuus	1982	1992	2002
Lipeän kuiva-ainetta, kg/mt	1 700	1 680	1 840
Sulfiditeetti ( $N_2S/(N_2S+NaOH)$ )	42	45	48
Lipeän lämpöarvo, MJ/kg	15	13,9	13
Lipeän kuiva-aine, %	64	72	80

Viimeaikaisen kehityksen ansiosta on mustalipeän kuiva-ainetaso haihduttamolta noussut 65 %:n tuntumasta 70–76 %:iin (taulukko 48). Uusien laitosten myötä nousu jatkunee. Joissakin kattiloissa poltetaan yli 80 %:n kuiva-aineista lipeää. Näin korkean kuiva-ainetason käyttöä rajoittaa korkeaviskoosisen lipeän käsittely ja haihduttamon likaantuminen. Lämpökäsittämällä mustalipeä saavutetaan korkea kuiva-aine ja matala viskositeetti. Kuiva-ainetasoa on pyritty nostamaan, koska se parantaa kattilahietyssuhdetta. Uuden kattilan lämpöpintojen, tulistimien, keittopinnan ja ekonomaiserin koko pienenee, kun kuiva-ainetaso nousee. Korkeakuiva-aineiset lipeäpisarat palavat nopeammin ja lähempänä ruiskua. Mustalipeä pisara kuivuu nopeammin ja pienemmällä lämpömäärällä, kun vesimäärä vähenee. Kuiva-aineen nosto nostaakin tulipesän alaosan lämpötilaa. Päästöt pienenevät ja reduktio nousee. Korkean kuiva-aineen poltossa ongelmaksi muodostuukin riittävän keon eli lämpötilan ylläpito (Vakkilainen 1993 ja 1994.)

Tuhkan alhaista sulamislämpötilaa on yleensä totuttu pitämään soodakattilan likaantumisongelmien aiheuttajana. Tätä käsitystä tukee se havainto, että poltettaessa runsaasti kaliumia ja klooria sisältäviä lipeitä ovat soodakattilan tukkeutumisongelmat huomattavan yleisiä (taulukko 46). Likaantumisilmiön helpottamiseksi tuhkan sulamiskäyttäytymistä pitäisi pystyä muuttamaan joko vaikuttamalla kaliumin ja kloorin

vapautumiseen tulipesässä tai poistamalla sitä lipeäkierrosta (Siiskonen & Mäntyniemi 1996).

Meesauunissa kalsiumkarbonaatin muunto kalsiumoksidiksi vaatii lämpöä. Tyypillisesti tämä lämpö tuotetaan raskaalla polttoöljyllä. Meesauunin rakenteen kehittyessä on ominaisenergiankulutus pudonnut. Öljyn lisäksi lämpö voidaan tuottaa myös biomassakaasuttimella tai käyttämällä mustalipeän prosessoinnin ohessa syntyvää kaasua meesauunin polttoaineena. Myös meesan kuiva-ainepitoisuus on noussut 1970-luvun 65–70 %:n tasosta 75–85 %:n tasoon (Vakkilainen 1993).

## 5. Turve

### 5.1 Turvevarat ja käyttö

Geologian tutkimuskeskus sekä Metsäntutkimuslaitos selvittävät Suomen suovaroja. Suovarojen tiedot ovat hiukan erilaisia eri lähteissä. Metsätilastollisen vuosikirjan mukaan soiden kokonaispinta-ala on noin 9 miljoonaa hehtaaria. Soiden kokonaisalasta on ojitettu noin 4,7 miljoonaa hehtaaria eli 34,1 %. Metsätilastoissa suoksi käsitetään alue, jossa turvetta ja/tai pintakasvillisuudesta on yli 75 % suokasvillisuutta (biologinen suo). Näin määritellyn suokäsitteen mukaisesti suoksi luokiteltujen maiden pinta-ala ei voi pysyä vakiona, vaan soita siirtyy aikaa myöten kankaiden luokkaan mm. suokasvillisuuden vähentyessä ojituksen vaikutuksesta (Vasander 1998, Metsätilastollinen vuosikirja 1999).

*Biologisesti määriteltyä suota* (maata peittää turvekerros tai pintakasvillisuudesta yli 75 % on suokasvillisuutta) on ollut Suomessa 1920-luvulla 12 milj. hehtaaria ja 1950-luvulla tehdyssä inventoinnissa 10,4 miljoonaa suohehtaaria. Osa soista on muuttunut ja luokiteltu viimeisimpien selvitysten mukaan muuksi maa-alueeksi. *Geologisia soita* eli yli 20 hehtaarin ja 0,3 metrin turvekerroksen paksuisia suoalueita on yhteensä 5,12 miljoonaa hehtaaria. Tästä teollisesti käyttökelpoista on 0,62 milj. ha ja suojeleuohjelmissa 0,84 milj. ha ja tämän lisäksi 0,3 milj. ha Lapin suojeltuja erämaasoita. Turveteollisuuteen soveltuviin soihin on sitoutunut energiaa yhteensä 650 milj. toe (7 300 TWh). Suokuutiosta saadaan energiaa keskimäärin 0,47 MWh ja hehtaarilta 11 700 MWh. Suomen soiden turvemäärä on 70,25 mrd suo-m<sup>3</sup>, josta kuivaainemäärä on 6 360 miljoonaa tonnia. Yli 2 m syvien soiden turvemäärä on 34,08 mrd suo-m<sup>3</sup>, yli 50 ha:n ja 2 m syvyisten soiden turvemäärä on 23,32 mrd suo-m<sup>3</sup>. Teollisesti käyttökelpoisen suoalan (0,622 milj. ha) turvemäärä on 16,04 mrd suo-m<sup>3</sup> (Lappalainen & Hänninen 1993, Selin 1999).

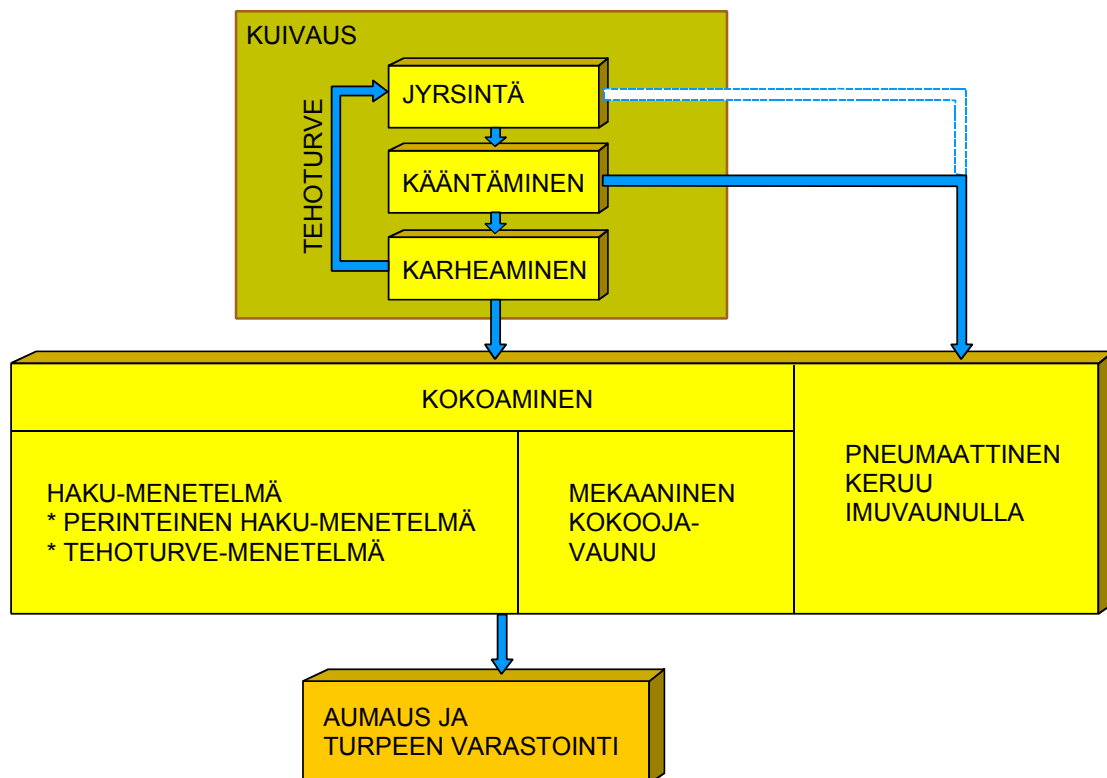
Yli 2 m syviä 50 hehtaarin soita on yhteensä noin miljoona hehtaaria. Turvetuotantoon on tällä hetkellä varattu suota 120 000 hehtaaria (100 milj.toe) eli noin 1 % maamme kosteikkopinta-alasta ja noin 2 % geologisista turvevaroista. Turvetuotantokuntoinen pinta-ala koko turveteollisuudella on noin 63 000 hehtaaria. Tuotantopinta-alasta suurimmalla osalla tuotettiin energiaturvetta. Turveteollisuudella on kunnostusvaiheessa 20 000 ha. Turvetuotannossa oleva suoala on 2,2 % viljelyksessä olevasta peltoalasta ja 0,2 % metsäalasta (Selin 1999).

Suo Oy on kartoittanut turvetuotantoon soveltuvien suopeltojen määrää. Riittävän suuria turvetuotantokelpoisia suopeltoja on 67 000 ha.

Turpeen tuotantomahdollisuudeksi on arvioitu noin 4–13 milj. toe, jos tuotantokelpoisista soista otetaan käyttöön noin 20 % 60 vuoden aikana. Turpeen käyttö on noin 2 milj.toe (23 TWh) vuodessa. 1980-luvulla Suomessa tuotettiin turvepellettejä, -koksia ja -brikettejä. Niiden kotimainen tuotanto on loppunut (Helynen 1999).

## 5.2 Jyrsinturve

Energiaturpeen tuotannosta on jyrsinpolttoturpeen osuus yli 90 %. Jyrsinturvetuotannon päävaiheet ovat jyrsintä, kääntäminen, karheaminen ja kokoaminen (kuva 14). Eri tuotantomenetelmät eroavat toisistaan kokoamisvaiheen perusteella. Suomessa kehitetyllä Haku-menetelmällä tuotetaan noin 80 % jyrsinturpeesta. 1980-luvun lopulla menetelmää ja siihen liittyviä koneita ja laitteita on kehitetty voimakkaasti ja tuloksena on syntynyt Tehoturve-menetelmä. Tehoturve-menetelmässä pyritään jyrsintävaiheessa mahdollisimman suureen raekokoon, jotta kuivuminen ja karheaminen tehostuu. Oleellista on myös erilaisen uusien materiaalien käyttäminen turvetuotannossa, jotta turpeen paloriskit pienenevät.



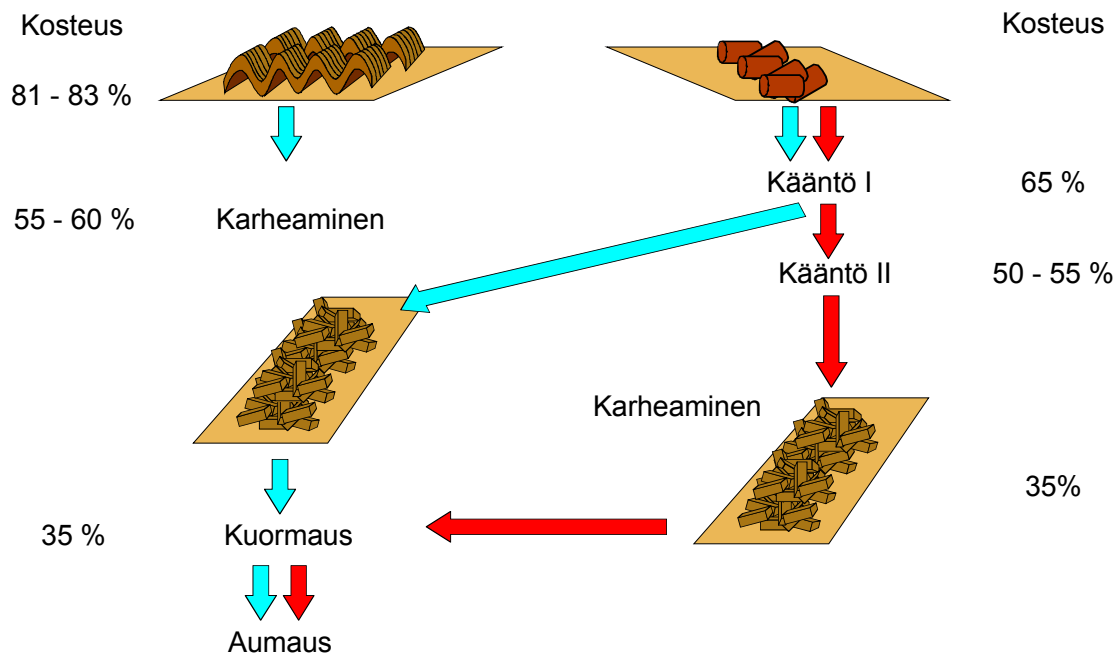
Kuva 14. Jyrsinturpeen tuotantomenetelmät (Alakangas & Hölttä 1998).

Kokoamismenetelmiä ovat kuormaus erillisellä kuormaajalla, karheensiirto-, mekaaninen kokoojavaunu- ja imuvaunumenetelmä. Karheensiirtomenetelmää käytetään Suomessa muutamalla työmaalla. Imuvaunu- ja kokoojavaunumenetelmää käytetään pienemmillä soilla ja mataloituvilla soilla. Niillä tuotetaan noin 20 % jyrshinturpeesta. Jyrshinturvetta käytetään kaukolämpölaitoksissa ja yhdyskuntien ja teollisuuden voimalaitoksissa. Viime vuosina turpeen käyttäjät ovat lisänneet mm. verotussyistä puupolttoaineiden käyttöä ja turpeen merkitys seospolttoaineena puun tai kierrätyspolttoaineiden kanssa on korostunut.

### 5.3 Palaturve

Palaturvemenetelmässä kenttään jyrhitään ura, josta irrotettu turvemassa muokataan, tiivistetään ja puristetaan suutinosan läpi palaturpeeksi kuivumaan kentän pinnalle. Jyrhintä tapahtuu joko nostokiekolla tai nostoruuvilla yleensä noin 0,5 m syvyydeltä. Yleisimmät palamuodot ovat sylinteripala eli ns. pyöreä pala ja lainepala (kuva 15).

Tuotantomenetelmästä riippuen palat joko käännetään kuivumisen nopeuttamiseksi ja kuivataan kentällä tai karhetaan puolikuivana ja kuivataan karheella tavoitekosteuteen. Palaturve kuivataan yleensä vähintään 35 %:n kosteuteen, mutta on myös käyttäjiä, jotka vaativat palaturpeen vielä tätäkin kuivempuna. Kuiva palaturve kerätään aumoihin ja aumat peitetään. Keskimääräinen satokierron pituus on noin 12 vuorokautta.



Kuva 15. Palaturpeen tuotantomenetelmät (Alakangas & Hölttä 1998).



Palaturvetuotannon riippuvuus säistä on pienempi kuin jrsinturvetuotannon. Karhekuivausmenetelmän käyttö parantaa palaturvetuotannon edellytyksiä epävakaisissa sääoloissa.

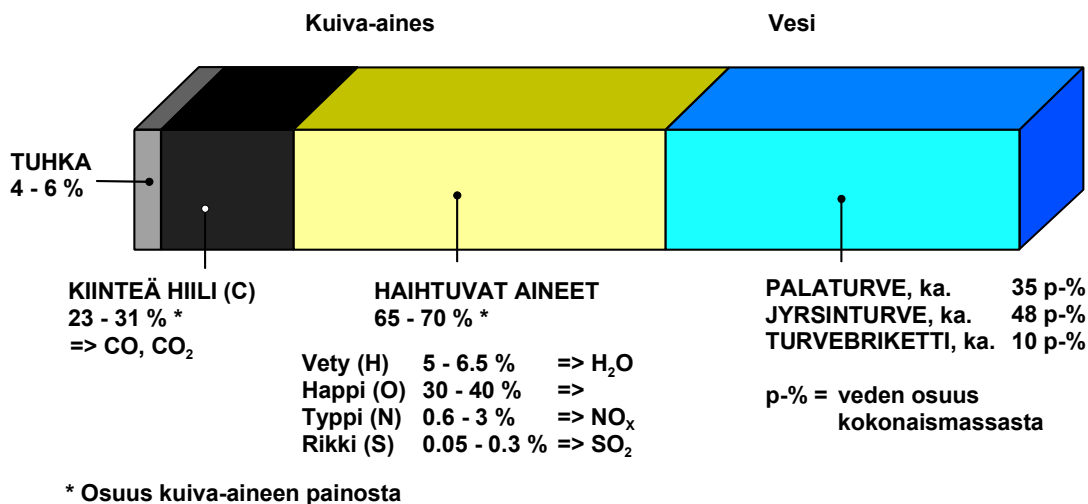
Palaturvemenetelmällä saadaan tyypillisesti 1–3 satoa kesässä säästä riippuen. Satojen lukumäärään vaikuttaa myös käytettävä palakoko. Isolla palakoolla saadaan suuri kentän kuormitus ja suuri saanto yhtä satoa kohti. Pienen palakoon etuna on isoa palaa nopeampi kuivuminen. Saantoon vaikuttaa myös hävikki, jota syntyy jokaisessa työvaiheessa paloja käsiteltäessä. Hävikki on tavallisesti palaturvetuotannossa 20–50 %. Palaturvesaanto satoa kohti on 150–300 m<sup>3</sup>/ha. Palaturvetta käytetään kiinteistöjen, kaukolämpökeskusten että suurempien voimalaitoksien polttoaineena.

## 5.4 Turve polttoaineena

Turve on materiaalia, joka on muodostunut kuolleista kasvin osista maatumalla hyvin kosteissa olosuhteissa. Hapen puutteen ja runsaan veden takia kasvien jäänteet eivät hajoa kunnolla, ja näin syntyy jatkuvasti kasvava turvekerrostuma. Turve sisältää vaihtelevan määrän maatumattomia tai huonosti maatumia, karkeita kasvinosia (liekopuuta, varpuja yms.).

Polttoaineen paino määritetään pääosin voimalaitoksella autovaaalla ja kosteus polttoainenäyttein. Turvetuotannossa polttoaineen määrä määritetään m<sup>3</sup>:inä turveaumassa (Fagernäs et al. 1980, Impola 1983, Impola et al. 1986).

Kuvassa 16 on polttoturpeen keskimääräinen koostumus. Turpeen koostumus ja rakenne vaihtelevat suuresti mm. turpeen kasvilajikoostumuksen ja maatumisasteen mukaan. Turve luokitellaan Suomessa kasvitieteellisen koostumuksen mukaan seuraaviin pääturvelajeihin: rahkaturpeisiin (S), saraturpeisiin (C) ja ruskosammal turpeisiin (B). Nämä kasvit voivat yksinään muodostaa turvelajin. Usein turvelaji kuitenkin koostuu kahdesta pääturvelajista. Turpeen eräs tärkeä ominaisuus on maatumisaste. Maatumisaste ilmoitetaan ns. H-arvona, joka voi vaihdella 1:stä 10:een. H 1 tarkoittaa täysin maatumatonta kasviainesta ja H 10 täysin maatumutta turvetta (von Post 1922).



Kuva 16. Turpeen koostumus (\* osuus kuiva-aineesta) (Alakangas et al. 1987).

Pääosa turpeesta on hiiltä (53–56 %). Hiilipitoisuus vaihtelee turvelajin ja maatumisasteen mukaan (taulukko 49 ja 50). Turpeen maatuessa hiilipitoisuus tavallisesti kasvaa. Keskimaatuneessa turpeessa hiiltä on keskimäärin 53,7 %. Rahkaturpeessa on runsaasti selluloosaa ja hemiselluloosaa. Saraturpeessa on taas enemmän ligniiniä kuin rahkaturpeessa. Maatumisasteen kasvaessa lisääntyy ligniinin määrä, mutta selluloosan ja hemiselluloosan pitoisuudet alenevat. Turpeessa on vetyä 5–6 %, happea 30–40 %, rikkiä alle 0,3 % ja typpeä 0,6–3 %. Turpeen rikkipitoisuus on yleensä 0,1–0,2 %. Joillakin alueilla, lähinnä Itä-Suomessa, rikkipitoisuus voi olla yli 0,3 %. Suuren hiilipitoisuuden takia turve palaa ”hitaammin” kuin puu (Berggren et al. 1980, Blomqvist et al. 1984, Impola 1983 ja 1986, Moilanen & Ranta 1983) (taulukot 52 ja 53).

Taulukko 49. Maatumisasteen vaikutus turpeen koostumukseen (Arpiainen et al. 1986)

Aineosa	Vähän maatonut H1-2, % k.a.	Keskimaatonut H5-6, % k.a.	Maatonut H9-10, % k.a.
Selluloosa	15–20	5–15	–
Hemiselluloosa	15–30	10–25	0–2
Ligniini ja sen kaltaiset aineet	5–40	5–30	5–20
Humusaineet	0–5	20–30	50–60
Bitumi (vahat ja hartsit)	1–10	5–15	5–20
Tyypipitoiset aineet (proteiiniksi lask.)	3–14	5–20	5–25

Taulukko 50. Turpeen maatumisasteen vaikutus hiilen, vedyn, typen ja hapen pitoisuuteen kuiva-aineessa (Seppälä et al. 1982, Taipale 1996).

Maatumisaste	Hiili	Vety	Typpi	Happi
Vähän maatonut H1-2	48–50	5,5–6,5	0,5–1	38–42
Keskimaatonut H5-6	53–54	5,0–6,0	1–2	35–40
Maatonut H9-10	58–60	5,0–5,5	1–3	30–35

Taulukko 51. Jyrsin- ja palaturpeen alkuainepitoisuudet (Taipale 1996).

Polttoaine	Hiili	Vety	Typpi	Happi	Rikki
Jyrsinturve	54.5	5.58	2.01	32.6	0.19
Palaturve	55.7	5.69	1.97	32,7'	0.17

Taulukko 52. Jyrsin- ja palaturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia (Taipale 1996, Electrowatt-Ekono 1999 a ja b).

Lähde	Kosteus- pitoisuus p-%	Tuhka- pitoisuus k.a. p-%	Haihtuvat aineet k.a. p-%	Kalorimetr. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo saap.til. MJ/kg	Tilavuuspaino saap.til. kg/m <sup>3</sup>	Tilavuuspaino k.a. kg/m <sup>3</sup>	Energiatiheys MWh/m <sup>3</sup>
JYRSINTURVE									
VTT	48,5	5,1	68,6	22,1	20,9	9,6			
Ekono*	46,12	5,9			21,0	9,6	341	180	0,89
Vapo		5,1	68,9		21				
PALATURVE									
VTT	38,9	4,5	68,9	22,5	21,3	11,9			
Ekono*	39,6	4,9			21,2	11,8	387	234	1,27
Vapo		3,9			21,7				

\*Energia-Ekono kerää tiedot turpeen käyttäjiltä (painotetut keskiarvot vuosilta 1981-1999).

Haihtuvia aineita turpeessa on vähemmän kuin puussa eli 65–70 %. Edellä mainituista syistä turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on suurempi kuin puun. Kuiva-aineen teholliseen lämpöarvoon vaikuttavat myös maatumisaste, turvelaji sekä hiili- ja tuhkapitoisuus. Maatuneisuuden kasvaessa lämpöarvo paranee. Samalla kuitenkin yleensä lisääntyy tuhkapitoisuus, mikä ainakin teoriassa alentaa lämpöarvoa. Turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on noin 20–23 MJ/kg.

Viime vuosina jyrshinturpeen kosteus on keskimäärin 46 % ja palaturpeen alle 40 %. Lämpöarvo saapumistilassa eli laitoksella on jyrshinturpeella keskimäärin 9,6 MJ/kg (0,91 MWh/i-m<sup>3</sup>) ja palaturpeen 11,8 MJ/kg (1,27 MWh/ i-m<sup>3</sup>) (taulukot 52, 58–59). Jyrshinturpeen tiheys (tilavuuspaino saapumistilassa) on keskimäärin 341 kg/i-m<sup>3</sup> ja palaturpeen 387 kg/i-m<sup>3</sup>. Turpeen tuhkapitoisuus vaihtelee 2 %:sta 10 %:iin. Turpeessa oleva hiekka on tavallisesti kulkeutunut suolle veden ja/tai tuulen mukana tai sekoittunut polttoaineeseen käsittelyn ja kuljetuksen aikana. Määrään ja laatuun vaikuttavat mm. ympäristön happamuus, alueen soistumistapa, suotyyppi, suon kasvi- ja sammaltyypit sekä ilman epäpuhtauslaskeumat. Hiekka on koostumukseltaan 70–90 % erittäin kovaa ja sulamispisteeltään korkeaa kvartssia (SiO<sub>2</sub>) loppuosan ollessa tavallisimmissa kivilajeissa esiintyviä mineraaleja mm. albiittia. Turpeen rautapitoisuus on seurausta suovesien sisältämien humus- ja hiilihappojen aiheuttamasta mineraaliin rapautumisesta. Rahkaturpeen tuhkapitoisuus on keskimäärin pienin ja saravaltaiten turpeiden suurin. Turpeen tuhkapitoisuus on keskimäärin 5–6 % (taulukot 52, 58–59). Tuhka koostuu pääosin silikaateista sekä raudasta ja alumiinista, joista kunkin osuus on yli 10 % (taulukko 55). Lisäksi kalsiumpitoisten yhdisteiden määrä saattaa ylittää satunnaisesti 10 % (Uosukainen 1993). Taulukossa 53 on polttoturpeen raskasmetallipitoisuuksia.

*Taulukko 53. Polttoturpeen raskasmetallipitoisuudet kuiva-aineessa (mg/kg) (Taipale 1996).*

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Keskim. pit.	2,2	0,12	1,4	5,9	6	3,9	4,6	9
Keskim. hajonta	1,2	0,025	0,61	2,78	2,61	1,66	1,48	3,54
Min	0,2	0,03	0,1	0,9	1,4	0,8	0,6	2,8
Max	9,3	0,2	3,7	24,9	16,5	16,7	9,9	36,5

Taulukko 54. Turvetuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa ilmakehässä (Taipale 1996).

Polttoainetyyppi	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (VTT), °C			Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Vapo), °C			
	Pehmenemispiste A	Puolipallopiste B	Sulapiste C	Piste IT	Piste ST	Piste HT	Piste FT
Jyrsinturve ka	1 130	1 253	1 290				
min	1 100	1 200	1 205				
max	1 190	1 375	1 430				
Palaturve ka	1 136	1 273	1 308	1 158	1 218	1 252	1 292
min	1 040	1 145	1 175	1 100	1 130	1 160	1 180
max	1 335	1 415	1 490	1 250	1 340	1 380	1 470

ka=keskiarvo

Taulukko 55. Turvetuhkien keskimääräinen koostumus Suomessa (Ekman 1979).

Alkuainekomponentti	Pitoisuus p-% kuiva-aineessa
CaO	1,5–12,0
MgO	0,5–2,5
TiO	0,5–1,0
K <sub>2</sub> O	0,1–0,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2–4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0–7,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1–16
SiO <sub>2</sub>	40–75

Taulukko 56. Erotintuhkan pääalkuainepitoisuudet (Taipale 1996).

Alkuaine	Pitoisuus p-% kuiva-aineessa	Alkuaine	Pitoisuus p-% kuiva-aineessa
SiO <sub>2</sub>	32–51	Si	15–24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10–36	Fe	7–25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6–29	Al	3–15
CaO	6–17	Ca	4–12
MgO	1–4	Mg	0,6–2,4
K <sub>2</sub> O	<1–7	K	<0,8–5,8
Na <sub>2</sub> O	<1–3	Na	<0,7–2,2
BaO	0,1–0,6	Ba	0,09–0,5
TiO <sub>2</sub>	0,2–0,5	Ti	0,12–0,3
MnO	0,1–0,3	Mn	0,08–0,23
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1–13	P	0,4–5,7
SO <sub>3</sub>	0,4–4	S	0,16–1,6

Kemiallisesti turve on hyvin reaktiivista. Tätä turpeen ominaisuutta voidaan hyödyntää esim. turpeen kaasutuksessa ja turveammoniakin valmistuksessa. Myös koksauksessa saatava turvehiili on erittäin reaktiivista ja sitä voidaan käyttää metallien ja malmien pelkistykseen. Toisaalta turve reaktiivisuutensa takia syttyy helposti palamaan ja on kuivana ja hienojakoisena herkkää räjähtämään, ja siksi turpeen käyttöön liittyy tulipalo- ja pölyräjähdysvaara. Turve on myös hapanta (suomalaisen turpeen pH on 5–6) ja aiheuttaa siten korroosiota (Weckman 1986, Wilén et al. 1999).

*Taulukko 57. Erotintuhkan raskasmetallipitoisuudet (Taipale 1996)*

Raskasmetalli	Pitoisuus mg/kg kuiva-aineessa	Raskasmetalli	Pitoisuus mg/kg kuiva-aineessa
As	2–365 <sup>1)</sup>	Zn	<20–540
Hg	0,3–2	Ni	30–700
Pb	75–970	Cu	60–160
Cd	0,5–5	U	3–41
Co	10–50	Th	11–53
Cr	40–130		

<sup>1)</sup> Maksimiarvo on vain yksi mittaustulos.

Turveteollisuusliitto on yhdessä Energiataloudellisen yhdistyksen ja Lämpölaite-yhdistyksen kanssa määritellyt jyrsin- ja palaturpeelle laatuluokituksen (liite A3–A4). Electrowatt-Ekono seuraa vuosittain myös toimitetun turpeen laatua kyselemällä turpeen käyttäjiltä. Taulukoihin 58 ja 59 on koottu turpeen käyttäjien keskimääräisiä tietoja jyrsin- ja palaturpeen ominaisuuksista. Taulukoissa 60–64 on turpeen käsittelytekniisiä ominaisuuksia.

*Taulukko 58. Jyrsinturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia vuosilta 1985–1992 ja 1994–1998 (vuoden 1993 tietoja ei ole tilastoitu). (Electrowatt-Ekono Oy 1999 b).*

	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1994	1995	1996	1997	1998	1999*
Määrä, GWh	7 650	8 820	8 593	8 364	8 061	10 165	11 702	11 312	13 986	15 645	19 538	19 276	15 831	15 413
Kuiva-aineen teholl. lämpöarvo MJ/kg	21,0	20,9	20,9	20,9	20,9	20,8	21,0	20,9	20,9	20,8	20,8	20,7	21,0	20,7
Keskikosteus p-%	49,8	49,5	50,2	51,2	48,4	47,1	48,1	49,3	47,1	46,3	46,0	46,3	46,5	46,2
Teholl. lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	9,4	9,3	9,2	8,9	9,6	9,8	9,7	9,4	9,9	10,1	10,1	10,0	10,1	10,0
Kuiva-aineen tilavuuspaino kg/m <sup>3</sup>	173	170	171	169	176	173	176	171	176	178	178	179	178	179
Tilavuuspaino saapumistilassa kg/m <sup>3</sup>	345	337	344	346	342	328	340	337	332	331	330	333	333	332
Energiatiheys MWh//m <sup>3</sup>	0,9	0,87	0,88	0,86	0,91	0,89	0,92	0,88	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,92
Kuiva-aineen tuhkapitoisuus p-%	4,7	5,1	5,1	5,3	5,5	5,6	5,5	5,5	5,6	5,5	5,7	5,5	5,8	6,1
Kuiva-aineen rikkipitoisuus p-%	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,20	0,22	0,21	0,21	0,23

\*Vuoden 1999 kuukausien touko-joulukuun käyttömäärä perustuu arvioihin ja muut ominaisuustiedot perustuvat tammi-huhtikuun aineistoihin.

Taulukko 59. Palaturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia vuosilta 1985–1992 ja 1994–1999 (vuoden 1993 tietoja ei ole tilastoitu). (Electrowatt-Ekono Oy 1999 b.)

	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1994	1995	1996	1997	1998	1999*
Määrä, GWh	994	1 011	961	611	645	863	718	838	2 175	2 217	1 505	1 570	360	160
Kuiva-aineen teholl. lämpöarvo MJ/kg	21,7	21,2	20,7	21,0	20,3	21,2	21,2	21,8	21,3	20,7	21,2	21,1	21,4	21,0
Keskikosteus p-%	39,9	40,9	42,4	41,1	37,5	37,8	39,4	40,6	40,5	38,1	38,4	37,7	39,4	40,6
Teholl. lämpöarvo saapumistilassa MJ/kg	12,0	11,5	10,9	11,4	11,7	12,3	11,9	11,9	11,7	11,9	12,1	12,3	12,0	11,5
Kuiva-aineen tilavuuspaino kg/m <sup>3</sup>	238	230	227	230	242	237	231	233	231	239	239	242	234	217
Tilavuuspaino saapumistilassa kg/m <sup>3</sup>	397	390	394	391	387	382	381	392	389	386	387	389	387	365
Energiatehys MWh/m <sup>3</sup>	1,33	1,25	1,19	1,23	1,26	1,30	1,26	1,30	1,26	1,27	1,30	1,32	1,29	1,16
Kuiva-aineen tuhkapitoisuus p-%	5,6	5,3	5,1	5,2	5,0	4,9	4,5	4,6	4,9	4,9	4,5	5,1	3,7	3,2
Kuiva-aineen rikkipitoisuus p-%	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21

\* Vuoden 1999 kuukausien touko-joulukuun käyttömäärä perustuu arvioihin ja muut ominaisuustiedot perustuvat tammi-huhtikuun aineistoihin.

Jyrsin- ja palaturpeen käsittelytekniisiä ominaisuuksia on esitetty taulukoissa 52–56.

Taulukko 60. Jyrsinturpeen (turve on seulomatonta) liukumiskulma ja kitkakerroin (Rautalin et al. 1986).

Alusta	Liukumiskulma, °	Hajonta, °	Kitkakerroin	Hajonta
Teräslevy, Fe 37, kirkas	34,90	1,60	0,70	0,03
Maalattu levy, "Miranol"	38,10	1,26	0,78	0,02
Vesivaneri	33,20	0,59	0,65	0,01
Maalattu levy, "Inerta 51 HB"	34,20	1,16	0,68	0,02
Maalattu levy, "Inerta 160"	35,74	1,69	0,72	0,03
Lasilevy	35,36	0,94	0,71	0,02
Akryylilevy	35,60	0,67	0,72	0,01



Taulukko 61. Jyrsinturpeen kosteuden vaikutus juoksevuuuteen (Rautalin et al. 1986, Thun & Rautalin 1980).

Konsolidaatiopaine	Kosteus, %	Puristuslujuus vapaalla pinnalla kPa	Maksimijännitys kPa	Koheesio kPa	Sisäinen kitkakulma °	Tehollinen kitkakulma °	Juoksevuusfunktion arvo yhdellä konsolidaatiolla
7,59 kPa	0	8,90	24,36	1,90	41,8	51,0	2,74
	10	10,35	27,77	22,0	44,3	53,5	2,68
	25	11,19	25,77	2,46	44,1	55,7	3,20
	50	11,23	20,98	2,68	40,3	51,4	1,87
10,35 kPa	0	9,44	27,75	1,70	44,8	51,0	2,93
	10	8,25	34,23	1,64	46,6	52,1	4,15
	25	12,38	31,52	2,50	45,6	43,4	2,55
	50	15,44	33,07	3,12	43,1	37,5	2,14
13,11 kPa	0	12,23	35,57	2,74	41,6	49,8	2,91
	10	14,56	44,80	2,97	45,6	52,9	3,07
	25	15,86	40,63	3,24	45,6	54,0	2,56
	50	15,44	33,07	3,43	42,1	53,8	2,14
15,87 kPa	0	13,84	44,90	3,06	42,3	49,2	3,24
	10	17,98	52,99	3,65	45,8	53,4	2,95
	25	18,25	46,73	3,75	45,4	54,2	2,56
	50	18,42	41,27	4,04	42,7	53,4	2,29
18,63 kPa	0	15,12	51,43	3,3	42,8	49,4	3,40
	10	19,64	59,81	4,2	43,6	51,0	3,04
	25	20,98	55,39	4,4	44,2	52,8	2,64
	50	19,57	46,32	4,4	41,6	52,1	2,37

Taulukko 62. Jyrsinturpeen asettumis- ja virtauskulma (Rautalin et al. 1986).

Fraktio, mm	Asettumiskulma, °	Epäsyyntisyys, °	Virtauskulma, °
seulomaton	47,8	0,8	-5,9
seulomaton	48,8	2,4	-5,9
0,5	41,8	0,6	85,6
0,5	45,5	1,6	85,6
0,5–1,0	41,8	1,3	58,9
0,5–1,0	40,8	1,7	58,7
1,0–3,15	35,4	1,9	76,7
1,0–3,15	35,9	1,6	73,7
0,18–1,89	47,0	1,7	63,7
0,18–1,89	49,0	2,7	63,9

Taulukko 63. Jyrsinturpeen ja eri pintamateriaalien välinen kitkakerroin (Rautalin et al. 1986).

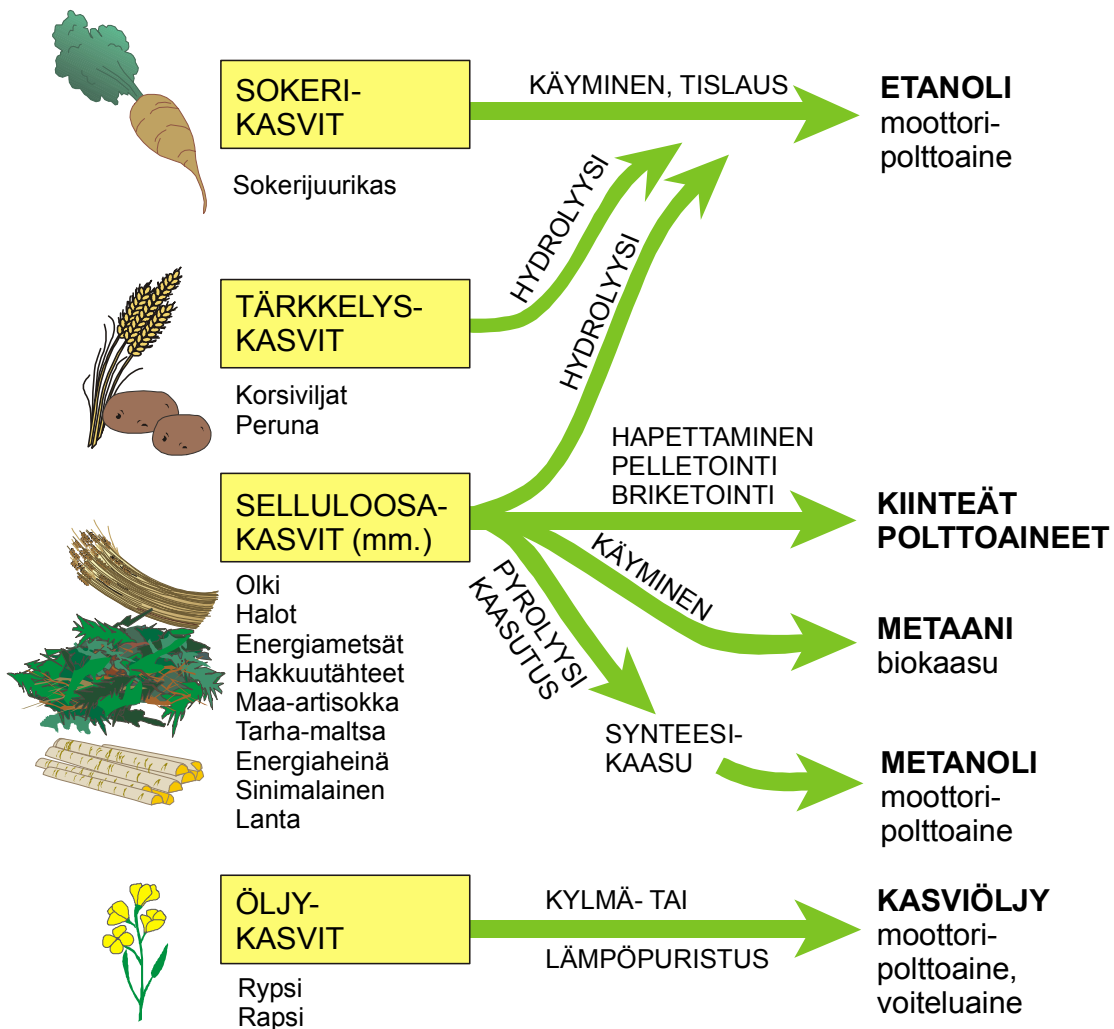
Partikkeli koko (mm)	Kosteus (%)	Kitkakerroin				
		filmivaneri	teraslevy	kovalevy	akryyllilevy	lasikuitu
seulomaton	21	0,37	0,45	0,43	0,43	0,37
seulomaton	30	0,58	0,74	0,66	0,64	0,61
seulomaton	40	0,57	0,74	0,66	0,56	0,74
seulomaton	55	0,65	0,76	0,72	0,50	0,55
seulomaton	67	0,49	0,61	0,68	0,48	0,51
0,1–0,5	30		0,67			0,57
0,5–1,0	30		0,77			0,64
1,0–3,15	30		0,80			0,67
3,15–10	30		0,77			0,54

Taulukko 64. Palaturvetuotteiden asettumiskulma (Rautalin et al. 1986).

Materiaali	Palakoko, mm	Asettumiskulma, °	Epäsymmetrisyys, °
Palaturve	Ø 60	23,9	4,2
	pituus: 30–170	26,2	7,1
		26,1	6,7
		26,0	1,4
Keskiarvo		25,5	
Keskihajonta		1,0	
Palaturve	Ø 30	42,5	7,4
(pieni)	pituus: 20–175	37,2	4,8
	joukossa murskaa	39,5	13,5
	~13,3 p-%	37,7	6,1
	~17,5 til.-%		
Keskiarvo		39,2	
Keskihajonta		2,1	
Palaturve	Ø 30	38,5	14,2
(pieni)	pituus: 20–175	37,7	8,8
	murskaantunut osa	32,2	5,3
	seulottu pois	32,9	3,5
Keskiarvo		35,3	
Keskihajonta		2,8	

## 6. Peltobiomassat

Suomessa energiakasvien viljely on eräs vaihtoehto lähivuosina maassamme elintarviketuotannosta vapautuvan peltoalan ja turvetuotannosta poistetun suoalan käyttämiseen ns. Non food -tuotantoon. Peltokasvit ovat monipuolisia energian raaka-ainelähteitä (kuva 17). Dieselöljyä korvaavia kasviöljyperäisiä polttoaineita saadaan esim. auringonkukan, rapsin, rypsin, hampun ja soijan siemenistä (kohta 10.2). Alkoholiperäisiä polttoaineita joko sellaisenaan tai bensiinin osakomponenttina käytettäväksi saadaan sokeria tuottavista kasveista tai tärkkelyspitoisista viljoista, kuten sokeriru'osta, sokerijuurikkaasta, perunasta, maissista tai korsiviljoista (kohta 10.2). Kiinteässä muodossa poltettavaksi soveltuvat esim. olki, jyvät, energiaheinä ja bioenergiatuotannon sivutuotteina saatavat sokeriru'on puristejäte eli bagasse ja rapsikakku (Sankari 1994, Sankari 1995).



Kuva 17. Energian tuottamiseen soveltuvat biomassaperäiset raaka-aineet, niiden jalostusmenetelmät ja energian käyttömuodot.

## 6.1 Viljakasvit ja olki

*Viljan* (ohra, vehnä, ruis ja kaura) *olki ja jyvät* sopivat kiinteänä polttoaineena käytettäväksi. Jyvillä ja oljella on erilaiset palamisominaisuudet, joten olkea ja jyviä käytetään erikseen. Maatilojen lisäksi oljen käyttökohteita ovat maaseudun taajamien lämpökeskukset ja myös pientalot. Polttamiseen tarvitaan olkea varten suunniteltu kattila. Koska eri viljalajien oljen tuhkan sulamislämpötilat vaihtelevat huomattavasti, olkikattilan arinan pitäisi toimia niin sulalla kuin sulamattomalla tuhalla ja tuhkanpoistolaitteen pitää pystyä käsittelemään sekä sulamisen jälkeen uudelleen jähmettynyttä että sulamatta jäänyttä. Suomessa oljen hyödyntäminen on vähäistä noin 6 000 tonnia vuodessa (Ahokas et al. 1983, Sankari 1994).

Oljen hyväksikäytön suurin ongelma on sen tilavuus (irto-oljen tilavuus on 30–40 kg/i-m<sup>3</sup>), mikä hankaloittaa varastointia ja tekee kuljetuksen kalliiksi. Olkea käytetään polttoaineena suurpaaleina, kovapaaleina, silppuna, jauhattuna ja puristeina. Olki ja puu ovat muutamilta ominaisuuksiltaan samanlaisia polttoaineita. Niiden alkuainesisältö (elementaarianalyysi) ja tehollinen lämpöarvo ovat hyvin samankaltaiset. Molemmat sisältävät paljon haihtuvia aineita ja palavat tästä syystä pitkällä valaisevalla liekillä ja vaativat palotilakseen laajan tulipesän. Oljen pieni energiatiheys ja suuri tuhkapitoisuus tekevät siitä kuitenkin puuta ja muita kiinteitä polttoaineita ongelmallisemmän polttoaineen. (Ahokas et al. 1983, Sankari 1994).

Viljanjyvillä on lähes sama lämpöarvo kuiva-ainekiloa kohti kuin polttopuulla tai oljella. Jyvistä nimenomaa kauranjyvät palavat oljen tapaan, koska niissä on paljon kuorta. Jyvä voidaan polttaa sellaisenaan tai jauhattuna. Ohran jyvän tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa on 4,5 MWh/tonni (16,2 MJ/kg) tai 2,41 MWh/m<sup>3</sup>. Tiheys on 536 kg/m<sup>3</sup>. (Tuunanen 1993) (taulukko 65).

Oljen puintikosteus on 30–60 % ja polttokosteus yleensä alle 20 %. Olki kuivuu varastoinnin aikana 2–6 prosenttiyksikköä, joten polttotarkoituksiin kerättävän oljen kosteus saa olla korjuuhetkellä enintään 25 %. Jos olki joudutaan korjaamaan yli 30 %:n kosteudessa, se on kuivattava koneellisesti, jotta poltto onnistuisi (Ahokas et al. 1983).

*Taulukko 65. Erilaisten olkien tuhkapitoisuus ja lämpöarvo (Puuronen et al. 1984, Tuunanen 1994, Taipale 1996).*

Ominaisuus	Ruis	Vehnä	Ohra	Kaura	Viljan olki yleisesti
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa p-%	4,5	6,5	4,5–5,88	4,9	5
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	17,0	17,8	17,4	16,7	17,4
Tehollinen lämpöarvo 20% käyttökosteudessa, MJ/kg	13,6	13,8	13,4	12,9	13,5

Tehollinen lämpöarvo 20 %:n kosteudessa on noin 13,5 MJ/kg (taulukko 65). Oljen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 16,7–17,8 MJ/kg ja keskimääräinen kuiva-aineen lämpöarvo on 17,4 MJ/kg (taulukko 64). Oljen tuhkan ominaisuudet vaihtelevat suuresti viljalajin, kasvupaikan ja lannoituksen mukaan. Kauran oljen lämpöarvo on alhaisin ja sulamisominaisuudet huonommat (sintraantuva). Kauran olki on lisäksi sitkeä. Viljan olki sisältää tuhkaa 4–7 % kuiva-aineessa. Vehnän oljessa on eniten tuhkaa. Tuhkan suuri SiO<sub>2</sub>-pitoisuus nostaa sen sulamislämpötiloja, joten poltossa ei aiheudu ongelmia. Haihtuvien aineiden pitoisuus on 60–70 %. Viljan olkien ominaisuuksia on esitelty taulukoissa 65–70 (Ståhlberg et al. 1985, Puuronen et al. 1994, Ahokas 1983, Sankari 1994, 1995).

Kemialliseen koostumukseen vaikuttavat eri kasvilajien lisäksi kasvin ikä ja viljelyolosuhteet (sääolot, maaperä ja lannoitus). Myös kasvin osien kemiallinen koostumus voi olla erilainen. Sadonkorjuun ajankohta vaikuttaa myös biomassan koostumukseen. Hiili-, vety-, ja typpipitoisuudet pysyvät kutakuinkin muuttumattomina. Oljen kloori- ja alkalipitoisuudet laskevat, jos sen annetaan olla pellolla sateen huuhtottavana. Aikaisin korjatun oljen (keltainen olki) klooripitoisuus on lähes nelinkertainen myöhään korjattuun olkeen (harmaa olki) verrattuna (Sankari 1994, Huusela-Veistola et al. 1991, Tuunanen 1994).

Oljen tuhkan kalsium-, magnesium- ja kaliumpitoisuudet ovat korkeat. Poltettaessa olkea esim. turpeen kanssa saadaan poltossa syntyvä rikki sitoutumaan tuhkaan juuri oljen korkeiden kalsium-, magnesium- ja kaliumpitoisuuksien ansiosta (Puuronen et al. 1994).

*Taulukko 66. Viljan olkien tuhkan koostumus p-% kuiva-aineessa (Taipale 1996).*

Aine	Olki yleisesti	Olki yleisesti	Vehnä	Ruis	Ohra	Kaura
p-%	Tuhkautus 815 °C	Tuhkautus 550 °C				
	Vaihteluväli / Keskiarvo	Vaihteluväli / keskiarvo				
SiO <sub>2</sub>	18–61 / 43	21–79 / 52	78,2 / 68,4	61,7	44,7	37,3
K <sub>2</sub> O	6,8–38 / 25,8	11,0–24 / 18	6,6 / 13,2	19,2	37,1	40,3
CaO	4,4–13 / 7,7	4,7–14,4 / 8,6	5,0 / 4,3	7,4	9,3	12,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,0–7,5 / 3,8	1,5–3,5 / 2,5	3,3 / 2,0	3,7	3,8	4,1
MgO	1,5–4,7 / 3	1,3–3,8 / 2,7	3,6 / 2,0	2,8	2,5	3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,32–3,8 / 1,5	0,13–3,5 / 0,7	2,0 / 0,85	2,1	0,4	0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,4–6,8 / 3,3	<0,1–1,9 / 0,5	1,5 / 0,45	1,5	0,5	0,5
SO <sub>3</sub>	1,8–5,4 / 3,7	/ 3*	1,4 / 0,90	1,3	1,4	1,4
Na <sub>2</sub> O	0,31–9,9 / 3	0,2–10,4 / 2,1	0,3 / 0,25	0,3	0,3	0,3
TiO <sub>2</sub>			/ 0,04			

\* laskennallinen arvo

Taulukko 67. Erilaisten viljan olkien alkuaine- ja metallipitoisuuksia (Taipale 1996).

Alkuaine	Viljan olki			Ohran olki	Vehnän olki
	Yleisesti/keskiarvo	Aikaisin korjattu olki	Myöhään korjattu olki		
ALKUAINEPITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%					
C	45–47 / 46	49	51	45,8 ± 0,7	46,2 ± 0,7
H	5,8–6,0 / 5,9	5,9	6,1	5,7 ± 0,4	5,8 ± 0,3
N	0,4–0,6 / 0,5	0,41	0,48	0,52 ± 0,19	0,59 ± 0,20
O	39–41 / 40	44	45	41,9 ± 1,8	41,3 ± 2,1
S	0,01–0,13 / 0,08	0,19	0,15	0,12 ± 0,04	0,08 ± 0,03
Cl	0,14–0,97 / 0,31	0,88	0,24	0,4 ± 0,4	0,15 ± 0,10
TUHKAA MUODOSTAVIEN ALKUAINEIDEN PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%					
Si	0,6–4,0 / 1,8	0,6	0,6	1,2 ± 0,4	1,8 ± 0,9
Al		0,035	0,04	0,037 ± 0,033	0,023 ± 0,022
Fe		0,12	0,08	0,026 ± 0,023	0,026 ± 0,027
Mg	0,06–0,14 / 0,11	0,06	0,05	0,10 ± 0,03	0,11 ± 0,02
Ca	0,26–0,66 / 0,4	0,3	0,15	0,40 ± 0,09	0,40 ± 0,12
K	0,69–1,3 / 0,99	0,6	0,4	1,1 ± 0,5	0,94 ± 0,25
Na	0,01–0,6 / 0,11	0,07	0,05	0,20 ± 0,17	0,042 ± 0,052
P	0,04–0,10 / 0,07	0,06	0,05	0,092 ± 0,032	0,075 ± 0,020
RASKASMETALLIPITOISUUDET, ppm					
Cd	0,036–0,083	0,01			
Cr	0,044–0,086	0,02			
Cu	2,6–9,2	10	5		
Hg	0,028–0,036	1			
Pb	0,72–0,83	100			
Zn	43–46	0,01	20		

Taulukko 68. Oljen tuhkan sisältämiä metallipitoisuuksia (Kircherer et al. 1994, Taipale 1996).

Aine	Pitoisuus oljen tuhkassa, mg/kg	Aine	Pitoisuus oljen tuhkassa, mg/kg
Sb	<20	Cu	85
As	32	Ni	45
Ba	90	Hg	<5
Pb	45	Se	<30
Cd	3	V	28
Cr	58	Zn	125
Co	<20		

Taulukko 69. Viljan oljen poltossa syntyneen pohja- ja lentotuhkan sisältämien aineiden pitoisuuksia tuhkan kuiva-aineessa (Hansen et al. 1987).

Pohjatuhka				Lentotuhka			
Aine	p-%	Aine	%	Aine	p-%	Aine	%
Si	14.1	Mn	0,0590	Si	6	Mn	0,0832
N	0.27	Zn	0,0073	N	0.1	Zn	0,0620
Si	0.4	Cd	<0,0005	S	2.8	Cd	0,0006
Na	1	Cu	0,0055	Na	1	Cu	0,0336
Mg	0.8	Pb	0,0004	Mg	0.9	Pb	0,0523
P	1.2			P	1.2		
Cl	0.4			Cl	2		
K	10.5			K	16.2		
Ca	7.5			Ca	9.7		

Oljen tuhkan sulaminen tapahtuu vaihteluväliltään laajalla lämpötila-alueella 350–500 °C (taulukko 70). Olkien tuhkat poikkeavat toisistaan SiO<sub>2</sub>-, K<sub>2</sub>O- ja CaO-pitoisuuksien osalta. SiO<sub>2</sub>:lla on sulamislämpötiloja kohottava ja K<sub>2</sub>O:lla ja CaO:lla niitä laskeva vaikutus. Myöhään korjatun oljen sulamispiste on 150 °C korkeampi kuin aikaisin korjatun oljen. Oljen ja hiilen seospoltolla voidaan sulamispistettä nostaa. Sitä voidaan nostaa käyttämällä lisäaineita kuten kaoliinia. Kun käytetään 2 % kaoliinia olkipelleteissä saadaan muodonmuutoslämpötila nousemaan 770 °C:sta 1100 °C:seen (Puuronen et al. 1994, Taipale 1996).

Taulukko 70. Eri viljalajien oljen tuhkan sulamislämpötilat, kun määrittäminen perustuu normimenetelmiin (Ahokas et al. 1983).

Viljalaji	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä		
	Pehmenemispiste A, °C	Puolipallopiste B, °C	Sulapiste C, °C
Vehnä	1050	1350	1400
Ruis	840	1150	1330
Ohra	765	1035	1190
Kaura	735	1045	1175

Varastointiaessa olkea silppuna aumassa talven yli onnistuu varastointi, jos kosteus on 20–24 %. Aumat täytyy tiivistää ja peittää muovilla. VTT:n tutkimuksissa aumoissa ei tapahtunut homehtumista eikä lämpenemistä (Lindh et al. 1998).

Briketointi ja pelletointi kasvattavat polttoaineen tiheyttä ja helpottavat polttoaineen käsittelyä. Olkibriketit valmistetaan valssi- ja mäntä- tai ruuvipuristimilla. Brikettien muoto vaihtelee tyynymäisestä kiekoon tai tankoon. Niiden läpimitta on 12–100 mm

ja kosteus 8–15 %. Olkibrikettien kiintotiheys on 450–1100 kg/m<sup>3</sup> ja varastointitiheys 300–550 kg/m<sup>3</sup> (Peltola 1981, Ahokas et al. 1983).

Olkipelletit tehdään rengas- ja tasomatriisikoneilla. Raaka-aine puristetaan rullien avulla reikälevyn tai rei'itetyn sylinterin läpi. Pellettien läpimitta vaihtelee 3 mm:stä 35 mm:iin; tavallisimmin se on 6–12 mm. Pellettien kiintotiheys on 800–1400 kg/m<sup>3</sup>, irtotiheys 450–750 kg/m<sup>3</sup> ja kosteus 8–15 %. (Peltola 1981, Ahokas et al. 1983).

Silppuaminen ei lisää biomassan tiheyttä, ellei silpun pituus ole riittävän pieni. Biomassan jauhaminen nostaa puolestaan esim. oljen tiheyttä noin 220–240 kg/ m<sup>3</sup>:iin (vertaa ruokohelpin taulukko 78).

## 6.2 Öljy- ja kuitukasvit

Öljykasveista rypsi ja rapsi sekä öljy- ja kuitukasvina käytetty pellava soveltuvat tutkimusten mukaan myös käytettäväksi myös kiinteänä polttoaineena.

*Rypsi* (*Brassica rapa* var. *oleifera*) ja *rapsi* (*Brassica napus* var. *napus* tai *oleifera*) ovat kaalin sukuun kuuluvia hoikkajuurisia ristikkaiskasveja. Rypsin siementen öljypitoisuus on 30–40 % ja rapsin 35–45 % (Taipale 1996).

*Pellava* (*Linum untatissimum*) on vanha kuitukasvi. Pellavaa on kahta muotoa kuitu- ja öljypellava. Öljypellava on kuitupellavaa lyhytvartisempi ja haaraisempi. Pellavan varren kuituosasta erotetut puumaiset päistäreet voidaan esim. puristaa briketiksi ja käyttää kiinteänä polttoaineena. Öljypellavan puinnin yhteydessä peltoon jäävä sitkeä varsikasvi voitaisiin käyttää mahdollisesti myös polttoaineeksi, vaikka onkin todennäköistä, että sen sitkeä varsi aiheuttaa höyrykattiloissa samanlaisia ongelmia kuin olki (Sankari 1994, 1995).

Rypsin ja rapsin olkisadot ovat keskimäärin 1945 kg/ha. 25%:n kosteudessa oljen sisältämä energiamäärä on noin 7 MWh/ha. Myös siemenet samoin kuin kasviöljyn puristuksen yhteydessä syntyvästä rouheesta valmistetut rouhepelletit sopivat sellaisenaan poltettavaksi. Rypsin siementen energiasisältö on 10–13 MWh/ha eli 7,3 MWh/tonni eli 4,43 MWh/m<sup>3</sup> (kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo 23,9 MJ/kg). Rypsin siementen tiheys on 665 kg/m<sup>3</sup> (Tuomi & Kouki 1993, Tuunanen 1994) (taulukot 71 ja 72).



Taulukko 71. Eri öljykasvien ominaisuuksia (Tuunanen 1993).

Kasvi	Lämpöarvo, MJ/kg	Tuhka,%	Hiili, %	Vety, %	Happi,%	Rikki,%	Typpi,%	Kloori,%
Öljykasvin olki			46,0	5,7	39,0	0,17	0,8	0,22
Sinimailanen	17,4	7,3	46,8	5,4	40,7	0,02	1,0	0,03
Rypsi,siemen	26,4	4,6	58,6	8,5			3,7	0,5

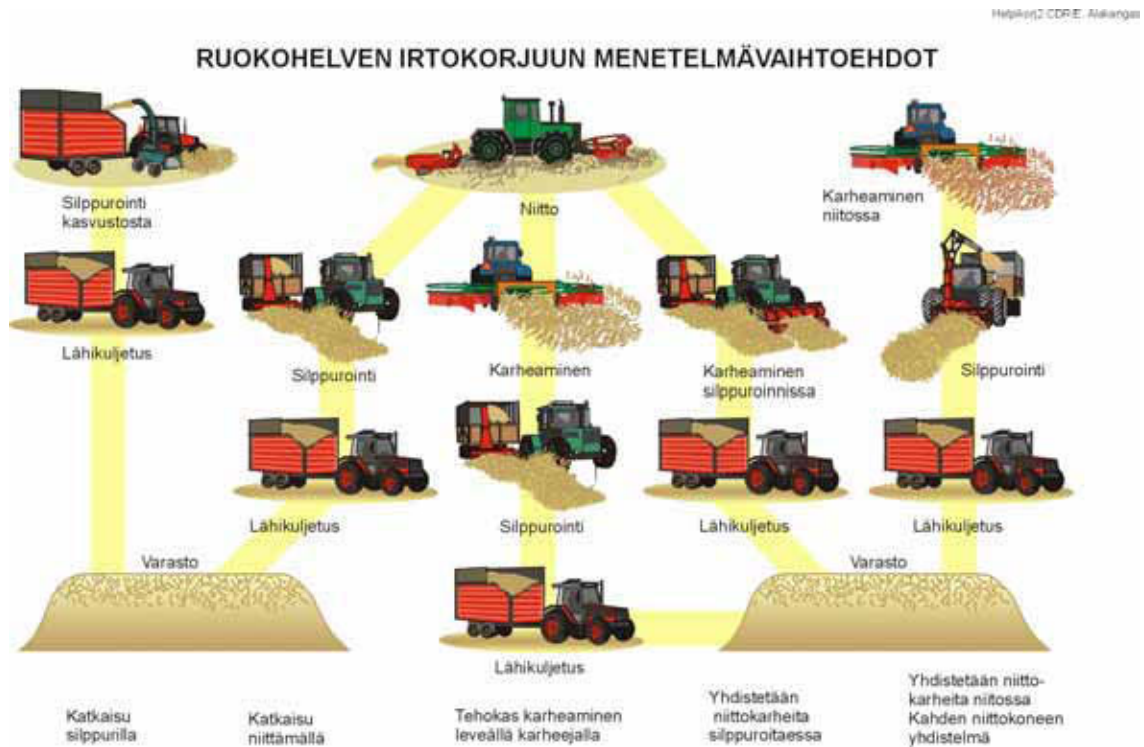
Taulukko 72. Rypsin, rapsin ja pellavan polttoaineominaisuuksia ja alkuainepitoisuuksia (Taipale 1996).

Puupolttoaineominaisuus/ alkuaine	Rypsin olki	Rypsin siemen	Rapsin olki	Pellavan olki, kokonainen	Pellavapäästäre
Haihtuvat aineet k.a., p-%	79,2		74,4	78,8	78,6 63–67
Tuhkapitoisuus k.a., p-%	2,4–2,86	4,6	9,6 (6,7–14)	2,93	1,81–2,1
Kiinteä hiili k.a., p-%	17,94			18,27	19,59
Kalorim. lämpöarvo k.a., MJ/kg	19,33		18,2 ± 0,5	20,04	20,19
Teholl. lämpöarvo k.a., MJ/kg	18,04–18,9	26,4		18,71	18,86–21,1
Alkuainepitoisuus kuiva-aineessa, p-%					
C	46- 48,1	58,6	46,2 ± 0,9	49,1	50,3
H	5,7–5,9	8,5	5,7 ± 0,2	6,10	6,10
N	0,8	3,7	0,76 ± 0,12	1,30	0,60
O	39–42,13		38,8 ± 0,7	40,45	41,12
S	0,17–0,21		0,17 ± 0,04	0,12	0,07
Cl	0,22–0,10	0,5	0,22 ± 0,06	0,06	0,04
Tuhkaa muodostavat alkuaineet k.a.:ssa, p-%					
Na	0,017		0,14 ± 0,06	0,013	0,009
K	0,58		1,0 ± 0,3	0,51	0,34
Mg			0,10 ± 0,03		
Si			2,1 ± 2,2		
P			0,085 ± 0,017		
Ca			1,3 ± 0,2		
Fe			0,16 ± 0,16		
Al			0,22 ± 0,20		

### 6.3 Ruokohelpi ja järviruoko

*Ruokohelpi* (*Phalaris arundinacea* L.) on Suomessa luonnonvaraisena kasvava monivuotinen heinäkasvi, jolla on korkea biomassasato. Ruokohelpeä voidaan käyttää myös raaka-aineena paperin valmistuksessa. Sitä voidaan käyttää myös valumavesien suodattamiseen ja haihduttamiseen sekä eläinten rehuna. Ruokohelven luontaisia kasvupaikkoja ovat meren ja järvien rannat, ojat ja tienpientareet. Luonnossa se esiintyy noin 1 m<sup>2</sup>:n kokoisina tai suurempina kasvustoina ja se leviää tehokkaasti. Viljeltyjen,

lupaavimpien uusien lajikkeiden sato on ollut yli 10 tonnia kuiva-ainetta/ha. Ruokohelpiä viljellään noin 1000 hehtaarin alalla ja sitä on kokeiltu seospolttoaineena yleensä turpeen kanssa. Kuvassa 18 on esitetty ruokohelven eri tuotantomenetelmiä (Taipale 1996, Lindh 1995).



Kuva 18. Ruokohelven tuotantomenetelmien vaihtoehtoja.

Ruokohelven polttoaineominaisuuksiin vaikuttavat kasvilajike, kasvupaikka ja -alusta, lannoitus ja korjuuajankohta (taulukot 73 ja 74).

Ruokohelven hiilipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin turpeella. Syyskorjatun ruokohelven rikkipitoisuus (0,19 %) on korkeampi kuin kevätkorjatulla (0,13 %). Kevätkorjatun ruokohelven typpipitoisuus on pienempi kuin syyskorjatun. Raskasmetallipitoisuudet ovat suuremmat kevätkorjatulla ruokohelpillä, sitä vastoin kuparipitoisuus oli suurinpiirtein samaa luokkaa kummallakin. Syyskorjatun ruokohelmin klooripitoisuus voi olla jopa 8-kertainen kevätkorjattuun verrattuna. Syyskorjatun ruokohelmin pehmenemispiste (820 °C) on hyvin alhainen verrattuna kevätkorjatun vastaavaan arvoon (1125 °C). Kevätkorjatun ruokohelmin tuhkan pehmeneminen alkaa turpeen vastaavaa lämpötilaa korkeammassa lämpötilassa (taulukot 75–76) (Flyktman 1998).

Ruokohelven lämpöarvo on suhteellisen hyvä (tehollinen lämpöarvo on hieman yli 17 MJ/kg). Keväällä korjatun ruokohelven kosteus on 10–15 %, joten kasvin tehollinen

lämpöarvo saapumistilassa saattaa olla korkeampi kuin turpeella ja puulla. Keväällä korjatun ruokohelven polttoaineominaisuudet ovat yleisesti katsottuna paremmat kuin syksyllä korjatun (Lindh 1995).

*Taulukko 73. Ruokohelpi verrattuna muihin biopolttoaineisiin, tyypillisiä polttoainetietoja (Lindh 1995).*

Analyysiparametrit	Ruokohelpi (Kevätkorjattu)	Ruokohelpi (Syyskorjattu)	Vehnän olki	Puupolttoaine	Palaturve
Tehollinen lämpöarvo k.a., MJ/kg	17,6	17,9	17,4	19,2	21,5
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	14,6	14,8	14,4	8,5	12
Kosteus, %	14	15	15	50	40
Haihtuvat aineet, %	74	72	73	80	70
Tuhkapitoisuus, %	5,5	6,5	7	1,5	4
Hilii, C, %	46	46	46	50	55
Vety, H, %	5,5	5,7	5,5	6	5,6
Typpi, N, %	0,9	1,3	0,5	0,3	1,5
Happi, O, %					
Rikki, S, %	0,1	0,17	0,15	0,05	0,25
Kloori, Cl, %	0,09	0,5	0,5	0,02	0,05
Kalium, K, %	0,2	0,8	0,8	0,2	0,05
Kalsium, Ca, %	0,2	0,4	0,4	0,3	0,5
Magnesium, Mg, %	0,05	0,2	0,1	0,05	0,05
Natrium, Na, %	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01
Pii, Si, %	1,8	1,2	1,8	0,4	0,8
Tuhkan sulamispiste, °C	1404	1075	930	1150	1100
Arseeni, As, mg/kg kuiva-aineesta	0,2	0,1		0,1	2
Elohopea, Hg, mg/kg kuiva-aineesta	0,03	0,03	0,03	0,02	0,09
Kadmium, Cd, mg/kg kuiva-aineesta	0,06	0,04	0,05	0,1	0,1
Lyijy, Pb, mg/kg kuiva-aineesta	2	1	1	4	5

Taulukko 74. Ruokohelven ja timotein VTT Energian analyysitulokset (Lindh 1995).

Analyysi-parametri	Ruokohelpi Syksy -94	Ruokohelpi Syksy -94	Ruokohelpi Syksy -94	Ruokohelpi Syksy -94	Ruokohelpi Syksy -94	Ruokohelpi Kevät -94	Ruokohelpi Kevät -94	Timotei Heinäk. -94	Ruokohelpi Syksy -94	Ruokohelpi Syksy -94
Kasvualusta	Savi	Savi	Savi	Savi	Multamaa	Savi	Savi	Savi	Kivenn.maa	Turvesuo
N-lann.taso, kg/ha	0	50	100	150	110	100	200	60	80	110
Haittavat aineet, %	71.5	72.1	72.5	72.8	75.2	76.4	76.4	74	76.1	77.9
Kalorimetrinen lämpöarvo k.a., MJ/kg	17.95	18.11	18,34	18,44	18,95	18,38	18,74	18,48	18,64	18,86
Teholl. lämpöarvo k.a., MJ/kg	16,74	16,89	17,10	17,21	17,66	13,17	17,469	17,20	17,36	17,55
Tuhkapitoisuus, %	8,71	7,84	7,11	6,64	5,15	7,52	6,24	4,68	4,3	2,44
Hiili, C, %	44,6	44,9	45,5	45,7	46,7	45,5	46,1	45,5	46,2	46,7
Vety, H, %	5,55	5,62	5,69	5,64	5,9	5,73	5,82	5,84	5,89	5,99
Typpi, N, %	0,81	0,82	1,09	1,2	1,43	0,65	1,04	1,2	0,74	0,7
Happi, O, %	40,11	40,6	40,41	40,57	40,61	40,52	40,67	42,69	42,75	44,11
Rikki, S, %	0,22	0,22	0,21	0,25	0,21	0,08	0,13	0,09	0,12	0,06
Kloori, Cl, %			0,4			0,09				
Natrium, Na, %	0,004	0,0007	0,0023	0,002	0,001	0,004	0,008	0,03	0,002	0,004
Kalium, K, %										
Raskasmetallit mg/kg kuiva-ainetta										
Elohopea, Hg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Arseeni, As	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,6	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Kadmium, Cd	<0,03	<0,03	0,25	0,035	0,03	0,03	0,04	0,03	<0,03	0,4
Lyijy, Pb	0,65	<0,5	0,5	0,5	0,8	1,6	1,25	0,6	0,5	0,6

Taulukko 75. Ruokohelpinäytteen tuhkan koostumus (Moilanen et al. 1996, Taipale 1996).

Näyte	Tuhkan koostumus kuiva-aineessa, p-%									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Ruokohelpi	89,8	1,4	1,2	3,5	1,5	3,2	0,15	0,1	1,1	4,1

Ruokohelpeä ja järviruokoa on kokeiltu seospolttoaineena turpeen joukossa, Korjuuajankohta vaikuttaa polton kannalta olennaisesti kuten tuhkan sulamiskäyttäytymiseen ja polttoaineen klooripitoisuuteen. Syyskorjatun ruokohelven ominaisuudet ovat näiden tekijöiden kannalta heikommät kuin kevätkorjatun. Syyskorjatulla ruokohelvellä on mitattu pienemmät rikkipäästöt. Syyskorjatussa ruokohelvässä on enemmän kaliumia kuin keväällä korjatussa. Kalium vaikuttaa tuhkan sulamiskäyttäytymiseen alentamalla tuhkan pehmenemispistettä (taulukko 75) (Lindh 1995, Flyktman 1998).

Ruokohelpi on kevyempää kuin turve ja puupohjaiset polttoaineet ja tiheys on n. 90 kg/i-m<sup>3</sup> (69 kg<sub>k.a.</sub>/i-m<sup>3</sup>). Seospoltossa tämä seikka vähentää kattilasta saatavaa tehoa, koska käsittelylaitteita ei ole suunniteltu kevyiden polttoaineiden kuljettamiseen. Kokeilujen perusteella on voitu todeta, että käytettävän seoksen tasaisuus vaikuttaa laitoksen käytettävyyteen. Toinen merkittävä tekijä on ruokohelpisilpun pituus (pienempi alle 4 cm silppu on parempi). Kevätkorjattu ruokohelpi soveltuu käytettäväksi seospolttoon hyvin siinä tapauksessa, että kattilaa ei tarvitse kuormittaa täydellä teholla. Ruokohelpin energiaosuus ei käytännössä ilman muutoksia laitosten käsittelylaitteissa voi ylittää 10 % (Flyktman 1998) (taulukot 76–77).

*Taulukko 76. Turve-ruokohelpiseoksen tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Flyktman 1998).*

Näyte	tuhkautuslämpötila	turve	ruokohelpi	ruokohelpin osuus	pehmenemispiste	puolipallopiste	sulapiste
1	815	90 %	kevät	10 %	1080	1205	1300
2	815	70 %	kevät	30 %	1080	1350	1415
3	550	50 %	kevät	50 %	1080	1510	1550
4	815	90 %	syys	10 %	940	1240	1285
5	815	70 %	syys	30 %	915	1290	1380
6	550	0	syys	100 %	820	1190	1400
7	815	100 %	turve		1060	1155	1270
8	550	0	kevät	100 %	1125	1555	1590

*Taulukko 77. Turve-ruokohelpiseoksen tuhkanäytteiden raskasmetallianalyysit (Flyktman 1998).*

Koe	1	2	perus
Raskasmetallit	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Arseni	1,0	2,7	0,47
Kadmium	9,3	9,7	11,7
Kromi	2,2	3,2	0,38
Lyijy	61,0	63,0	58,4
Kupari	80,0	77,0	93,4
Nikkeli	55,0	36,0	31,3
Sinkki	1140	1510	2060
Kloori	121	284	462
Palamiskelpoinen ainesosa, %	13,3	18,1	19,8

1 = Ruokohelpi-turveseos (1:5, ruokohelpin osuus energiasta 12 %), 2 = Ruokohelpi-turveseos (1:8, ruokohelpin osuus energiasta 7 %).

Silpun koko osa < 4 cm ja osa > 4 cm

Perus = sahausjäte ja kuori

Ruokohelpisilpun aumavarastointia on selvitetty ja kostea syyskorjattu (kosteus 24–33 %) säilyi huonosti, varasto kuumeni ja ”paloi” itsekseen. Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineesta laski (14,3 MJ/kg) kuin se yleensä ruokohelpillä on yli 17

MJ/kg. Kevätkorjattu kuiva (alle 10 %) säilyi paremmin, ja kosteus kohosi noin 24 %:iin, mutta varastoauomojen lämpötilat eivät nousseet (Lindh et al. 1998).

Ruokohelpi on kevyttä kuten olki (taulukko 78) ja irtotiheyttä voidaan kohottaa tiivistämällä. VTT:llä tehdyissä kokeissa irtotiheyden maksimi arvoksi saatiin 218 kg/i-m<sup>3</sup> (164 kg<sub>k.a.</sub>/i-m<sup>3</sup>), kun se ennen koetta oli 91,5 kg/i-m<sup>3</sup> (69 kg<sub>k.a.</sub>/i-m<sup>3</sup>).

*Taulukko 78. Ruokohelven korjuukokeissa erilaisilla silppureilla tuotettujen silppujen silpunpituudet ja irtotiheydet (Lindh et al. 1998).*

Silppuri	Tarkkuussilppuri Nokka 2000	Tarkkuus-silppuri JF-850 *	Kaksoissilppuri Elho-Super Luoko	Itseniittävä silppuri Hietaranta	Tarkkuussilppuri JF-900*	Maissin korjuukone Kemper	
Silpun pituus							
yli 4 cm, %	49,2	10,6	44,4	53,6	61,7	6,3	16,2
alle 4 cm, %	50,8	89,4	55,6	46,5	38,3	93,7	83,8
Irtotiheys							
kg <sub>k.a.</sub> /m <sup>3</sup>	59–61	59–61	50	50	50	93,7	83,8
Paikka	Jokioinen	Alavus	Alavus	Alavus	Alavus	Liminka	Liminka

\* Asetus 15 mm

*Järviruoko* (*Phragmites australis*) on kookkain luonnonkasvi Suomessa. Se kasvaa hyvinkin kolmen metrin mittaiseksi, mutta puolet sen pituudesta on veden alla. Juurakko on pitkä, paksu, haaroja ja monivuotinen. Lehdet saattavat olla jopa 2 cm leveät. Ruoko leviää pääasiassa juurakoista. Järviruoko viihtyy parhaiten runsasravinteisissa vesistöissä. Se korvaa myös soilla ja vesijättömailla. Järviruon vuosituotos on 5–12 tonnia/ha. Talvella korjatun ruon kosteus on alle 20 %, jolloin järviruoko on varastointikelpoista. Järviruon tehollinen lämpöarvo on keskimäärin 17,5 MJ/kg (Puuronen et al. 1994, Taipale 1996) (taulukko 79).

*Taulukko 79. Keväällä korjatun järviruon tuhka-analyysi (Puuronen et al. 1994).*

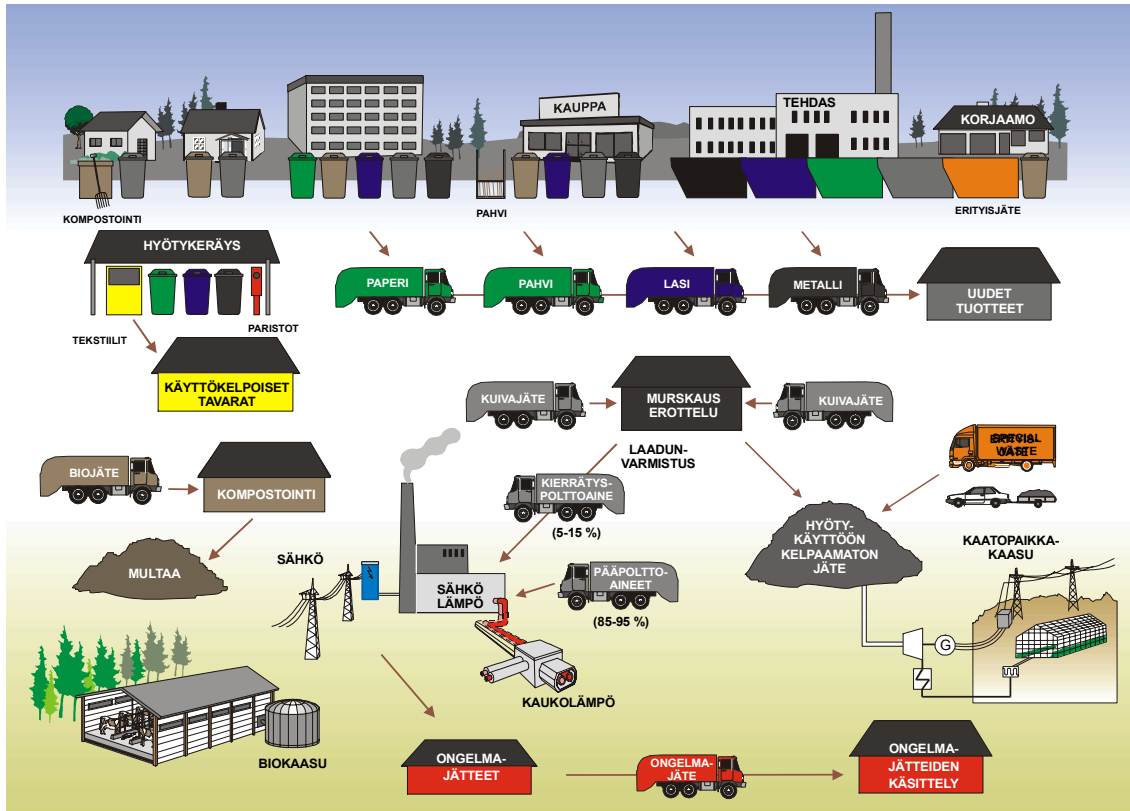
Alkuaine	Järviruon tuhka	Alkuaine	Järviruon tuhka
Alumiini (Al), mg/g	2,4	Kadmium (Cd), µg/g	0,8
Arseeni (As), mg/g	<1	Lyijy (Pb), µg/g	4,1
Kalium (K), mg/g	30	Kromi (Cr) µg/g	165
Kalsium (Ca) mg/g	26	Nikkeli (Ni), µg/g	115
Rauta (Fe), mg/g	5,3	Rikki (S), mg/g	7,4
Natrium (Na), mg/g	14	Hilli (C), p-%	< 0,5
Fosfori (P), mg/g	21	Vety (H), p-%	< 0,5
Magnesium (Mg), mg/g	24	Typpi (N), p-%	< 0,5
Vanadiini (V), mg/g	<0,1		

## 7. Kierrätyspolttoaineet

### 7.1 Jätteiden synty ja kierrätyspolttoaineiden laatuvaatimukset

Valtioneuvoston jättesuunnitelmassa on asetettu vuoteen 2005 tavoitteeksi jätteiden synnyn vähentäminen materiaalihyötykäyttöä kehittämällä ja energiakäyttöä lisäämällä kaatopaikkakuormituksen vähentämiseksi. Jätteitä muodostuu vuosittain noin 65–70 miljoonaa tonnia. Jätteiden kokonaismäärään luetaan tilastollisesti mukaan kaikki alkutuotannon jätemateriaalit lukuun ottamatta metsään jääviä puunkorjuutähteitä. Noin 95 % jätteistä syntyy tuotannollisesta toiminnasta. Suurimmat jätemäärät syntyvät teollisessa toiminnassa ja maataloudessa sekä rakennustoiminnassa. EU:n ja Suomen lainsäädännöt edellyttävät, että syntyvät jätteet ensisijaisesti hyödynnetään ja jos näin ei voida tehdä, voidaan jätteet loppukäsitellä, esimerkiksi sijoittamalla ne kaatopaikoille. Hyödyntämisellä etusijalle asetetaan hyödyntäminen aineena, mutta jos näin ei voida taloudellisista tai ympäristösyistä tehdä, on jätteet hyödynnettävä energiana. Jätehuoltosuunnitelma arvioi, että vuonna 2005 jätteiden kokonaismäärä on 75,6 miljoonaa tonnia ja ilman kaivostoiminnan jätteitä ja maataloudessa hyödynnettävää lantaa 38,6 miljoonaa tonnia. Taulukossa 80 on eritelty eri jätejakeiden määrät.

Kierrätyspolttoaineet voivat olla teollisuuden, yritysten ja yhdyskuntien syntypistelajiteltuja, kuivia ja polttokelpoisia materiaaleja sellaisenaan tai niistä valmistettuja polttoaineita, joilla korvataan olemassa olevien lämpö- ja voimalaitosten tai muiden termisten prosessien kiinteitä polttoaineita. Kuva 19 havainnollistaa, mitkä fraktiot ovat sopivia energiantuotantoon joko kiinteänä polttoaineena tai jalostettuna joko pelleteiksi tai orgaaniset jätteet biokaasuksi (kohta 11.4).



Kuva 19. Jätteiden hyötykäytön ja energiakäytön vaihtoehdot.

Ympäristöministeriö on arvioinut, että Suomessa hyödynnetään jätteitä energiana vuosittain noin 6,5 miljoonaa tonnia. Valtaosa eli yli 6 miljoonaa tonnia siitä hyödynnetään metsäteollisuudessa polttamalla tuotannon omia jättemateriaaleja ja prosessitähteitä kuten puun kuorta, puutähteitä ja erilaisia kuitupitoisia lietteitä. Kierrätyspolttoaineiden tärkeimmät käyttäjät (noin 20 laitosta) ovat teollisuusyrityksien ja yhdyskuntien voimalaitokset, joissa kierrätyspolttoainetta käytetään murskattuna seospolttoaineena 5–30 % polttoaineen käyttömäärästä. Muu jätteen poltto on tähän nähden vähäistä – noin 0,5 miljoonaa tonnia. Materiaalikierrätyksen jälkeen jää energiahyötykäyttöön soveltuvaa polttokelpoista materiaalia noin 1 miljoonaa tonnia vuodessa. Tästä potentiaalista noin 0,4 miljoonaa tonnia on teollisuudessa, 0,3 miljoonaa tonnia rakennustoiminnassa ja noin 0,4 miljoonaa tonnia yhdyskunnissa. Energiakäyttöön soveltuvat helpoimmin teollisuuden ja kaupan pakkaus-, paperi- ja muovijätteet ja rakennusjätteet. Ne muodostavat 70–80 % kaatopaikoille viedystä jätteestä. Yhdyskuntajätteistä soveltuvat metalli- ja lasijätteen erottelun jälkeen termiseen energiatuotantoon parhaiten kuivat jätteet. Märät biojätteet yleensä kompostoidaan tai käytetään biokaasun valmistukseen. Kun tavoitellaan 75 %:n hyötykäyttöä ja 50 %:n materiaalikierrätystä, energiamarkkinoille olisi tulossa vuoteen 2010 mennessä energiamäärältään noin 0,4–0,5 Mtoe/a. KTM:n uusiutuvien energialähteiden edistämishjelmassa tavoitteena on kasvattaa jätteiden energiakäyttö



vuoteen 2005 yhteen miljoonaan tonniin vuodessa, mikä vastaisi energiana 0,5 Mtoe/a eli 5 TWh/a.

Energiantuottajaa kiinnostavat kaikki polttoaineet, joiden polttaminen on virallisesti hyväksyttyä, teknisesti mahdollista ja hallittua, riskeiltään hallinnassa sekä taloudellisesti mielekästä. Kierrätyspolttoaineiden käytön taloudellisina haittapuolina voivat olla polttoaineen vastaanottoon ja käsittelyyn tarvittavat investoinnit, sekä em. polttoaineiden laatuvaihtelusta johtuvat tekniset riskit. Kierrätyspolttoaine ja sen ominaisuudet on siten tunnettava, jotta tehokas ja puhdas polttoprosessi voidaan toteuttaa kattilalaitoksessa vaarantamatta laitoksen toiminnan ympäristövaikutuksiin liittyviä, teknisiä ja/tai taloudellisia edellytyksiä (Juvonen 1998).

*Taulukko 80. Kotitalousjätteen ja yhdyskuntajätehuollon piirin tulevan teollisuus- ja liikejätteen sekä rakennus- ja purkujätteen koostumus (Tanskanen 1996).*

Jätejake	Jätejakeen osuus kertymästä (p-%)		Jätejakeen osuus kertymästä (p-%)	
	Taajama-alue	Haja-asutusalue	Teollisuus- ja liikejäte	Rakennus- ja purkujäte
Keräyspaperi	20	15	16	15 (sis.pahvi)
Pahvi	4	4	18	-
Biojäte	33	40	26	4
Lasi	5	5	5	-
Metalli	5	5	2	5
Muovi	10	5	7	5
Tekstiili	2	2	2	-
Muu palava	16	19	17	6
Muu palamaton	5	5	7	35
Puu			-	30

Kierrätyspolttoaineiden käytön lähtökohtana on niiden käyttö sivupolttoaineena pääpolttoaineen ohessa (seospoltt). Kierrätyspolttoaineita voidaan käyttää pääpolttoaineena silloin, kun laitos on suunniteltu ko. polttoaineille tai laitos muuten siihen teknisesti soveltuu (Juvonen 1998).

Kierrätyspolttoaineiden tuotantoketjun muodostuu energiajakeen syntypaikkalajittelusta, erilliskeräyksestä, kuljetuksesta sekä kierrätyspolttoaineen valmistuksesta, varastoinnista ja toimituksesta käyttäjälle. Kullakin tuotantoketjun osalla on oltava vastuullinen toimija, joka omalta osaltaan vastaa toimintansa teknisistä ja laadullisista ominaisuuksista. Kierrätyspolttoaineiden tuoteselosteessa ilmoitetaan laatuluokka, alkuaineiden ja ominaisuuksien raja-arvot sekä syntypaikalla lajitellun energiajakeen syntypaikat ja eri materiaalisuudet. Kierrätyspolttoaineiden turvallinen käyttö edellyttää vähän haitta-aineita ja epäpuhtauksia, hyvää syntypaikkalajittelua sekä asianmukaista valmistusprosessia. Liitteessä A 2 on esitetty Kierrätyspolttoaineiden standardin SFS 5875

laatuluokat. SFS 5875 standardi ei koske käsittelemättömiä puutähteitä, kuten kuorta, sahanpurua ja metsätähteitä.

Kierrätyspolttoaineiden raaka-aineet ovat peräisin useista eri lähteistä, mistä johtuen niiden laatu vaihtelee (taulukko 80). Kierrätyspolttoaineen laatukriteereistä tärkeimmät ovat

- palakoko,
- kosteus,
- epäpuhtaudet (kuten metalli, lasi) ja tuhkapitoisuus
- kemiallinen koostumus (mm. klooripitoisuus, metallinen alumiini- ja raskasmetallit).

*Palakoko* on kaikissa mursketta (irtojätettä, fluffia) polttavissa laitoksissa osoittautunut ratkaisevaksi tasalaatuisuuden, syötettävyyden ja palamisen hyvyyden kannalta. Kierrätyspolttoaineiden kokeilukäytössä olleen laatuluokituksen ehdotukset palakoolle (nimelliskoko 60 mm ja max. 300 mm) ovat syöttimien kannalta järkeviä, ja sopivaa kuljetustekniikkaa pitäisi olla saatavilla. Tiettyjen fraktioiden, kuten muovin, tekstiilien ja kumin silppuaminen/murskaaminen vaadittuun palakokoon on enemmänkin ongelma käytännön kokemusten perusteella (Hiltunen 1998, Juvonen 1998).

Kierrätyspolttoaineen laatuun vaikuttavat alkuperä ja materiaalipohja. Yleensä kierrätyspolttoaineet koostuvat useista eri jätefraktioista (muovista, puusta, paperista tai pakkauksista, alumiinifolioista jne.). Jos polttoaine sisältää runsaasti muovia, sen kosteus on alhainen ja lämpöarvo on korkeampi suuremman vety- ja hiilipitoisuuden takia. Jos polttoaineessa on puuta, on kosteus suurempi ja lämpöarvo alhaisempi. Jos polttoaine sisältää PVC-muovia, kasvaa seoksen klooripitoisuus.

Toimittaessa korkeissa höyryntulistuslämpötiloissa sähköntuotannon yhteydessä tulee ottaa huomioon polttoaineen *klooripitoisuuden* mahdollisesti aiheuttama kuuma-korroosioriski (kun tulistuslämpötila on yli 480 °C). Kierrätyspolttoaine saattaa sisältää myös muita polttoaineita korkeampia natrium-, kalium- ja alumiinipitoisuuksia, jolloin on huomioitava näistä aiheutuva kattilan likaantumiseriski. Raskasmetallit voivat aiheuttaa ympäristöpäästöjä sekä vaikeuttaa tuhkan hyötykäyttöä. Kierrätyspolttoaineet saattavat myös muuttaa polttoaineseosten tuhkien sulamiskäyttäytymistä (Juvonen 1998, Hiltunen 1998).

Alumiinin määrää lisäävät kotitalouden foliotuotteet sekä rakennusjätteen mukana tuleva alumiini. Polton kannalta haitallista on *metallinen alumiini*. Alumiinin sulamispiste on matala (660 °C) ja siitä huolimatta se hapettuu huonosti. Polttoaineessa oleva alumiini sulaa ja muodostaa ohuen oksidikalvon peittämiä pisaroita, jotka tarttuvat tehokkaasti ensimmäisen kylmempään pintaa, mikä tavallisesti on hila tai tulistinpinta. Polttoaineessa oleva alumiini on eräissä tapauksissa johtanut jopa kattilan tukkeutumiseen. Alumiinilla on myös muita haittavaikutuksia. Lisäksi kierrätyspolttoaineet voivat sisältää lyijyä, jonka yhdisteet ovat voimakkaasti likaavia ja korrodoivia. Suodintuhkien eräiden raskasmetallien pitoisuudet (Cr, Cu, Pb ja Zn) pitoisuudet yleensä hieman nousevat (Hiltunen 1998).

Kierrätyspolttoaineen valmistukseen, varastointiin ja käsittelyyn voi liittyä terveysriski, jonka suuruutta kuvaa työhygieeninen laatu. Työhygieenisen laadun tärkeimmät kriteerit ovat mikrobien määrä ja lajisto, joita määräävät erilaiset ympäristötekijät: kosteus (materiaalikosteus ja suhteellinen ilman kosteus), lämpötila, ravinteet, pH, sekä varastointiaika ja vuodenaika (Juvonen 1998).

*Taulukko 81. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksien vaihtelu. VTT Energian laboratoriomittaukset.*

Ominaisuus	Vaihteluväli, kaikki	REF I (syntypistelajiteltu pakkauksia ja puujätettä sisältävä seos), keskiarvo eri analyyseistä	REF III (syntypistelajiteltu kotitalouden jäte), keskiarvo eri analyyseistä
Kosteus, %	5–30	9,1 irtotavara 3,2 pelletit	28,5 irtotavara 3,2 pelletit
Irtotiheys saapumistilassa, kg/m <sup>3</sup>		180 irtotavara 300 pelletit	210 irtotavara 300 pelletit
Tuhka, % kuiva-aineesta	1–16	5,9	9,5
Haihtuvat aineet kuiva-aineesta, %	70–86		
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	20–40	24,7	22,9
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineesta, MJ/kg	17–37	23,1	21,5
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg		20,8	14,6
Alkuainekoostumus, p-%			
Hiili	48–75	56,0	52,9
Vety	5–9	7,4	7,3
Typpi	0,2–0,9	0,63	0,71
Happi	10–45		
Rikki	0,05–0,20	0,16	0,13
Kloori	0,03–0,7	0,19	0,71
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	Hapettavat/pelkistävät olosuhteet		
Muodonmuutoslämpötila	1150–1220/1100–1200 °C		
Puolipallopiste	1200–1260/1200–1250 °C		
Juoksevuuslämpötila	1210–1265/1220–1270 °C		

## 7.2 Pakkaukset

*Kuitupohjaisiin pakkausmateriaaleihin* kuuluvat sekä pelkästään kuitumaisesta raaka-aineesta valmistetut tuotteet että erilaiset yhdistelmäateriaalit. Kuitupohjaisia pakkauksia ovat mm. erilaiset kartonkipakkaukset, aaltopahvi, paperisäkit, voimapaperi jne. Taulukossa 82–85 on eri paperituotteiden ominaisuuksia.

*Taulukko 82. Kuitumaisten aineiden palamisteknisiä ominaisuuksia (Viinikainen & Aittoja 1990, Vesterinen 1997).*

Aine	Tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa, MJ/kg	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	Kosteus, p-% kuiva-aineesta	Haihtuvat aineet, % kuiva-aineesta	Hilli, % kuiva-aineesta	Tuhka, % kuiva-aineesta
Sanomalehtipaperi	18,5	19,7	6,0	86,3	12,2	1,5
Käärepaperi	16,9	17,9	5,8	89,1	9,8	1,1
Aikakauslehtipaperi	12,2	12,7	4,1	69,2	7,3	23,4
Aaltopahvilaatikat	16,4	17,3	5,2	81,7	12,9	5,3
Muovipintainen paperi	17,1	17,9	4,7	88,4	8,9	2,8
Vahattu kartonki	26,3	27,2	3,5	94,2	4,6	1,2
Elintarvikekartonki	16,9	19,0	6,1	80,5	12,6	6,9
Nestepakkaukset	15,6	21,3	15,7	89,6	49,3	1,73
Nestepakkaukset (sis. alumiinia)	21,8	23,4	6,13	82,8	51,9	9

*Taulukko 83. Jätepaperin ominaisuuksia (Thun & Korhonen 1999).*

Omaisuuudet	Kuiva-aineesta
Kosteus, %	3,9
Tuhkapitoisuus, %	28,2
Haihtuvat aineet, %	64,5
C, %	34,1
H, %	4,4
N, %	0,1
S, %	0,04
Cl, mg/kg	65
Kalorim. lämpöarvo kuiva-aineelle, MJ/kg	12,5
Teholl. lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	11,6
Teholl. lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	11,0

Taulukko 84. Erilaisten pakkausten, muovien ja kuivajätteestä valmistettujen polttoaineiden ominaisuuksia (Manninen et al. 1994, Vesterinen 1997).

Ominaisuus	Ref. 1	PDF LPB 1	PDF LPB 2	PDF MP	PDF PE	PDF PE	PDF PET	PDF Ekor	RDF ASJ	RDF ASJ	RDF ASJ
Terminen osuus, %		13			19		19	26	12	26	
Kosteus, p-%	43,5'	40,3'			39,0'		36,7'	37,2'	41,9'	38,9'	
Haihtuvat, p-%	6,7	61,1			64,2		68,4	61,4	59,6	61,6	
Tuhka, p-%	5,8	6,1	2,8	18	5,8	0,6	4,7	8,5	7,8	9,1	14,5
C, p-%	60,1	59,3			57,7		55,1	53,4	58,9	53,7	
H, p-%	5,5	5,6			6,7		6,1	6,0	5,5	6,0	
N, p-%	1,0	1,1	0,17	0,80	1,6	0,25	1,6	1,6	1,2	1,6	1,13
S, p-%	0,37	0,36	0,02	0,08	0,35	0,01	0,27	0,36	0,37	0,37	0,14
O, p-% (erona)	27,2	27,5			27,7		32,1	29,9	26,1	29,0	
Cl, p-%	0,06	0,07	0,06	0,00013	0,10	0,54	0,11	0,33	0,18	0,29	0,86
Cd, p-%			< 0,0001	0,0026		0,0006					1
Cr, p-%			0,001	0,013		0,001					100
Cu, p-%			< 0,001	0,0020		< 0,001					140
Hg, p-%			< 0,000005	< 0,0001		0,00009					0,12
Pb, p-%			0,003	0,0019		0,002					300
Sn, p-%			< 0,001	0,003		< 0,001					< 10
Zn, p-%			0,0020	0,023		0,015					500
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	23,0	22,7			24,0		22,0	21,6	22,5	21,9	
Tehollinen lämpöarvo, k.a., MJ/kg	21,8	21,5	19,6	31,8	22,6	26,5	20,7	20,3	21,3	20,6	18,6
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg			16,6	19,4		25,7					11,4

\* Kosteuspitoisuus analysoitu märkäpainosta.

Ref 1= turve/kivihilli/puuhakeseos

PDF = pakkauksista saatu polttoaine

LPB= nestepakkauksikartonki, 1 tuotantojäte ja 2 kuluttajilta kerätty

MP = kuluttajilta kerättyä muovien seosta

RDF= jätteestä erotettu polttoaine

ASJ = Ab Avfallsservice Stormossen Jätehuolto Oy:n polttoainetta

Ekor = Palava jäte lajiteltu kotitalouksissa (Ekorosk toimittaja)

PE = polyeteeni, kuluttajilta kerättyä

PET = polyeteenireftalaatti, kuluttajilta kerättyjä juomapulloja

Taulukko 85. Erilaisten pakkauspolttoaineiden ja pääkaupunkiseudulla kerätyn kuivajätteen ominaisuuksia (Vesterinen 1997, Manninen et al. 1984, Manninen 1996).

Ominaisuus	Ref.	LBP	LBP-AI	Stormossen-REF	YTV 1	YTV 2	YTV 3	YTV 4
Kosteus, p-%	32,0	15,7	6,13	38,8	39,7	11,5	41,5'	
Haihtuvat, p-%	68,6	89,6	82,7	75,7	73,7	75,7	57,7	
Tuhka, p-%	3,83	1,73	9,22	13,3	12,6	14,3	8,2	15,8
C, p-%	55,8	49,3	51,3	49,6	45,6	48,7	59,5	
H, p-%	5,62	6,84	7,61	6,92	6,17	6,90	5,4	
N, p-%	5,72	0,04	0,25	0,95	0,99	0,88	1,3	1,19
S, p-%	0,16	0,07	0,08	0,15	0,20	0,2	0,40	0,17
O, p-% (erona)							25,1	
Cl, p-%	0,05	0,05	0,02	0,46	0,32	0,52	0,20	1
Cd, p-%								0,0002
Cr, p-%								0,013
Cu, p-%								0,007
Hg, p-%								0,00019
Pb, p-%								0,026
Sn, p-%								< 0,001
Zn, p-%								0,067
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	22,6	20,3	25,1	20,9	18,6	21,7	22,8	
Tehollinen lämpöarvo, k.a., MJ/kg	21,3	18,9	23,4	19,3	17,4	20,4	21,6	18,6
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg								11,6

\*Kosteuspitoisuus analysoitu märkäpainosta.

Ref = turve

Stormossen-REF = Stormossenin kierrätyspolttoaine

PDF = pakkauksista saatu polttoaine

RDF= jätteestä erotettu polttoaine

LBP=nestepakkauskartonki

LPB-AI=alumiinia sisältävä nestepakkauskartonki

YTV1= YTV:n Nesteen kierrätyspolttoainetta

YTV 2= Maa- ja Vesi Oy:n kokeiden kierrätyspolttoainetta

YTV 3 = YTV:n käsin lajiteltua pakkausjätettä murskattuna

YTV 4= YTV:n käsin erotettua kotitalouden kuivajätettä

Taulukko 86. Pakkausten pohjatuuhkan analyysitulokset (Manninen et al. 1994).

Lisäpolttoaine	PDF PE	PDF PET	PDF Ekor	RDF ASJ
Terminen osuus, %	19	19	26	26
Pääkomponentit	%	%	%	%
C <sup>1)</sup>	0,36	0,26	0,41	0,04
H <sup>1)</sup>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
N <sup>1)</sup>	0,2	0,1	0,2	0,2
S <sup>1)</sup>	0,03	0,02	0,03	0,06
Cl <sup>2)</sup>	0,0007	0,0006	0,0016	0,0015
Al	8,17	7,81	7,53	7,83
Ca <sup>2)</sup>	2,11	2,66	3,61	2,95
Fe	2,93	3,41	3,57	4,30
K	2,01	1,78	1,81	2,01
Mg	0,81	0,87	0,97	0,86
Na	0,66	0,64	1,04	1,27
P	0,18	0,25	0,31	0,23
Si	32,9	32,7	31,6	31,1
Ti	0,40	0,46	0,51	0,47
Hivenaineet	p-%	p-%	p-%	p-%
Ba	0,069	0,081	0,094	0,081
Cr	0,026	0,023	0,027	0,082
Cu	0,146	0,090	0,119	0,447
Mn	0,070	0,078	0,084	0,079
Ni	0,012	0,010	0,010	0,018
Pb	0,016	0,014	0,039	0,050
Sn	0,003	0,003	0,0060	0,006
Zn	0,056	0,059	0,117	0,115

1) Leco-analysaattori

2) kemiallisin menetelmin muut  
röntgenfluorisenssillä

PDF = pakkauksista saatu polttoaine

RDF= jätteestä erotettu polttoaine

ASJ = Ab Avfallsservice Stormossen Jätehuolto Oy  
(polttoaineen toimittaja)

Ekor = polttoaineen toimittaja Ekorosk

PE = polyeteeni

PET = polyeteenitereftalaatti

Suomen jätteistä *muovien* osuus on noin 5–10 % jätteen kokonaismäärästä (painosta) ja jopa 30 % energiamäärästä. Pakkauksia käytetään vuodessa noin 920 000 tonnia, joista puolet on uudelleen käytettäviä. Käytön jälkeen pakkauksien materiaali voidaan hyödyntää joko raaka-aineena uusiin tuotteisiin tai energiana. Muovit luontoon jätettynä hajoavat hitaasti ja ovat esteettinen ongelma. Muovien raaka-aineena käytetään öljyä. Muovi koostuu yhdestä tai useammasta hiilivetypolymeeristä, mahdollisesta lujiteaineesta sekä erilaisista täyte- ja seosaineista. Muovin lämpöarvo on hyvin korkea (20–40 MJ/kg) (taulukko 87).

Yleisimmin käytetty pakkausmuovi on polyeteeni (PE). Lisäksi käytetään polypropeenia (PP), polystyreeniä (PS) ja polyeteenitereftalaattia (PET) merkittäviä määriä. Näiden lisäksi käytetään polyamidia (PA) ja polyvinylikloridia (PVC). Polyeteenin osuus on yli 80 % kotitalouden muovijätteistä. PVC on ongelmallinen muovi myös voimalaitoksien kattiloissa, sisältäähän se klooria. PVC:stä 57 % on lähtöisin ruokasuolasta (NaCl). PVC:tä käytetään Suomessa 52,5 tonnia, josta putket ja putkiyhteet muodostavat 50 %, kalvojen osuus on 5 % ja valmistavatuotteiden tuonti noin 6 %. PVC:tä käytetään hygienia-tuotteissa sekä kiinteiden ja nestemäisten ruokatuotteiden säilytykseen ja pakkaamiseen kuten mineraalivesipulloihin ja pakkauskalvoihin. PVC-muovien osuus on n. 0,6 % kotitalousjätteen kokonaismäärästä (Alakangas 1992, KWH Plast).

Muovien tunnistaminen on vaikeaa, eräänä tunnistamiskeinona käytetään polttokoetta. Polttokokeessa voi muovit tunnistaa mm. savun värin ja hajun perusteella. Polyeteeni sulaa ennen kuin se syttyy, savu on vaaleaa ja haju kynttilän hajua muistuttava. Polystyreenin ja myös polyeteenitereftalaatin palaessa muodostuu tummaa savua. PVC:n haju on pistävä ja savun väri on tummaa. Uusissa muovipakkauksissa on useissa merkintä, mikä helpottaa niiden tunnistamista. Jätteisiin joutuessaan niiden tunnistaminen on vaikeaa.

*Taulukko 87. Eri muovien merkit ja palamisteknisiä ominaisuuksia (KWH Plast).*

Muovi	Savun määrä ja laatu (väri)	Syttyvyys verrattuna puuhun	Palavia pisaroita	Lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	Leimahduspiste, °C,	Itsesyttymislämpötila, °C
Polyeteeni, PE (PE-HD, PE-LD)	Heikko, vaalea	Suuri	Kyllä	46	320	350
Polypropeeni, PP	Heikko, vaalea	Suuri	Kyllä	46,5	340	350
Kova polyvinyylkloridi, PVC	Normaali, harmaa	Heikko	Ei	20	400	450
Pehmitetty PVC	Voimakas, harmaa	Heikko	Ei	20–30	330–400	420–430
Polystyreeni, PS	Voimakas, tumma	Suuri	Kyllä	42	350	490
Polyesterit	Normaali, tumma	Harts: suuri	Ei	6–18	32 (hartsi)	490 (hartsi)



Polyesterit: tyydyttämättömät polyesterihartsit

Harts: nestemäinen, kovettamaton polyesterihartsi

Yhdyskuntajätteen polttokelpoisista jätejakeista valmistetun polttoaineen (RDF) lämpöarvo on saapumistilassa 10–15 MJ/kg. Teollisuudesta kerätyn lähinnä pakkauksia sisältävän jätteen tehollinen lämpöarvo on saapumistilassa on korkeampi kuin kotitalouden kuivajakeella (14–18 MJ/kg). Mikäli kerätään eri muoveja on seoksen lämpöarvo 31,8 MJ/kg ja pelkän polyeteenijätteen 39,8 MJ/kg. Polyeteenijätteen lämpöarvo on kuluttajilta kerätyllä jätteellä jonkin verran pienempi epäpuhtauksien takia kuin puhtaan polyeteenin



(46 MJ/kg). Muovijätteen tuhkapitoisuus on alhainen (0,6–3,2 %). Korkeimmat tuhkapitoisuudet ovat kuluttajilta kerätyssä kuivajakeessa (8,5–15,8). Aikakauslehtipaperin tuhkapitoisuus on korkeimpia 23–28 %.

Pakkauksista valmistetun polttoaineen (PDF) ja jätteestä erotetun polttojakeen (RDF) rikkipitoisuus on turpeen luokkaa ja typpipitoisuus alhaisempi kuin turpeella. Klooripitoisuus (0,5–1,3 %) on korkeampi kuin turpeella. Nestepakkauksista valmistetun polttoaineen klooripitoisuus on alhaisempi (0,06 %). Kuten taulukoista 81–85 ja 89 huomataan, vaihtelevat pakkauksista ja kotitalouden kuivajakeesta valmistetun polttoaineen ominaisuudet suuresti (Manninen 1996, Vesterinen 1997).

### 7.3 Jätepelletit

*Pelletointi* on suositeltava vaihtoehto, jolla irtojätteen (fluffin) haittoja, kuten kokoonpuristuvuutta, voidaan poistaa. Pelletti takaa tasalaatuisen polttoaineen, jonka käsiteltävyys on rinnastettavissa hakkeeseen ja palaturpeeseen. Keväällä 1997 otettiin käyttöön ASJ Stormossen Oy:n osaksi omistama Ewapower Oy:n jätepelletointilaitos Pietarsaassa. Laitoksessa valmistetaan polttoainepellettejä keittiöjätteestä erotellusta polttokelpoisesta jätteestä sekä myös teollisuuden polttokelpoisesta jätteestä. Jätepolttoaineella korvataan Wisaforestin tehtaalla Pietarsaassa fossiilisia polttoaineita kuten kivihiiltä. Vaasan seudun polttokelpoiset jätteet toimitetaan Ewapowerin laitokselle pelletöitäväksi. REF-pellettien ominaisuuksia on esitelty taulukossa 91.

### 7.4 Rengasromu

*Rengasromua* on varsin yleisesti käytetty sementtiuunien polttoaineena, joka kokonaisena tai murskattuna. Sementtiuunissa renkaiden epäorgaaninen aines sitoutuu osaksi sementtiklinkkeriin. Murskattua rengasromua voidaan käyttää seospolttoaineena. Jos rengas murskataan, tarvitaan runsaasti energiaa ja teräslangat ovat erityisen ongelmallisia isokokoisissa renkaissa. Ne aiheuttavat ongelmia syöttölaitteissa sekä tuhkanpoistossa. Renkaiden muu epäorgaaninen aines (ZnO) sekoittuu yleensä pääpolttoaineen tuhkaan ja voi sitä kautta aiheuttaa ongelmia. Kumiromun lämpöarvo on keskimäärin 30 MJ/kg ja paloittamojätteenkin 10–20 MJ/kg (taulukko 88) (Ranta 1999).

Taulukko 88. Rengasromun polttoaineominaisuuksia (Ranta 1999).

Ominaisuus	Kumirouhe	Rengasmurska	Autonpurkujäte (suluisissa vaihteluväli)
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	39	32	10–40 saapumistilassa
Kosteus, %	0,5	1	6 (1–25)
Tuhka, %	4,3	12	
Tiheys, kg/m <sup>3</sup>	390	400	300–400
Hili, (C), %			30
Vety (H), %			3,7
Happi (O), %			7
Rikki, (S) %	1,9	1,2	0,3–0,8
Kloori (Cl), %	0,03		1–2
Rauta (Fe), %			13
Pii (Si), %			9,5

Rengasromun tuhkan koostumus ilman terästä on hapettavissa olosuhteissa seuraava, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> n. 5,8 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> n. 0,3 %, TiO<sub>2</sub> 0,8 %, ZnO n. 48 %, CaO n. 1,8 %, K<sub>2</sub>O n. 1,4 %, SiO<sub>2</sub> n. 30 % ja SO<sub>3</sub> n. 6,6 % (Teollisuuden sivutuotteiden energiakäytön edellytykset 1988).

## 7.5 Teollisuuden ja rakennustoiminnan jätteet

VTT Energia on selvittänyt viime vuosina hyvin monenlaisten teollisuuden ja yhdyskuntien jätepolttoaineiden ominaisuuksia. Seuraavissa taulukoissa on koottu eri analyyysien tuloksia (taulukot 89–92).

Taulukko 89. VTT Energian kierrätyspolttoaineiden analyysituloksia erilaisista lähinnä teollisuudesta kerätystä polttojakeista.

Polttoaine	Teollisuuden palava jäte (pakkauksia)	Kotitalouden kuivajäte	Polttojake 1	Polttojake 2	Polttojake 3	Polttojake 4	Keskiarvonäyte edellisistä polttojakeista
Kosteus %	19,5	29,3	6,73	13,3	22,7	18,5	18,3
Kalorimetrinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	24,9	23,3	18,3	21,3	21,0	21,1	21,7
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	23,2	21,7	17,0	19,8	19,6	19,6	20,2
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	18,2	14,6	15,7	16,9	14,6	15,5	15,9
ALKUAINEEET %							
Hili (C)	54,7	53,4	45,2	49,6	50,0	49,6	50,4
Vety (H)	7,76	7,41	5,90	6,74	6,76	6,74	6,89
Typpi (N)	0,42	0,80	0,26	0,27	0,37	0,21	0,39
Rikki (S)	0,07	0,17	0,16	0,14	0,28	0,14	0,16
Kloori (Cl)	0,24	0,78	0,06	0,12	0,34	0,12	0,28
Tuhkapitoisuus %	5,53	13,8	6,22	5,36	9,06	5,89	7,64
RASKASMETALLIT							
Alumiini [g/kg]	2,95	11,0	7,04	4,70	7,06	2,58	5,89
Arseeni, mg/kg	4,38	14,2	0,70	0,54	0,49	2,76	3,85
Kadmium, mg/kg	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<3	<3	-
Kromi, mg/kg	7,66	62,4	8,57	5,74	<20	<20	21,1
Kupari, mg/kg	14,5	522	21,8	24,2	24	21	104,6
Lyijy, mg/kg	12,1	136	11,9	9,5	<20	<20	42,4
Magnesium [g/kg]	0,98	1,74	1,60	1,11	1,09	0,78	1,22
Sinkki	56,2	537	59,1	75,8	51	59	139,7
Elohopea	0,010	0,16	0,063	0,012	0,008	0,030	0,047
ALKALIT g/kg							
Kalium	1,49	3,77	0,31	0,52	1,16	0,74	1,33
Kalsium	14,5	14,7	6,32	6,69	14,9	5,12	10,37
Natrium	4,50	4,95	0,93	1,18	4,19	1,56	2,89

Taulukko 90. Huonekalupuun elementaarianalyseja (Larjava et al. 1995).

Polttoainenäyte	Lastulevypitoinen puru	Lastulevypuru	Kutterinlastupuruseos
Kosteus,%	7,5	5,8	22,2
Teholl. lämpöarvo k.a.:ssa, MJ/kg	18,4	18,6	19
Tuhkapitoisuus, %	0,75	1,64	0,42
C-pitoisuus, %	48,8	48,8	49,9
H-pitoisuus, %	5,84	5,87	6,02
N-pitoisuus, %	0,54	0,31	0,2
S-pitoisuus,%	0,02	0,02	0,02

Taulukko 91. VTT Energian analyysituloksia rakennusjätteestä ja jätepelleteistä (Vesterinen 1995 ja 1997).

Polttoaine	Rakennusjäte	REF- pelletti	Ratapölkkyhake <sup>1)</sup>	Kyllästetty puu <sup>2)</sup>	Laminaatti <sup>3)</sup>	Kerrosrakenteellinen levy <sup>3)</sup>
Kosteus %	15–35	2, 5–4,5	45,6	23,4	1,93	2,20
Kalorimetrinen lämpöarvo kuiva-aineesta, MJ/kg	20–21	23–26	21,1	20,2	17,4	20,4
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	18,6–19,5	22–25	19,8	18,9	16,7	19,3
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	11,2–15,6	21–24	9,6	13,9	16,3	18,8
Haihtuvat aineet, %			81,7	82,7	55,9	69,4
ALKUAINHEET %						
Hiihi (C)	49–51	52–58	52,3	50,4	39,2	51,7
Vety (H)	6–6,5	6,5–8,5			3,4	5,0
Typpi (N)	0,1–0,8	0,5–1,5	0,19	0,13	0,01	0,5
Rikki (S)	0,01–0,2	0,10–0,20	0,07	0,02	0,0	0,0
Kloori (Cl)	0,01–0,1	0,3–0,9	0,008	0,009	0,03	0,01
Tuhkapitoisuus %	1,7–2,6	4–10	4,0	1,4	42,7	21,3
RASKASMETALLIT mg/kg						
Alumiini, kok. [g/kg]	pieni	4,5–10				
Arseeni	0,8–70	1,7–2,7				
Kadmium		0,1–4,0				
Kromi		0,75–44				
Kupari		45–51				
Lyijy		50–100				
Magnesium [g/kg]		0,6–1,5				
Sinkki		140–290				
Elohopea						
ALKALIT g/kg						
Kalium	0,5–1,0	1,2–2,5				
Kalsium		8–21				
Natrium	0,5–1,0	2–3,5				

<sup>1)</sup> Kreosiittikyllästetty

<sup>2)</sup> kupari-kromi-arseenikyllästettyä lähinnä sähköpylväitä

<sup>3)</sup> sisältää lasikuitua.

Taulukko 92. Ratapölkkyhakkeen ja kyllästetyn puun metallipitoisuuksia, mg/kg (Vesterinen 1995 ja 1997).

Metalli	Hake	Ratapölkkyhake <sup>1)</sup>	Kyllästetty puu <sup>2)</sup>
Arseeni, As	2,0	5,5	3214
Elohopea, Hg	0,06	0,13	0,15
Kadmium, Cd	0,16	<0,1	0,31
Kalsium, K	475	839	198
Koboltti, Co	<0,2	1,97	<0,2
Kromi, Cr	2,84	21,8	5272
Kupari, Cu	2,0	6,1	1911
Lyijy, Pb	0,35	2,37	1,80
Mangaani, Mn	104	115	81
Natrium, Na	18	717	68
Nikkeli, Ni	0,45	7,79	3,55
Sinkki, Zn	23,4	19	12,1

<sup>1)</sup> Kreosiittikyllästetty

<sup>2)</sup> kupari-kromi-arseenikyllästettyä lähinnä sähköpylväitä.

## 8. Lietteet

Lietteitä syntyy maataloudessa, teollisuudessa sekä myös yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla. Karjatalous on suurin lietteiden (=karjanlanta) tuottaja. Puunjalostusteollisuuden lietteitä ovat mm. primääriliete, bioliete, siistausliete ja kemiallinen liete.

Lietteiden sijoittamisen tavoitteena on löytää erilaisille lietteille mahdollisimman haitaton sijoittaminen. Ennen kaikkea suositetaan lietteen hyötykäyttöä. Lietteitä voidaan käyttää hyödyksi joko aineena tai hyödyntämällä niiden energiasisältö. Metsäteollisuuden lietteitä voidaan hyödyntää polttamalla tai valmistamalla niistä lannoitteita. Puhdistamolietteistä sekä maatalouden lietteistä voidaan tuottaa biokaasua (ks. biokaasu), joka voidaan polttaa ja tuottaa sähköä ja lämpöä moottorivoimalaitoksessa.

Metsäteollisuuden lietteitä poltetaan muiden polttoaineiden joukossa yleensä kuorikattilassa. Poltettavuuteen vaikuttavat mm. lietteen tuhkapitoisuus sekä kosteus (kuva 20). Suomessa noin puolet metsäteollisuuden lietteistä poltetaan. Polttamalla liete saadaan helpommin käsiteltävään muotoon ja pienempään tilaan. Lietteen poltossa ei yleensä saada energiaa talteen. Kosteus ja lietteen koostumus vaikuttavat palamiseen. Pystyäkseen ylläpitämään palamista, tulee polttoaineen tehollisen lämpöarvon olla vähintään tasolla 5 MJ/kg, joten liete vaatii käytännössä lähes aina tukipolttoaineen. Tyyppinen tukipolttoaine on kuori. Jos lietteen kuiva-ainepitoisuus saadaan riittävän suureksi, on lietteen poltto mahdollista ilman tukipolttoainetta. Polttomenetelmästä riippuen palaminen vaatii 30–50 % kuiva-ainepitoisuuden. Kuiva-ainepitoisuutta voidaan nostaa mekaanisella vedenerotuksella. Suotonauhapuristimella päästään 22–30 %:n, lingoilla 15–25 %:n ja ruuvipuristimilla jopa 50 %:n kuiva-ainepitoisuuteen. Lietteen polttoon ja lämpöarvoon vaikuttavia tekijöitä on esitetty taulukossa 93 (Isännäinen 1993).

*Primääriliete (kuituliete, esiselkeytysliete)* on esiselkeytyksestä laskeuttamalla saatua lietettä. Metsäteollisuuden primäärilietteet sisältävät kuori-, kuitu-, täyte- ja lisäaineita sekä pigmenttejä. Sen laatu riippuu monista tekijöistä, mm. tuotantoprosessista. Lietteen tuhkapitoisuus riippuu tuotantoprosessista siten, että hienopaperitehtaiden lietteissä on tuhkaa 50–60 % ja selluteollisuuden lietteiden tuhkapitoisuus on 5–20. Kosteus on 60–65 % ja tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa 4–6 MJ/kg % (Isännäinen & Huotari 1994).

*Bioliete eli aktiiviliete* on jäteveden biologisessa puhdistuksessa syntyvää lietettä. Metsäteollisuuden biolietettä voi verrata yhdyskuntien puhdistamolietteeeseen (ks. taulukko 93). Siinä on mikrobimassan lisäksi myös puun uuteaineita, ligniiniyhdisteitä

ja adsorboituneita klooriorgaanisia yhdisteitä. Biomassan osuus biolietteessä on aktiivimenetelmässä on 65–75 p-%. Biolietteen tuhkapitoisuus on 5–50 p-%. Ravinnepitoisuudet ovat pienempiä kuin yhdyskuntien lietteissä Jätevedenpuhdistamojen biolietteitä voidaan polttaa kuivattuna leijukerroskattilassa. Biolietteet voidaan ohjata myös osaksi mustalipeän polttoa ja käsittelyä. Ongelmallista on biolietteiden sisältämät epäpuhtaudet, jotka saattavat rikastua lipeäkiertoon (Isännäinen 1993, Vakkilainen 1993).

*Taulukko 93. Erilaisten lietteiden koostumus ja ominaisuuksia kuiva-aineesta (Isännäinen 1993, Niittymäki 1993).*

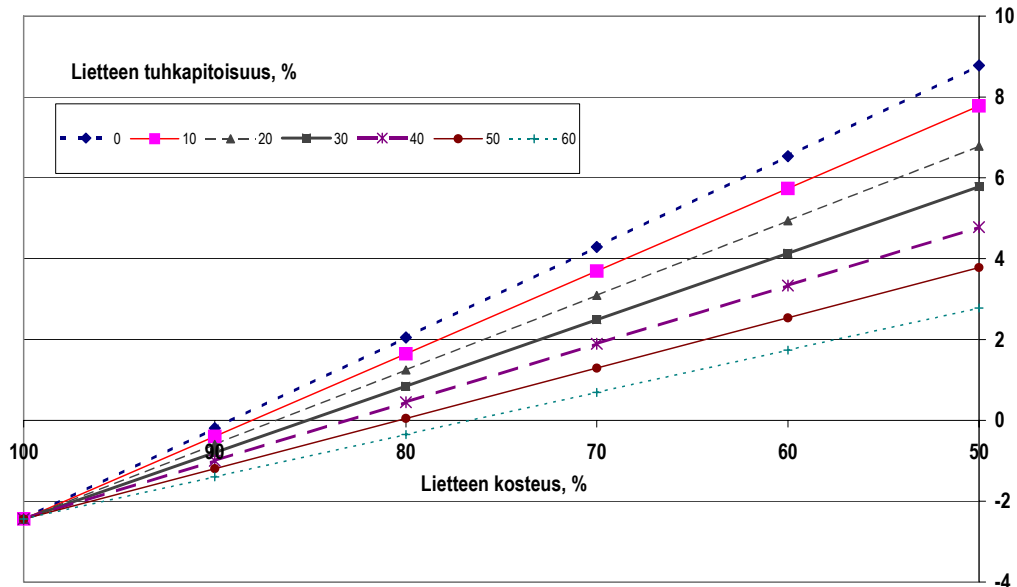
Ominaisuus	Sellutehtaan sekaliete	Primääriliete	Paperitehtaan sekaliete	Bioliete	Siistausliete	Kuorimoliete
Hilli, %	40–42	44	44–46	47	25–45	50
Vety, %	4,5–5,0	6	5,5–6,0	5,2	4–5,5	6
Rikki, %	0,4–0,9	0,1	0,05–0,1	1,2	0,1–0,3	0,02
Typpi, %	1,3–1,6	0,4	0,5–0,7	1,6	0,1–0,3	0,8
Happi, %	25–29	25		30	22	34
Tuhka,%	16–21	0,4	12–20	16	30–60	2,5
Kloori, %	0,1–0,6		0,0–0,1		0,2–0,6	
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	14–16			17,4	8–13	3,0
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	9,3	2,3		0	2,9	
Kosteus	75–80	70		85	60	70

*Kuorimossa* syntyy monenlaisia lietteitä, mm. kuoriliete, hiekanerottimen hiekkaliete ja selkeyttimen liete. Kuori käsitellään kuoripuristimissa ja selkeyttimen liete vedenerottimissa. Näiden seos poltetaan kuorikattilassa tai joskus viedään kaatopaikalle. Kuorilietteen määrä vaihtelee 0,5–8 kg/puu-m<sup>3</sup>. Määrä riippuu kuorimotyypistä, ajotavasta, puulajista ja puun varastoinnista (Isännäinen & Huotari 1994).

*Seosliete* on kuitu-, bio- ja kuorimolietteen seos. Seoslietteen ominaisuuksiin vaikuttaa biolietteen osuus.

*Siistauslietettä* syntyy keräyspaperin deinking-prosessissa, jossa jät-paperista poistetaan painomuste, täyteaineet ja päällysteet, jolloin jäljelle jää uusiokuitu. Siistauslietettä syntyy 50–205 kg/t tuotetta. Se on pääosin tuhkaa ja kuitua. Lietteen määrä riippuu käytettävän keräyspaperin laadusta. Siistauslietteiden keskimääräinen kuiva-ainepitoisuus on yli 40 % ja tuhkapitoisuus vaihtelee 30–60 % riippuen raaka-aineena käytettävän paperin laadusta ja sekä siistautekniikasta. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on suurimmillaan vain 15 MJ/kg. Siistauslietteen kuiva-aineen

natriumpitoisuus on 0,1–0,3 p-% ja kaliumpitoisuus 0,2–0,5 p-%. Klooripitoisuus on 0,1–0,4 %.



Kuva 20. Lietteen lämpöarvo käyttökosteudessa MJ/kg tuhkapitoisuuden ja lietteen kosteuden funktiona. Palavan osan lämpöarvoksi on laskettu 20 MJ/kg.

Metsäteollisuuden lietteiden raskasmetallipitoisuudet ovat yleensä melko pieniä yhdyskuntalietteisiin verrattuna eikä patogeenisiä mikrobeja yleensä esiinny (taulukot 94 ja 95). Ne sisältävät sitä vastoin erilaisia valkaisuprosesissa syntyviä klooriyhdisteitä, joiden määrästä ja laadusta ei ole tarkkaa tietoa. Kloorittomaan valkaisuun siirryttäessä lietteen klooriyhdisteiden määrä ja mahdolliset haitat vähenevät ja ovat nykyisin huomattavasti aikaisempaa vähäisempiä. Metsäteollisuuden jätevesien orgaanisten klooriyhdisteiden määrä AOX oli vuonna 1999 keskimäärin 0,2 kg valkaistua sellutonnin kohti, kun se vuonna 1989 oli 2,7. Myös lietteissä klooriyhdisteiden määrä on vähentynyt vastaavasti (Isännäinen 1993, Ympäristösuojelun vuosikirja 1999).

Yhdyskuntien lietteistä suurin osa on jätevedenpuhdistamon lietettä. Myös sako- ja umpikaivolietteitä muodostuu huomattavia määriä. Puhdistamolietteitä syntyy keskimäärin runsas 100 g kuiva-ainetta asukasta kohti vuorokaudessa (ks. myös kohta 11.4).



*Taulukko 94. Erilaisten lietteiden keskimääräiset raskasmetallipitoisuudet (mg/kg kuiva-ainetta) (Isännäinen 1993).*

Aine	Metsäteollisuuden primääriiete	Yhdyskuntaliete	Karjanlanta
Cd	0,0–2,5	2,9–4,3	0,3
Cr		102–150	5,3
Cu	3,4–31	300–319	40
Hg	0,0–0,2	1,4–2,2	0,1
Ni	7,0–26,7	55–80	7,5
Pb	0,0–15,5	114–120	6,5

*Taulukko 95. Metsäteollisuuden kuorikattilan tuhkan, viherlipesakan ja lietteen raskasmetallipitoisuuksia (Thun & Korhonen 1999).*

mg/kg	As	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
Puutuhka	5–33	90–320	90–320	70–560	45–390	5–140	900–3000
Viherlipesakka	<5	3,5–22	110–250	170–520	100–330	5–30	1400–2200
Liete	<5	0,5–4	9,3–60	17–65	7–40	5–13	90–510

## 9. Kivihiili

Kivihiilen muodostuminen alkoi maapallolla satoja miljoonia vuosia sitten suurien metsien jäädessä luonnonmullistusten alle. Suurin osa kivihiilivaroista on geologisen kivikauden ylemmissä kerrostumissa n. 300 miljoonan vuoden takaa. Ne ovat syntyneet kovassa paineessa ja hapettomassa olosuhteissa veden ja kaasujen poistuessa turpeesta. Ensimmäinen vaihe oli tummanruskea hiili. Puristuksen vaikutuksesta syntyi vähitellen tuhansia ja miljoonien vuosien aikana kovaa mustaa hiiltä. Lähtökohtana on kasviaineksen muuttumisvaihe turve–ruskahiili–subbituminen hiili – bituminen hiili – antrasiitti (Moilanen & Äijälä 1984, Taipale 1996).

Käsitettä hiili käytetään energiataloudessa yleisnimenä kiinteille, runsaasti hiiltä sisältäville polttoaineille. Käyttötarkoituksen mukaan hiili voidaan jakaa kahteen ryhmään (Mutanen et al. 1984, Taipale 1996)

- 1) Metallurginen hiili, josta valmistetaan koksia teollisuuden käyttöön ja
- 2) Höyryhiili, jota käytetään höyryn kehittämiseen voimalaitoksissa ja teollisuuden kattiloissa. Höyryhiiltä kutsutaan Suomessa yleisesti kivihiileksi tai voimalaitoshiileksi.

Kivihiilen ominaisuudet vaihtelevat suuresti kivihiilen alkuperän, iän, louhinta- ja käsittelytavan sekä varastointiajan ja -olosuhteiden mukaan. Merkittävä vaihtelun aiheuttaja on kivihiilen alkuperä (kaivos, juonne).

Kivihiilen ominaisuudet voidaan luokitella esim. seuraavasti (Moilanen & Äijälä 1984, Taipale 1996)

- Kaupalliset ominaisuudet (kosteus, tuhkapitoisuus ja lämpöarvo)
- Käyttötekniset ominaisuudet (haihtuvat aineet, rikkipitoisuus, rikin esiintymismuodot, jauhautuvuus, kloridipitoisuus, tuhkan koostumus ja sulamiskäyttäytyminen),
- Ympäristötekniset ominaisuudet (hivenalkuaine- ja raskasmetallipitoisuudet)
- Kemialliset ja rakenteelliset ominaisuudet (alkuainekoostumus ja petrografiset ominaisuudet) sekä
- Puhdistustekniset ominaisuudet (tuhkan koostumus ja pyriittinen rikkipitoisuus).

Kivihiilen luokittelua varten on kehitetty erilaisia järjestelmiä mm. ASTM, ECE:n luokittelujärjestelmä. Käytössä olevat kivihiilen laatuluokitukset käyttävät määrittelysissään kahta pääparametria: haihtuvien aineiden määrä ja kalorimetrinen lämpöarvo. Tärkein kivihiilen ominaisuuksiin vaikuttava tekijä on sen hiiltymisaste, joka on kasviaineiden kivihiileksi muuttumisen aste ja se siis määrä kivihiilen laatuluokan. Eniten hiiltymisasteen mukaan vaihtelevia ominaisuuksia ovat kosteus, haihtuvat aineet, lämpöarvo, hiili- ja happipitoisuus ja vitriiniin reflektanssi (valon heijastuskerroin). Vety- ja happipitoisuus samoin kuin typpi- ja rikki- ja rikkipitoisuus ovat luokituksesta riippumattomia ominaisuuksia. Hiilipitoisuus kasvaa alaspäin mentäessä, ollen ruskohiilessä eli ligniitissä 73 %, bitumisessa kivihiilessä n. 84 % ja antrasiitissa n. 94 %. Taulukossa 96 on kivihiilen ominaisuustietoja. Kivihiilen kansainvälinen korkeamman laatuluokan kivihiilen koodausjärjestelmä on esitetty liitteessä A6 (Taipale 1996, Hippinen 1988).

Kivihiilikerrostumissa esiintyvä kivihiili ei ole puhdasta hiiltä, vaan se sisältää erityisesti monia orgaanisia yhdisteitä, usein jopa yli 20%. Kivihiili muodostuu pääasiassa viidestä alkuaineesta (hiili, vety, happi, rikki ja typpi). Rikki on hiilessä pyriitti-, sulfiitti- ja sulfaattirikkinä sekä yhtyneenä orgaanisiin aineisiin.

Tavallisimmat hiilianalyseissä määritettävät ominaisuudet ovat hiilen fysikaaliset ominaisuudet, hiilen kemiallinen koostumus, tuhkan kemiallinen koostumus sekä joukko muita ominaisuuksia kuten paisumisominaisuudet, jauhautuvuus, tuhkan sulamiskäyttäytyminen sekä hiilen palakoko. Näiden lisäksi on yleistynyt myös petrografia-analyysin suorittaminen, jossa määritetään kivihiilen maseraalikoostumus. Maseraaleilla tarkoitetaan kivihiilen orgaanisia kasvismateriaaleista muodostuneita osia, jotka voidaan mikroskoopilla erottaa toisistaan (Hippinen 1988).

Haihtuvien aineiden määrä on tärkein kriteeri valittaessa kivihiiltä pölypolttoon. Myös muut ominaisuudet kuten kosteus, tuhkapitoisuus sekä hiukkaskoko ja siihen vaikuttavat ominaisuudet vaikuttavat syttymiseen ja palamiseen. Haihtuvien aineiden määrän lisääntyminen helpottaa syttymistä ja stabiloi liekkiä. Yleensä lämpöarvon noustessa hiilen hiiltymisaste kasvaa ja haihtuvien aineiden määrä pienenee. Myös tuhkapitoisuuden kasvu hidastaa syttymistä. Hidastava vaikutus on havaittavissa vasta tuhkapitoisuuden ollessa yli 10 %. Kivihiilen Hardgrove-indeksi vaihtelee kivihiilen kovuuden mukaan 40:n ja 100:n välillä. Mitä suurempi indeksi on sitä pehmeämpää hiili on ja sitä helpommin se jauhautuu myllyissä. Haihtuvien aineiden määrän pienetessä ja hiilipitoisuuden kasvaessa reflektanssi eli vitriinin keskimääräinen valonheijastuskerroin kasvaa. Tällöin hiili palaa korkeammassa lämpötiloissa ja palaminen hidastuu. Samalla syttyminen vaikeutuu ja palamattomat aineet tuhkassa lisääntyvät (Hippinen 1988).

Seuraavissa VTT Energian tutkijan Raili Taipaleen kokoamissa taulukoissa (taulukot 97–105) ja liitteessä B on koottu kahdeksalta suomalaiselta kivihiilen

käyttäjältä heidän käyttämien kivihiilien analyysituloksia. Taulukossa 106 on Fortumin kivihiilen ja puupolttoaineen seospolton analyysituloksia.

*Taulukko 96. Kivi- ja ruskohiilelle kirjallisuudessa esitettyjä keskimääräisiä ominaisuuksia (Taipale 1996, Seppälä et al. 1982, Moilanen et al. 1984).*

Ominaisuus	Kivihiili		Ruskohiili
	Seppälä et al.. 1982	Moilanen et al.1984	Seppälä et. al 1982
Kosteuspitoisuus, p-%	9 (6-10)	10	50 (40-60)
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, p-%	8,5–10,9	14	5–10
Haihtuvat aineet kuiva-aineessa, p-%	27–33	29,5	50–60
Kalorim. Lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg		29,6	
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	26,0–28,3	28,7	20,1–24,3
Tehollinen lämpöarvo käyttökost., MJ/kg	23,6–26,1		11,1–13,6
Alkuainekoostumus, p-% kuiva-aineessa			
C	76–87	76–87	65–76
H	3,5–5,0	3,5–5	4,5–5,5
N	0,8–1,2	0,8–1,2	1–2
O	2,8–11,3	2,8–11,3	20–30
S	0,5–3	< 0,5	1–3
Cl		< 0,1	
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavissa/pelkistävissä olosuhteissa, C			
- muodonmuutoslämpötila		1100-1300/ 1000-1240	
- puolipallolämpötila		1230-1415/ 1090-1350	
- juoksevuuslämpötila		1270-1450/ 1130-1400	

*Taulukko 97. Yhteenveto Suomessa käytettyjen kivihiilien polttoaineominaisuuksia (Taipale 1996).*

	Kokonai- suus- kosteus, p-%	Tuhka- pitoisuus k.a. p-%	Haihtuvat aineet k.a. p-%	Kalorim. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo saap. MJ/kg	Kiinteä hiili k.a. p-%	Hardgrove- indeksi	Leipoutu- vuus- indeksi	Koksaus- jäännös k.a. p-%
ka	10	15,1	33,7	28,8	27,9	24,8	53,8	57	1,5	68,5
lkm	845	845	845	637	631	838	253	523	452	297
min	4,6	1,3	23	23,2	22,2	18,9	37,8	41	0	50,7
max	24	29,5	49,9	33,5	32,3	30	62,7	87	7,5	77

ka = keskiarvo

Taulukko 98. Yhteenveto Suomessa käytettyjen kivihiilien alkuainepitoisuuksista kuiva-aineessa (Taipale 1996).

	Hiili	Vety	Typpi	Happi	Rikki	Kloori	Fluoridi	Fosfori
ka	71,5	4,5	1,3	8,5	0,83	0,103	0,008	0,014
lkm	80	81	84	25	853	34	5	2
min	59,1	3,1	0,7	5,6	0,08	0,009	0,006	0,008
max	80,8	5,4	2,1	12,8	2,5	0,24	0,008	0,02

ka = keskiarvo

Taulukko 99. Yhteenveto Suomessa käytettyjen kivihiilien raskasmetallipitoisuuksista (mg/kg kuiva-ainetta) (Taipale 1996).

	Elohopea Hg	Lyijy Pb	Kadmium Cd	Koboltti Co	Arseeni As	Vanadiini V	Nikkeli Ni	Kromi Cr
ka	0,11	12	0,22	4,4	5	27	14	14
lkm	15	15	15	4	15	4	4	15
min	0,03	1	0,06	1,3	1	14	8,5	3
max	0,23	30	0,8	7,8	13	50	21	29

ka = keskiarvo

Taulukko 100. Suomessa käytettyjen kivihiilien tuhkan sulamiskäyttäytyminen (°C) (Taipale 1996).

	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (DIN)			Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (ASTM)				Tuhkan sulamiskäyttäytyminen pelkistävässä atmosfäärissä (ASTM)			
	A	B	C	IT	ST	HT	FT	IT	ST	HT	IT
ka	1235	1409	1439	1309	1356	1389	1428	1245	1292	1324	1408
lkm	448	448	448	29	29	29	29	4	4	4	4
min	1015	1260	1310	1210	1230	1295	1360	1227	1280	1300	1362
max	1570	1580	1590	1430	1455	1470	1500	1263	1304	1352	1500

ka = keskiarvo

Taulukko 101. Suomessa käytettyjen puolalaisten ja venäläisten kivihiilien raekokojakaumia (Taipale 1996).

	Puolalaisen kivihiilien raekokojakauma, p-%			Venäläisen kivihiilien raekokojakauma, p-%		
	> 10 mm	3–10 mm	< 3 mm	> 10 mm	3–10 mm	< 3 mm
ka	20	26	48	27	29	45
lkm	236	236	236	98	98	98

ka = keskiarvo

Taulukko 102. Erilaisten kivihiilien päämaseraaliryhmien ominaisuuksia (Äijälä et al. 1984).

Hiili	Haihtuvat aineet k.a. p-%	Hiilipit. k.a. p-%	Vetyt. k.a. p-%	Happipit. k.a. p-%	Typpipit. k.a. p-%	Rikkipit. k.a. p-%	Paisumislu ku
JUONNE R							
Vitriniitti	36,13	83,45	5,06	9,78	0,78	0,93	3,5
Eksiniitti	68,77	85,49	7,34	5,8	0,46	0,91	< 9
Inertiniitti	22,54	86,77	3,91	8,11	0,55	0,66	0,5
JUONNE ZOLLVEREREIN							
Vitriniitti	31,97	85,74	4,88	7,78	0,78	0,82	6,5
Eksiniitti	59,81	87,41	6,47	4,67	0,64	0,54	< 9
Inertiniitti	23,37	87,98	4,17	6,81	0,56	0,48	1
JUONNE ANNA							
Vitriniitti	28,36	88,36	5,11	4,73	0,83	0,97	8,5
Eksiniitti	37,08	89,1	5,96	3,75	0,67	0,52	< 9
Inertiniitti	19,18	89,59	4,34	4,95	0,6	0,52	1,5
JUONNE WILHELM							
Vitriniitti	23,5	88,84	4,94	3,95	1,56	0,71	9
Eksiniitti	22,57	89,29	4,91	3,75	1,45	0,6	8
Inertiniitti	16,98	89,78	4,25	4,52	0,92	0,53	1

Taulukko 103. Erikokoisten hiilijakeiden ominaisuuksia ilmakeivatussa tilassa (Taipale 1996).

Näyte	Raekoko ( $\mu$ m)	Kosteus, p-%	Tuhka, p-%	Haihtuvat aineet p-%	Kiinteä hiili, p-%	Lämpöarvo MJ/kg
Hiili 1	45-63	3,1	16,7	28,3	51,9	23,72
	75-90	3,6	12,4	30	54	23,59
	106-125	3,7	10,9	30,9	54,5	25,31
Hiili 2	45-63	1,8	36	17	45,2	19,27
	75-90	1,3	25,4	17,6	65,7	24,88
	106-125	1,3	21,2	18,1	59,4	26,61
Hiili 3	45-63	10,7	6,1	43,2	40	21,84
	75-90	10,2	4	44,5	41,3	22,55
	106-125	10,5	2,6	45,4	41,5	22,74

Taulukko 104. Jauhetun kivihiilen seitsemään tiheysfraktioon jauhetun ja jakamattoman näytteen tuhkan koostumus ja sulamiskäyttäytyminen (Singer 1982).

	Tiheysfraktio, kg/dm <sup>3</sup>							
	1,3–1,5	1,5–1,7	1,7–1,9	1,9–2,1	2,1–2,5	2,5–2,9	> 2,9	KOKO
Osuus, p-%	62,8	32,3	1,6	1,1	0,6	0,4	1	--
Tuhkapit., p-%	6,1	6,4	21,8	39,9	82,6	84	68,3	11,9
Sulamiskäyttäytyminen, °C								
IT	1221	1238	1227	1266	1193	1288	1210	1166
ST	1254	1299	1282	1304	1221	1336	1232	1188
HT	1266	1310	1316	1332	1249	1366	1304	1210
FT	1282	1327	1443	1399	1327	1387	1388	1266
Tuhkan koostumus, p-%								
SiO <sub>2</sub>	41,1	43,7	54,5	53,4	51	37	6,8	50,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,5	24,2	25,7	20,7	10,3	3	0,7	16,9
TiO <sub>2</sub>	0,8	0,8	0,6	0,8	0,4	0,3	0,3	0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2	2	7,1	5,9	3,5	3,7	79	8,9
CaO	19,6	16,1	7	8,2	11,9	22,8	3,9	11,5
MgO	5,1	4,3	1,4	1	0,6	0,8	0,3	3,5
Na <sub>2</sub> O	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	1,8
K <sub>2</sub> O	0,3	0,3	0,4	0,2	0,4	0,4	0,2	1,7
SO <sub>3</sub>	9,5	7,7	2,7	6,5	9,6	11	6,2	4,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,3	0,2	...

Taulukko 105. Suomessa käytettyjen kivihiilien tuhkan koostumuksia (p-% kuiva-aineessa) (Taipale 1996).

	CaO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
ka	3,6	1,1	23	9,5	1	2,1	2	51	2,9	0,4	0,1
lkm	34	33	38	35	35	34	33	35	16	34	2
min	0,5	0,1	11	2,7	0,2	0,3	0,2	42	0,2	0,1	0,1
max	6,4	2,3	41	20	1,6	8	3,2	67	9,8	0,7	0,1

ka = keskiarvo

Taulukko 106. Kivihiilen ja puupolttoaineen seospolton analyysituloksia (Kostamo 2000).

Ominaisuus	Sahanpuru, mänty	Sahanpuru, kuusi	Puolalainen kivihiili
TEKNILLINEN ANALYYSI, p-% saapumistilassa			
Kosteus	46,5–54,5	38,4	8,7–12,8
Haihtuvat aineet	41,9	52,5	26,4–29,1
Tuhka	0,2	0,1	10,0–14,7
Kiinteä hiili	6,8	9,0	46,5–52,2
ALKUAINEANALYYSI, k.a. p-%			
Hiili	52,6	50,6	69,9
Vety	6,1	6,1	4,4
Happi	40,9	42,9	7,6
Typpi	< 0,1	0,2	1,1
Rikki	< 0,01	< 0,01	0,73–0,95
Kloori	< 0,002	0,002	0,21
Tuhka	0,4	0,2	11,0–16,1
TEHOLLINEN LÄMPÖARVO SAAPUMISTILASSA, MJ/kg	7,6–9,3	9,9	23,9–26,6
K <sub>2</sub> O	1,5	0,7	2,4
P <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	8,0	5,4	0,7
CaO	62	61	3,6
MgO	16	8,5	2,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	0,8	8,1
SO <sub>3</sub>	5,2	3,0	3,2
SiO <sub>2</sub>	1,4	6,8	50,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,1	1,5	25,0
TiO <sub>2</sub>	< 0,46	0,06	1,3
Na <sub>2</sub> O	0,4	0,4	1,2
TUHKAN SULAMISKÄYTTÄYTYMINEN ,o C			
IT (muodonmuutospiste)	1495	-	1205
ST (pehmenemispiste)	1510	-	1240
HT (puolipallopiste)	1520	-	1275
FT (juoksevuuspiste)	1520	-	1340



# 10. Polttoöljyt

## 10.1 Raskaat ja kevyet polttoöljyt

Raakaöljy on maan sisällä miljoonien vuosien kuluessa eloperäisen luonnon jäänteistä syntynyttä tuotetta. Raakaöljy koostuu erilaisista hiilivedyistä, joista kevyimmät ovat kaasumaisia ja raskaimmat haihtuvat vasta 700 °C. Eri öljykentiltä saatavan raakaöljyn ominaisuudet vaihtelevat mm. keveytensä ja rikki- ja raskasmetallipitoisuutensa suhteen.

Suomeen raakaöljy tuodaan laivoilla ja puretaan jalostamoilla sijaitseviin isoihin kalliovarastoihin. Raakaöljyn pääasiallisia tuontialueita ovat Venäjä ja Pohjanmeri (Norja ja Iso-Britannia). Myös Lähi-idästä on tuotu raakaöljyä.

Öljyn jalostukseen kuuluu tislauk-, krakkaus- ja rikinpoistoyksiköitä. Ensimmäisessä vaiheena raakaöljyn käsittelyssä on suolanpesu. Tämän jälkeen raakaöljy syötetään ensimmäiseen tislauksyksikköön ns. suoratislauksyksikköön, jossa n. 0,1 MPa:n paineessa eri hiilivetyjakeet erottuvat eri lämpötila-alueilla toisistaan. Suoratislauksyksiköstä syntyvä pohjaöljy johdetaan tyhjötilaukseen, jossa valitsee 86 kPa:n alipaine. Tyhjötilauksesta saadaan kevyttä kaasuaöljyä sekä pohjaöljyä, joka johdetaan edelleen lämpökrakkausyksikköön. Lämpökrakkausyksikössä pohjaöljyä hajotetaan termisesti 450–480 °C lämpötilassa kevyemmiksi jakeiksi. Lämpökrakkausyksikön pohjaöljy on ylikraska polttoöljyä viskositeettitasoltaan 2000 mm<sup>2</sup>/s. Kevyemmät raskasöljyalaadut saadaan tästä pohjaöljystä tisleillä ohentamalla (Raskaan polttoöljyn käyttöopas 1998).

Polttoöljyt jaetaan käyttöominaisuuksien mukaan raskaisiin ja kevyisiin öljyihin. Raskaat polttoöljyt ovat kevyitä öljyjä halvempia, mutta vaativat kalliimmat polttolaitteet ja asiantuntevaa huoltoa ja käyttöä. Raskaat polttoöljyt sopivat kohteisiin, joissa tarvittava kattilateho on vähintään 500–1000 kW.

Kevyt polttoöljy on raskasta kalliimpaa, mutta se on helposti juokseva ja palava tisle, jonka polttamiseen tarvittavat polttolaitteet ovat yksinkertaiset ja halvat rakentaa. Tämän vuoksi kevytpolttoöljy soveltuu laitteisiin, joiden teho on alle 1000 kW.

Fortum Oil and Gas tuottaa raskasta polttoöljyä Mastera-tuotenimikkeellä (taulukko 107).

Taulukko 107. Raskaiden polttoöljyjen tyypilliset ominaisuudet ja käytetyt määrittämenetelmät (Raskaan polttoöljyn käyttöopas 1998).

	Mastera LS 100		Mastera LS 180		Mastera LS 380		Määrittämenetelmä
	Laaturajat	Tyypillinen	Laaturajat	Tyypillinen	Laaturajat	Tyypillinen	
Viskositeetti							
50 °C:ssa mm <sup>2</sup> /s (laskettu)	80–100	95	140–180	170	300–380	370	
80 °C:ssa	23,2–27,4	27	36,9–42,2	41,3	61,2–72,8	71,4	D 445, ISO3104
Tiheys 15 °C:ssa, kg/m <sup>3</sup>	900–1000	970	910–1010	980	920–1020	990	D 4052
Jähmepiste, °C	<15	<5	<15	<5	<15	<5	D 97
Leimahduspiste, °C	>65	80	>65	80	>65	80	D 93, ISO 2719
Kuumasuodatusjäännös, p-%	<0,15	<0,05	<0,15	<0,05	<0,15	<0,05	D4870
Hiiltoijäännös (MCR), p-%	<14	11,5	<15	14	<17	14	D4530
Asfalteenit, p-%	-	5	-	6	-	6	DIN51595
Elementaarianalyysi, %							
Hiili		88,45		88,30		88,30	
Vety		10,10		10,10		10,10	
Rikki	<1,0	0,80	<1,0	0,95	<1,0	0,95	D 4294
Typpi		0,40		0,40		0,40	
Happi		0,21		0,21		0,21	
Tuhka	<0,1	0,04	<0,1	0,04	<0,1	0,04	D 482, EN 7
Vesi, massa-%	<0,7	0,24	<0,7	0,3	<0,7	0,3	D 95
Metallit, mg/kg							
Vanadiini	<100	37	<100	40	<100	45	D 5185, NM 122
Nikkeli	<50	17	<50	18	<50	20	D 5185, NM 122
Natrium		33		37			
Rauta		27		30		41	
Alumiini		10		11		33	
Pii		12		14		12	
Kalsium		25		28		15	
Magnesium		5		5		31	
Arseeni		<5		<5		6	
Lyijy		<1		<1		<5	
Kromi		<1		<1		<1	
Kupari		<1		<1		<1<1	
Kadmium		<0,5		<0,5		<0,5	
Elohopea		<0,3		<0,3		<0,3	
Palamista edistävä lisäaine	+	+	+	+	+	+	
Tehollinen lämpöarvo +25°C:ssa, MJ/kg							
kuiva öljy	>40,7	41,3	>40,6	41,2			ISO 8217
toimitustilassa	>40,4	41,2	>40,2	41,0	>40,4	41,0	ISO 8217
					>40,1	40,9	

D-numero viittaa ASTM-menetelmään

NM-numero viittaa Fortum Oil and Gas-menetelmään

Raskaiden polttoöljyjen kosteus on alhainen (n. 0,3 %). Raskaan polttoöljyn suurin sallittu rikkipitoisuus on 1 %. Typpipitoisuus on n. 0,4 % ja tuhkapitoisuus tyypillisesti 0,04 %. Muut ominaisuudet on kuvattu Fortum Oyj:n Raskaan polttoöljyn käyttöoppaassa.

Kotimaassa tuotettuja kevyitä on polttoöljyjä ovat Tempera-öljyt, joista neljä eri tuotetta, jotka eroavat toisistaan lähinnä kylmän kestävyuden ja viskositeetin eli juoksevuuden osalta (taulukko 108). Näiden rikkipitoisuus on alle 0,2%, typpipitoisuus 0,01–0,03 % ja tuhkapitoisuus 0,001% (Tempera kevyen polttoöljyn käyttö ja ominaisuudet 1990).

*Taulukko 108. Kevytpolttoöljyalaatujen tyypillisten ominaisuuksien arvoja (Raiko et al. 1995).*

Ominaisuus	Kevyt polttoöljy		
	Kylmiin olosuhteisiin lyhenne POK 4	Asuin- ja kiinteistökäyttöön lyhenne POK 5	Suurkiinteistö- ja laivakäyttöön lyhenne POK 15
Rikki, p-%	<0,05	<0,05 250 °C 30	<0,18
Tislaus, til-% haihtunut	180 °C 1 340 °C 98	350 °C 96 370 °C 98	365 °C 90
Leimahduspiste, °C	75	75	90
Tiheys (15 °C), kg/m <sup>3</sup>	840	845	870
Viskositeetti (40 °C), mm <sup>2</sup> /s	2.2	3.2	6
Samepiste, °C	-25	-5	7
Suodatettavuus, °C	-32	-16	5
Jähmepiste, °C	-	-	-3
Setaani-indeksi	48	48	52
Setaaniluku	47	49	-
Hiltojäännös, p-% (10% pohjasta)	<0,1	<0,2	<0,2
Teholl. lämpöarvo, MJ/dm <sup>3</sup> (laskettu)	35,9	36,1	36,9
Kuparikorroosio	1	1	1
Vesi, mg/mg	100	100	200
Hapetuskestävyys, g/m <sup>3</sup>	2	2	-
Tuhka, p-%	<0,01	<0,01	0.01

POK = kevyt polttoöljy

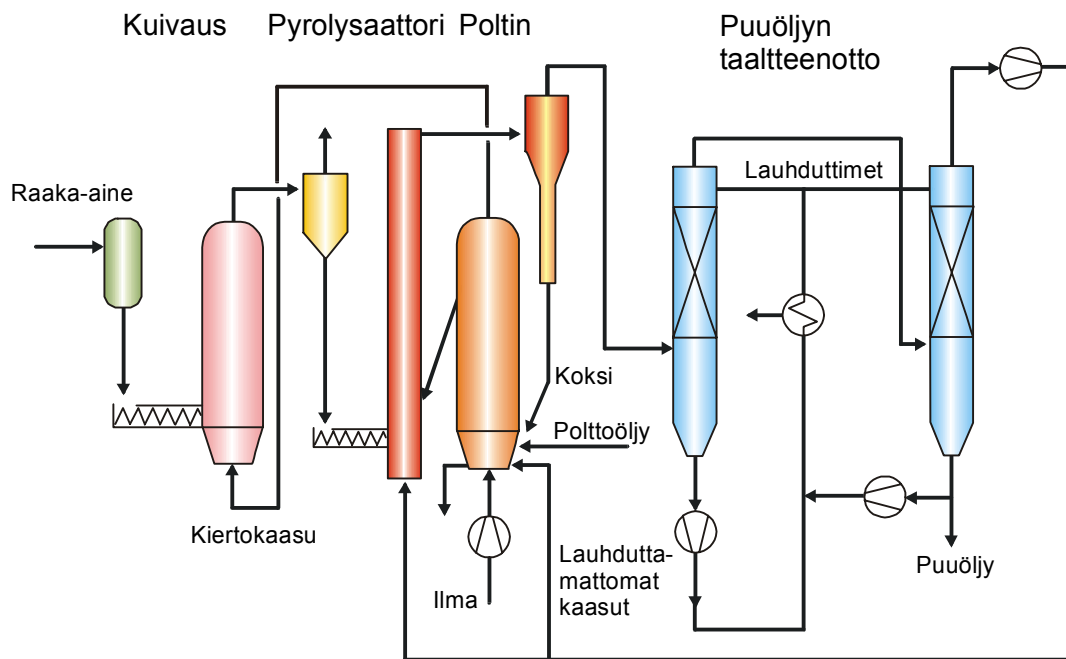
Polttoöljyn tuhka sisältää pääasiassa vanadiiniä ja nikkeliä, joista nikkeli luetaan haitallisiin raskasmetalleihin. Raskaalla polttoöljyllä Ni-päästö on 0,35–1,3 mg/MJ.

## 10.2 Bioöljyt

*Biodiesel* on yleisnimitys kasviöljypohjaiselle dieselpolttoaineelle. Öljykasvien siemenistä erotettu öljy ei karstoittumisongelmien vuoksi sovellu sellaisenaan nykyisten dieselmoottorien polttoaineeksi. Esteröimällä kasviöljy alkoholilla saadaan tavallisiin dieselmoottoreihin sopivaa polttoainetta. Esteröitäessä rypsiöljyä metyylialkoholilla syntyy rypsimetyyliesteriä (RME); mikäli esteröintiin käytetään etanolia on loppu-tuotteena rypsietyyliesteriä (REE). Rypsiöljyn lämpöarvo on 36,9 MJ/kg ja RME:n 38,5 MJ/kg. Happipitoisuus on 10 % ja rypsiöljyn rikkipitoisuus on 0,002 % ja RME:n 0,001 %. Viskositeetti on rypsiöljyllä 77,0 mm<sup>2</sup>/s ja RME:llä 7.3 mm<sup>2</sup>/s 20 °C:n lämpötilassa (Sipilä 1994).

*Etanolia* voidaan käyttää bensiinin lisäaineiden valmistukseen sekä rypsi- tai mäntyöljyn esteröintiin. Etanoli käy sellaisenaan ottomoottorin polttoaineeksi ja sen soveltuvuutta dieselmoottorien polttoaineeksi ja dieselöljyn lisäaineeksi on myös testattu. Etanolia voidaan valmistaa myös biopolttoaineista esim. ohrasta. Suomessa on rypsiä valmistettava dieselöljy ja etanolista valmistettava bensiinin lisäaine ETBE kehitetty kaupalliselle tuotantoasteelle.

Sulfaattisellun prosessissa haihdutettaessa mustalipeä 25–30 %:n kuiva-ainepitoisuuteen saippuoituneet uuteaineet erottuvat mustalipeän pinnalle ns. raakasuopana. Suopa erotetaan mustalipeästä ja keitetään, jolloin suovasta tulee *mäntyöljyä* ja glauber-suolaliuosta. Mäntyöljyn lämpöarvo on 36,5–38,5 MJ/kg ja suovan lämpösisältö noin 19–20 MJ/kg (kuiva-aineen lämpöarvo 34 MJ/kg). Raakamäntyöljystä voidaan tuottaa biodieseliä. Raakamäntyöljystä erotetaan rasvahappoja tislamalla, josta edelleen regeneroimalla alkoholiin – tavallisemmin metanoli ja etanoli – saadaan haluttu polttoaine. Se on mäntyrasvahapon metyyliesteri, jonka kalorimetrisen lämpöarvo on 39,5 MJ/kg. Rasvahapon metyyliesteri on ominaisuuksiltaan dieselöljyn veroista ja vastaa rypsiä saatavaa RME:tä. Mäntyöljystä valmistetulla biodieselillä on hyvä kylmänkestävyys ja juoksevuus (viskositeetti on 20 °C:n lämpötilassa 255,9 mm<sup>2</sup>/s). Tämän biodieselin tiheys on 955 kg/m<sup>3</sup> (15 °C:n lämpötilassa), jähmepiste on –24 °C ja rikkipitoisuus alle 0,02. Mäntyöljypikeä (piki on mäntyöljyn tislauksen pohjatuote) ja joskus raakamäntyöljyä käytetään raskaan polttoöljyn korvikkeena (Sipilä 1994, Oasmaa et al. 1997).



Kuva 21. Pyrolyysiöljyn tuotantoprosessi (Solantausta et al. 1999).

Pyrolyysillä valmistettu puuöljy vaikuttaa tällä hetkellä lupaavimmalta biopolttonesteeltä käytettäväksi lämmitysöljynä (kuva 21). Pyrolyysissä puu lämmitetään hyvin nopeasti korkeaan lämpötilaan (500–600 °C), jolloin pääosa puuaineesta muuttuu kaasuiksi, jotka nesteytetään kaasujen lauhduttimessa. Muut tuotteet, lauhutumattomat kaasut ja hiiltojäännös käytetään yleensä prosessin energiaksi. Pyrolyysiöljyn lämpöarvo on kaksinkertainen puuhun verrattuna. Pyrolyysiöljyn saanto on 70 % kuivan puun painosta. Prosessi kestää 0,3–0,7 sekuntia. Lopputuotteesta viidesosa on vettä (15–30 %). Mineraaliöljyihin verrattuna bioöljyissä on runsaasti happea 45–50 p-%. Primääripyrolyysiöljy sisältää satoja kemiallisia yhdisteitä. Öljyssä ei ole juuri lainkaan hiilivetyjä, vaan suurimmat yhdisteet ovat orgaaniset hapot, aldehydit, ketonit, alkoholit ja esterit, fenolijohdannaiset, sokerit ja erilaiset muut hiilihydraattien pilkkoutumistuotteet. Sen lisäksi öljyssä on merkittävä osa (tyypillisesti 40–60 %) raskaita (lähinnä ligniiniperäisiä) molekyyliä. Pyrolyysiöljy ei ole stabiili, vaan esimerkiksi viskositeetti muuttuu ajan kuluessa. Pyrolyysiöljyn lämpöarvo on noin puolet mineraaliöljyn vastaavasta (14–18 MJ/kg kosteudesta riippuen). Alhaisempi lämpöarvo johtuu korkeasta happipitoisuudesta ja kosteudesta (15–30 %). Koska bioöljyn tiheys (1,15–1,25 kg/dm<sup>3</sup>, 15 C<sup>o</sup>) on korkeampi kuin mineraaliöljyillä (0,85–1,0 kg/dm<sup>3</sup>), on lämpöarvo tilavuusyksiköissä 60 % mineraaliöljyn lämpöarvosta. Bioöljy on hapanta (ph 2–3) ja happoluku on 50–100 mg KOH/g. Öljy aiheuttaa korroosiota mm. hiiliteräkseen ja alumiiniin, mutta ei ruostumattomaan teräkseen. Bioöljy ei sekoitu tavalliseen öljyyn. Tuhkapitoisuus on 0,1–0,2 %. Pyrolyysiöljyn raaka-aineeksi soveltuvat sahanpuru ja metsätähdehake. Taulukoissa 102 ja 103 on vertailtu

pyrolyysiöljyn ominaisuuksia suomalaisiin mineraaliöljyihin (Gust 1994, Oasmaa et al. 1997, Oasmaa & Cernik 1999, Sipilä 1994, taulukot 109–110).

*Taulukko 109. Pyrolyysiöljyjen koostumus ja vertailu mineraaliöljyihin (Gust 1994, Oasmaa & Chernik 1999).*

Varastot	Pyrolyysiöljyt				Mineraaliöljyt	
	Koivu <sup>1)</sup>	Mänty <sup>1)</sup>	Poppeli <sup>2)</sup>	Eril. biomassoja <sup>3)</sup>	Kevyt öljy 15	Raskas öljy 2000
Kiinteät, %	0,06	0,03	0,045	0,01–2	-	-
pH	2,5	2,4	2,8	2,0–3,7	-	-
Kosteus, %	18,9	17,0	18,9	15–30	0,025	< 7
Viskositeetti (50 °C), cSt	28	28	13,5	13–80	6	140–380
Tiheys, (15 °C), kg/dm <sup>3</sup>	1,25	1,24	1,20	1,1–1,3	0,89	0,9–1,02
Teholl. lämpöarvo, MJ/kg	16,5	17,2	17,4	13–18	40,3	39,5
Tuhka, p-%	0,004	0,03	0,01	0,004–0,3	0,01	0,1
CCR, p-%	20	16	15	14–23	0,2	19
C, p-%	44,0	45,7	46,5	32–49	-	85,7
H, p-%	6,9	7,0	7,2	6,9–8,6	-	10,0
N, p-%	<0,1	<0,1	0,15	0–0,2	-	0,6
S, p-%	0,00	0,02	0,02	0,00–0,05	0,2	1,0
O, p-%	49,0	47,0	46,1	44–60	0	0,7
Na+K, p-%	0,0029	0,0022	0,0006	0,0005–0,0500	-	0,0000015
Ca, p-%	0,005	0,0023	0,0004	0,0004–0,0600	-	-
Mg, p-%	0,0012	0,0005	0,0003	-	-	-
Leimahduspiste, °C	62	95	64	50–100	60	>65
Jähmettymispiste, °C	-24	-19		-39–9	-15	>15

1) tuotettu VTT Energiassa

2) tuotettu NREL:ssä USA:ssa

3) 150 erilaista bioöljyä

*Taulukko 110. Pyrolyysiöljyn ja kevyen polttoöljyn (Tempera 15) viskositeetti (cSt = mm<sup>2</sup>/s) (Gust 1994).*

Lämpötila, °C	Kevyt polttoöljy	Pyrolyysiöljy
20	15	100–150
40		35–50
50	8,3	7–15
60	5,2	5–10

# 11. Kaasumaiset polttoaineet

## 11.1 Maakaasu

Maakaasu on luonnon lähteistä sellaisenaan tai öljyn tuotannon yhteydessä erotettavissa oleva kaasumainen kevyt hiilivety. Pääosa maakaasusta käytetään Suomessa polttoaineena sekä vähäisissä määrin myös kemian teollisuuden raaka-aineena vedyn tuotantoon ja sen jatkoprosessointiin (Maakaasun koostumus ... 1987). Kaasumaisille polttoaineille yhteisiä ominaisuuksia ovat korkea syttymislämpötila, suuri palamisnopeus ja laaja syttymisalue.

Maakaasu on pääasiassa metaania sekä pieniä määriä etaania, propaania, butaania ja tyypeä sisältävä kaasuseos. Siperiasta Suomeen tuotavan maakaasun koostumus on esitetty taulukossa 111.

*Taulukko 111. Suomeen tuotavan maakaasun koostumus. Maakaasuyhdistys.*

Metaania CH <sub>4</sub>	> 98 %
Etaania C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 1 %
Propaania ja muita hiilivetyjä C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	> 0,5 %
Tyypeä, N <sub>2</sub>	< 1 %

Metaani on hajuton ja väritön hiilivety. Metaanin tehollinen lämpöarvo on 49,9 MJ/kg. Kaasun havaittavuuden parantamiseksi siihen sekoitetaan ennen siirtoputkistosta jakeluverkostoon luovuttamista hajustetta, yleisemmin tetrahydrotiofeenia tai merkaptania. Hajusteaineet ovat samoja kuin nestekaasussa yleisesti käytetään. Tetrahydrotiofeenia (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>S) sekoitetaan kaasun noin 15 mg/m<sup>3</sup>. Hajustettu maakaasu on aistittavissa, kun sitä on ilmassa vähintään 0,05–0,2 %. Kaasun rikkipitoisuus on alle 1 mg/m<sup>3</sup>. Hiilivetytuotetta pidetään rikittömänä, kun rikkipitoisuus on enintään 100 mg/m<sup>3</sup>.

Metaani on kaasumaisesta olomuodosta johtuen kokoonpuristuvaa. Tähän vaikuttavat kaasun paine ja lämpötila. Pyrkimys suuriin siirtopaineisiin (40–70 bar) on luonnollista, koska tällöin tullaan toimeen pienemmillä putkihalkaisijoilla. Suomen siirtoverkoston paine on enintään 54 bar.

Maakaasu on kaasumaisessa olomuodossa. Maakaasu voidaan nesteyttää normaali-ilmakehän paineessa jäädyttämällä se –160 °C:n lämpötilaan.

Maakaasun ylempi lämpöarvo on  $39,5 \text{ MJ/m}^3_n$  ja tehollinen lämpöarvo on noin  $35,6 \text{ MJ/m}^3_n$  ( $49,2 \text{ MJ/kg}$ ) eli noin  $10 \text{ kWh/m}^3_n$ .

Maakaasun keskeiset ominaisuudet ovat taulukossa 112 ja taulukossa 113 maakaasua on vertailtu nestekaasuihin.

*Taulukko 112. Maakaasun yleisiä ominaisuuksia. Maakaasuyhdistys ry.*

Ominaisuus	Maakaasu
Moolimassa (M)	16,0 kg/kmol
Moolitilavuus (Vm)	22,4 m <sup>3</sup> /kmol
Tiheys	0,72 kg/m <sup>3</sup> 162 °C Normaalitilassa, 0 °C, 1,01325 bar
Suhteellinen tiheys	0,56 (ilma = 1)
Sulamispiste	-182 °C
Kiehumispiste	-162 °C
Kriittinen lämpötila	-82 °C
Höyrystyslämpö	549 kJ/kg (lämpötilassa -162 °C)
Tiheys nestemäisenä	421 kg/m <sup>3</sup> (lämpötilassa -162 °C)
Tilavuussuhde	587 (tiheyksien suhde)
Kaasumaisen tuotteen kompressibiliteetti-kerroin	$k = 1,0016 - (\text{Pabs} / 476 \text{ bar})$ esim. 10 bar paineessa $k = 0,98$
Kastepiste (40 bar paineessa)	Talvella korkeintaan -5 °C Kesällä korkeintaan +0 °C
Ominaislämpö (0 °C)	$C_p = 2,15 \text{ kJ/kg K}$ $C_v = 1,63 \text{ kJ/kg K}$
Moolilämpöjen suhde	$C_p / C_v = 1,3$
Lämpötilan muuttuminen painetta alennettaessa	$\Delta T / \Delta p = 0,4 \text{ °C/bar}$
Viskositeetti (20 °C)	Dynaaminen $11,0 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}$ kinemaattinen $16,7 \times 10 \text{ m}^2/\text{s}$

## 11.2 Nestekaasut

Nestekaasua voidaan ottaa talteen erältä tuotantokentiltä samoin periaattein kuin maakaasua. Yleisimmin kuitenkin nestekaasut ovat öljynjalostuksen eräs tuoteryhmä, joka saadaan talteen raakaöljyn jalostusprosessista.

Nestekaasuja ovat *propaani* (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) ja *butaani* (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>). Nestekaasuksi nimitetty propaani ja butaani ovat useampien kevyiden hiilivetyjen (myös olfinien ja parafiinien) seoksia, mutta sellaisissa suhteissa, että seos vastaa käytännössä propania tai butaania.



Propanin ominaispaino on n. 2,0 kg/m<sup>3</sup><sub>n</sub> (suhteellinen tiheys ilmaan verrattuna 1,56) ja butaanin ominaispaino 2,7 kg/m<sup>3</sup><sub>n</sub> (suhteellinen tiheys n. 2,1). Ilman ominaispaino on 1,29 kg/m<sup>3</sup><sub>n</sub>.

Nestekaasun syttymisrajat ovat maakaasua ahtaamat. Propanin syttymisrajat ovat 2,4–9,5 ja syttymislämpötila n. 510 °C. Butaanin syttymisrajat ovat 1,7–8,4 ja syttymislämpötila n. 490 °C.

Propanin kalorimetrinen lämpöarvo on 101,6 MJ/ m<sup>3</sup><sub>n</sub> ja tehollinen lämpöarvo 93,6 MJ/ m<sup>3</sup><sub>n</sub>. ja vastaavat luvut butaanille ovat 133,0 MJ/ m<sup>3</sup><sub>n</sub> ja 122,8 MJ/ m<sup>3</sup><sub>n</sub>.

Maakaasun ja nestekaasujen ominaisuuksien vertailu on esitetty taulukossa 113.

*Taulukko 113. Maakaasun ja nestekaasun fysikaalisia lukuarvoja (Maakaasun koostumus ja ominaisuudet 1987).*

Ominaisuus	Maakaasu	Propani	Butaani
Molekyylipaino	16,04	≥44,09	58,12
Tiheys, kg/m <sup>3</sup>	0,723	2,01	2,70
Suhteellinen tiheys kaasumaisena	0,56	1,56	2,08
Kiehumispiste, °C	-161,5	-42,1	-0,5
Tehollinen lämpöarvo, kWh/m <sup>3</sup>	10	26	34
kWh/kg	13,65	12,8	12,65
MJ/m <sup>3</sup>	35,6	93,6	122,8
MJ/kg	49,2	46,3	45,7
Räjähdyksrajat, kaasua tilavuusprosentteina ilmassa	4,9–15,4	2,4–9,5	1,7–8,4
Syttymislämpötila, °C	650	510	490
Wobbeluku	47,6	74,9	85,3
Teoreettinen palamislämpötila ilmassa, °C	1 920	1 960	1 960
Palamisilman tarve (ilmakerroin = 1,0) m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> kaasua	9,7	23,9	31,0

### 11.3 Jalostamokaasut, masuuni- ja koksamokaasut

Raakarauta valmistetaan Suomessa masuuneissa. Masuunin polttoaineita ovat koksi ja öljy. Koksi valmistetaan kivihiilestä tehtaassa koksamossa. Koksautuessaan hiilestä vapautuu kaasua, joka on epäpuhtauksien poistamisen jälkeen arvokas kaasu. Kaasu koostuu pääasiassa vedystä, erilaisista hiilivedyistä, typestä, hiilimonoksidista ja hiilidioksidista. Ammoniakkia syntyy noin 8 g/m<sup>3</sup>. Kaasusta poistetaan epäpuhtauksia

kuten tervaa, ammoniakkia ja naftaleenia ennen polttokäyttöä. Masuunikaasut otetaan talteen ja käytetään hyväksi prosessin muissa vaiheissa, joko suoraan polttoaineena tai tehtaan voimalaitoksessa. Kaikki raakarauta jalostetaan nykyisin teräkseksi. Se tapahtuu happikonvertterissä, jossa sula raakarauta melloitetaan happikaasulla. Myös tästä prosessista voidaan ottaa talteen energiasisällöltään merkittäviä kaasuja (Energia Suomessa 1999).

Öljyn jalostuksen eri vaiheissa syntyy polttokelpoisia kaasuja ns. jalostamokaasuja, joiden ominaisuudet vaihtelevat. Kaasut sisältävät pääasiassa vetyä, etaania ja metaania. Taulukossa 114 on erilaisten prosessikaasujen tärkeimmät ominaisuudet.

*Taulukko 114. Jalostamokaasun, koksamokaasun ja masuunikaasun ominaisuuksia (Raiko et al. 1995).*

Ominaisuus	Jalostamokaasu	Koksamokaasu	Masuunikaasu
Tehollinen lämpöarvo, MJ/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	18,7–68,6	21,5	3,4
Metaani, CH <sub>4</sub> , mol-%	15,9–41,6	-	-
Etaani, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5,0–82,7	-	-
Propani, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ja muut hiilivedyt, C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	13,0–19,7	35,3	-
Vety, H <sub>2</sub>	0–50,9	53	3,2
Typpi, N <sub>2</sub>	8,4	3,4	57,6
Hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	2,2	1,8	13,0
Hiilimonoksidi, CO		6,3	26,2

## 11.4 Biokaasut

Biokaasu on orgaanisen aineksen mädäntymisen seurauksena syntyvä kaasu, joka koostuu pääosin metaanista (35–80 %) ja hiilidioksidista (20–65 %). Metaani ja hiilidioksidi ovat kumpikin värittömiä ja hajuttomia kaasuja. Lähteestä riippuen kaasussa on pienempinä pitoisuuksina rikkivetyä (0–2 %), typpeä (0–25 %), kloori- ja fluoriyhdisteitä. Biokaasun lämpöarvo on 4–6 kWh/m<sup>3</sup><sub>n</sub> (14,4–21,6 MJ/m<sup>3</sup><sub>n</sub>). Sellaisenaan poltettavaksi ja myös moottorin polttoaineeksi soveltuvan biokaasun tuotannossa on kyse sekä energiantuotannosta että ympäristönsuojelusta kasvi-huonekaasujen ja hajuhaittojen vähenemisen muodossa.

Biokaasun raaka-aineeksi soveltuvat varsin erilaiset orgaaniset massat. Kun metaanibakteerit toimivat parhaiten vesipitoisessa ympäristössä, menetelmä soveltuu erityisesti hyvin lietemäisen jätteiden käsittelyyn. Tällaisia jätteitä muodostuu maatilataloudessa (lietelanta), kunnallisessa jätevesipuhdistamoissa, elintarviketeollisuudessa jne. Orgaanisen aineksen syöttöä voidaan tehostaa lisäämällä lietteisiin

esimerkiksi kiinteätä kasvimassaa siten että seoksen kuiva-ainepitoisuus nousee lähelle 10 %:a tai jopa hieman sen yli.

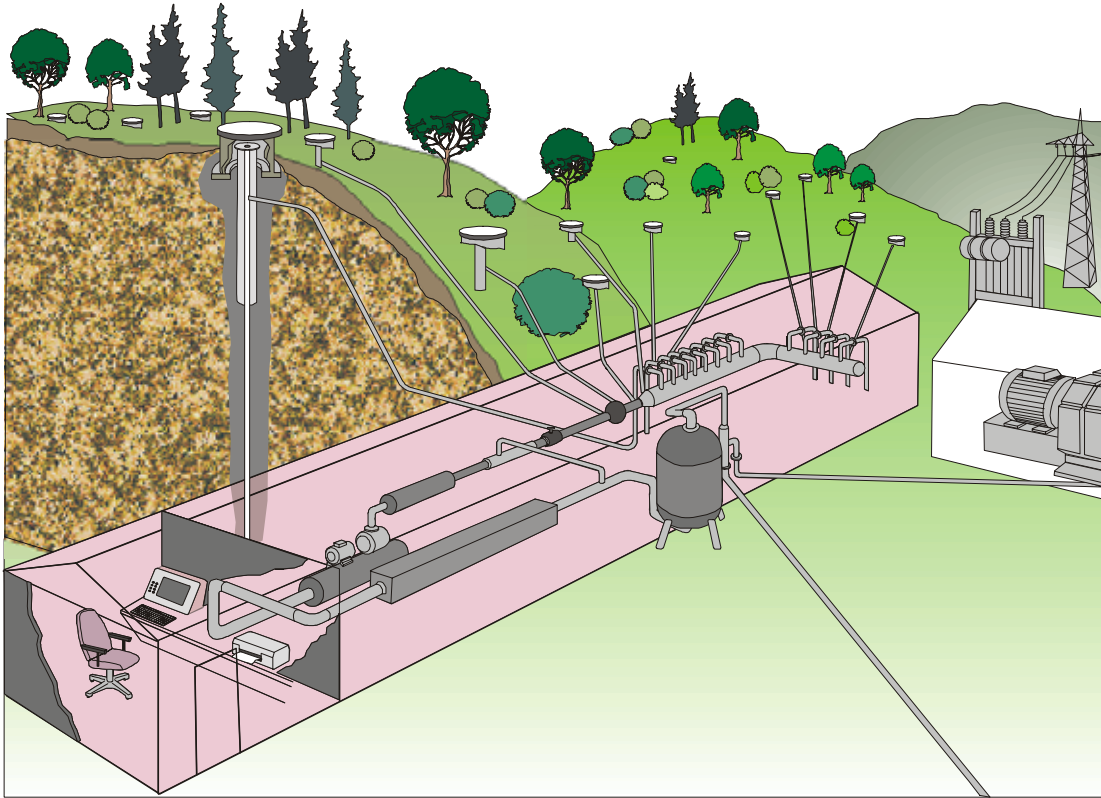
Anaerobisilla tekniikoilla tarkoitetaan kontrolloitua määrän orgaanisen aineksen mikrobiologista tai biokemiallista hajoamista hapettomissa olosuhteissa. Kyseinen reaktio on yksi maailman vanhimmista, se perustuu erittäin alkeellisten bakteerien toimintaan, ja sitä kutsutaan mädätykseksi, biokaasutukseksi tai biometanoinniksi. Biokaasua syntyy kontrolloidusti reaktoreissa tai kontrolloimattomasti kaatopaikoilla.

Yksi keskikokoinen suomalaisen kaupungin *kaatopaikka* tuottaa metaanikaasua noin 200–400 m<sup>3</sup>/h. Kaatopaikkojen lisäksi myös jätevedenpuhdistamojen ja teollisuuden mädättämöt tuottavat kaasua huomattavia määriä. 1 kWh sähkön ja 1,23 kWh lämmön tuottamiseen tarvitaan esim. 5–7 kg biojätettä, 5–15 kg kotitalousjätettä, 8–12 kg lantaa tai orgaanista jätettä, tai 4–7 m<sup>3</sup> jätevettä. Eli tonni kotitalousjätettä tuottaa 150–200 m<sup>3</sup> hyödynnettävää kaatopaikkakaasua 20 vuoden kuluessa.

Kaatopaikkakaasu sisältää lähinnä metaania, CH<sub>4</sub> (55–65 %) ja hiilidioksidia, CO<sub>2</sub> (35–45 %). Pieninä pitoisuuksina kaasussa esiintyy lisäksi useita kloori- ja fluorihilivetyjä sekä rikkiyhdisteitä, jotka aiheuttavat kaatopaikkakaasulle ominaisen epämiellyttävän hajun.

Ulkoilmaan päästessään kaatopaikkakaasu on herkästi syttyvää, haisevaa ja ympäristöä saastuttavaa. Lisäksi metaanikaasu, CH<sub>4</sub> tuhoaa otsonikerrosta ja edistää kasvihuoneilmiötä moninverroin tehokkaammin kuin hiilidioksidi. Metaani on palaessaan erinomainen energiakaasu, jonka palamisjätteenä syntyy vain hiilidioksidia ja vettä. Metaani aiheuttaa lisäksi kaatopaikoilla tulipaloja.

Kaatopaikkakaasun kerääminen tapahtuu jätepenkereeseen asennettujen siiviläputkien avulla, jotka voidaan sijoittaa joko pystyyn (imukaivot) tai vaakatasoon (salaojat) (kuva 22). Myös yhdistettyjä rakenteita ja louhesalaojia (tunnelit) käytetään. Suomen olosuhteissa pystykaivot ovat osoittautuneet tehokkaiksi korkeilla kaatopaikoilla, kun taas salaojat soveltuvat alueille, joissa täyttökorkeus on alle kuusi metriä. Molemmat järjestelmät soveltuvat kaasun talteenottoon myös käytössä olevalla kaatopaikalla.



Kuva 22. Kaatopaikkakaasun keräys ja käyttö moottorin polttoaineena.

Kaupungeissa ja asutustaajamissa viemärlaitosten yleistyessä oli välttämätöntä ryhtyä tehostamaan myös jätevesien puhdistamista. Organisten aineiden hajottajina alettiin käyttää aerobisten bakteerien ohella anaerobisia bakteereja. Rakennettiin suljettuja biokaasureaktoreita ja syntyvää biokaasua alettiin ottaa hyötykäyttöön. *Puhdistamolietteen mädätyksessä* syntyy humusta ja biokaasua. Syntyvän humuksen määrä on 30–40 % alkuperäisen lietteen painosta, ja biokaasun kertymä on 60–80 m<sup>3</sup> käsiteltyä lietetonna kohti. Muodostuvan biokaasun metaanipitoisuus on 60–70 %, ja sen lämpöarvo on 6–6,5 kWh/m<sup>3</sup>. Puhdistamon koosta ja paikallisista olosuhteista riippuen tuotettu biokaasu voidaan käyttää joko pelkän lämmön tai sekä lämmön että sähkön tuotantoon.

Vaasan alueella Mustasaaren kunnassa toimii Suomen ainoa kiinteiden yhdyskuntajätteiden kompostijaetta (biojätteitä) ja mekaanisesti kuivattua *yhdyskuntalietettä mädättävä laitos* (taulukko 115).

*Taulukko 115. Vaasan laitoksen teknisiä tietoja ja biokaasun ominaisuuksia.*

Kapasiteetti	500–200 000 tonnia/a
Tilantarve	2 500 m <sup>2</sup> / 10 000 t/a
Viipymäaika	termofiilinen 10 päivää mesofiilinen 20 päivää
Kokonaiskiintoainepitoisuus	10–15 %
Biokaasun bruttotuotanto	100–150 m <sup>3</sup> /tonni biojätettä
Biokaasun nettotuotanto (oman kulutuksen jälkeen)	70–80 %
Metaanipitoisuus	60–70 % (30–40 % CO <sub>2</sub> )
Biokaasun lämpöarvo	6–7 kWh/m <sup>3</sup> biokaasua
Määrän väheneminen	60 %
Painon pieneneminen	50–60 %
Kompostin laatu	riippuu jätteen laadusta ja jälkikäsittelymenetelmästä

*Biokaasutus karjan – esimerkiksi naudan tai sian – lietelannasta tuo merkittävän avun maatalouden kannattavuuteen. Kotieläinten jätteiden tuotanto lietelantana on Suomessa yli 10 miljoonaa tonnia ja energiana noin 2 milj. MWh. Kaasua syntyy noin 20 m<sup>3</sup> yhdestä kuutiometristä lietelantaa vastaten noin 6,5 kWh energiaa. Yksi kotieläinliete sisältää 5–7 % orgaanista kuiva-ainetta (taulukot 116 ja 117).*

*Taulukko 116. Biokaasun saanto maatalousjätteistä (Suomen biokaasukeskus, Sankari 1994).*

Perusaine	Saanto, m <sup>3</sup> /kg kuiva-ainetta
Ruoho (runsaasti lannoitettu)	0,6–0,7
Perunan lehdet ja varret	0,45–0,55
Sokerijuurikkaan lehdet/sokerijuurikas	0,56/0,88*
Olki	0,25–0,35
Puiden lehdet	0,35–0,66
Sinimailainen	0,77*
Järviruoko	0,44*
Energiapaju	0,49*
Karjan lanta	0,4–0,7

\* biokaasu m<sup>3</sup>/kg orgaanista ainetta (tuhkaton ja vedetön aines).

*Taulukko 117. Eläinten tuottamat orgaanisen jätteen määrät (Suomen biokaasukeskus).*

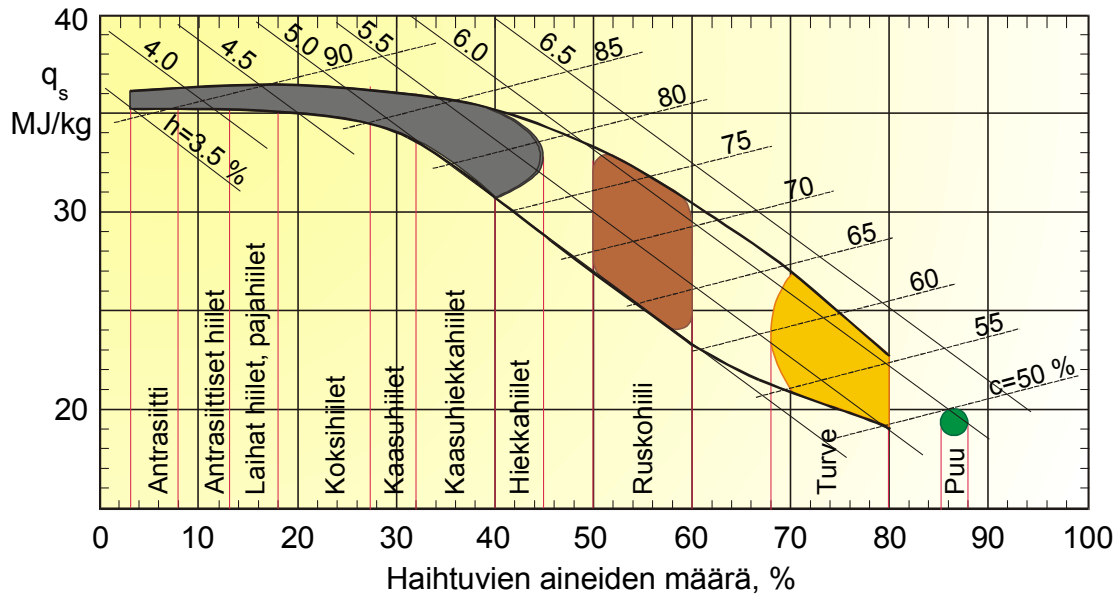
Eläin	Lantamäärä, kg <sub>k.a</sub> /a	Biokaasua, m <sup>3</sup> /a	Sähköä kWh
Lehmä	1 600	640–1120	3392–5936
Sika	104	42–73	223–387
Emakko	336	136–235	721–1246
Kettu	18	7–13	37–69
Supi	20	8–14	42–74
Minkki	7,5	3–5	16–27
Kana	6,2	2–4	13–23

Biokaasun varastointi on vaikeata (raaka-aineen varastointi on helpompaa). Tavallisin varastointitapa on kaasukellovarasto. Taloudellisesti voidaan varastoida vain noin yhden päivän kaasuntuotanto, joten tehokas hyväksikäyttö edellyttää, että kaasun sisältämä energia voidaan jatkuvasti hyödyntää kannattavalla tavalla.

Biokaasutuksen jälkeen otetaan talteen jäljelle jäävä ravinteikas orgaaninen aines, jota käytetään joko lietteenä tai kuivattuna lannoitteeksi. Biokaasutuksen ansiosta raaka-aineiden ikävä haju ja taudinaiheuttajabakteerit ovat hävinneet ja menetelmä vähentää näinollen jätteen aiheuttamaa pinta- ja pohjavesien pilaantumisvaaraa (Korkman 1999).

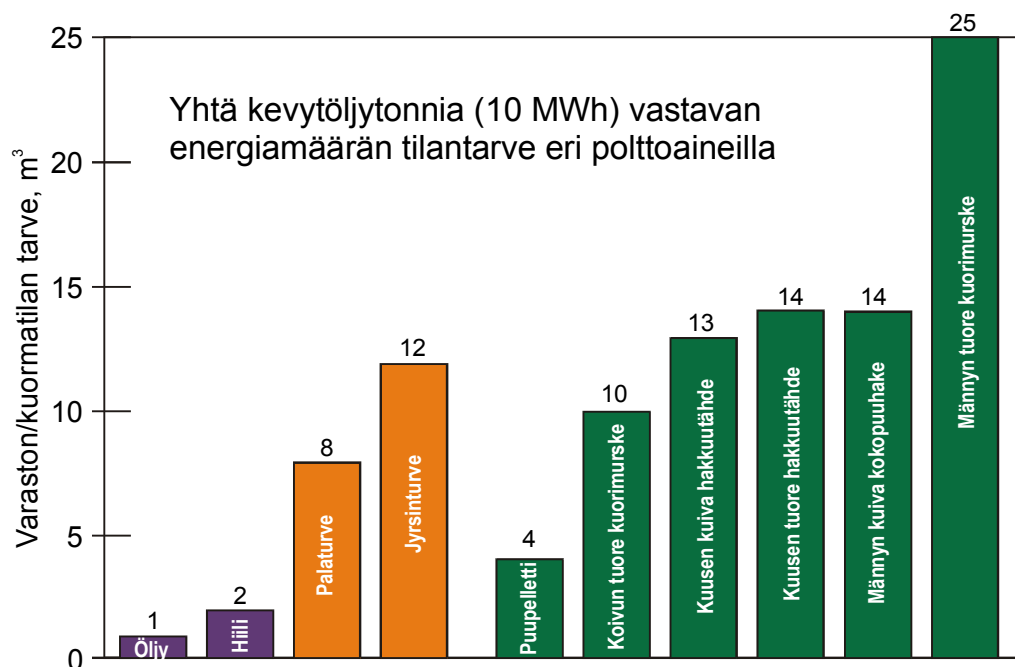
## 12. Polttoaineiden ominaisuuksien vertailu

### YLEISKATSAUS KIINTEIDEN POLTTOAINEIDEN PÄÄOMINAISUUKSIIN



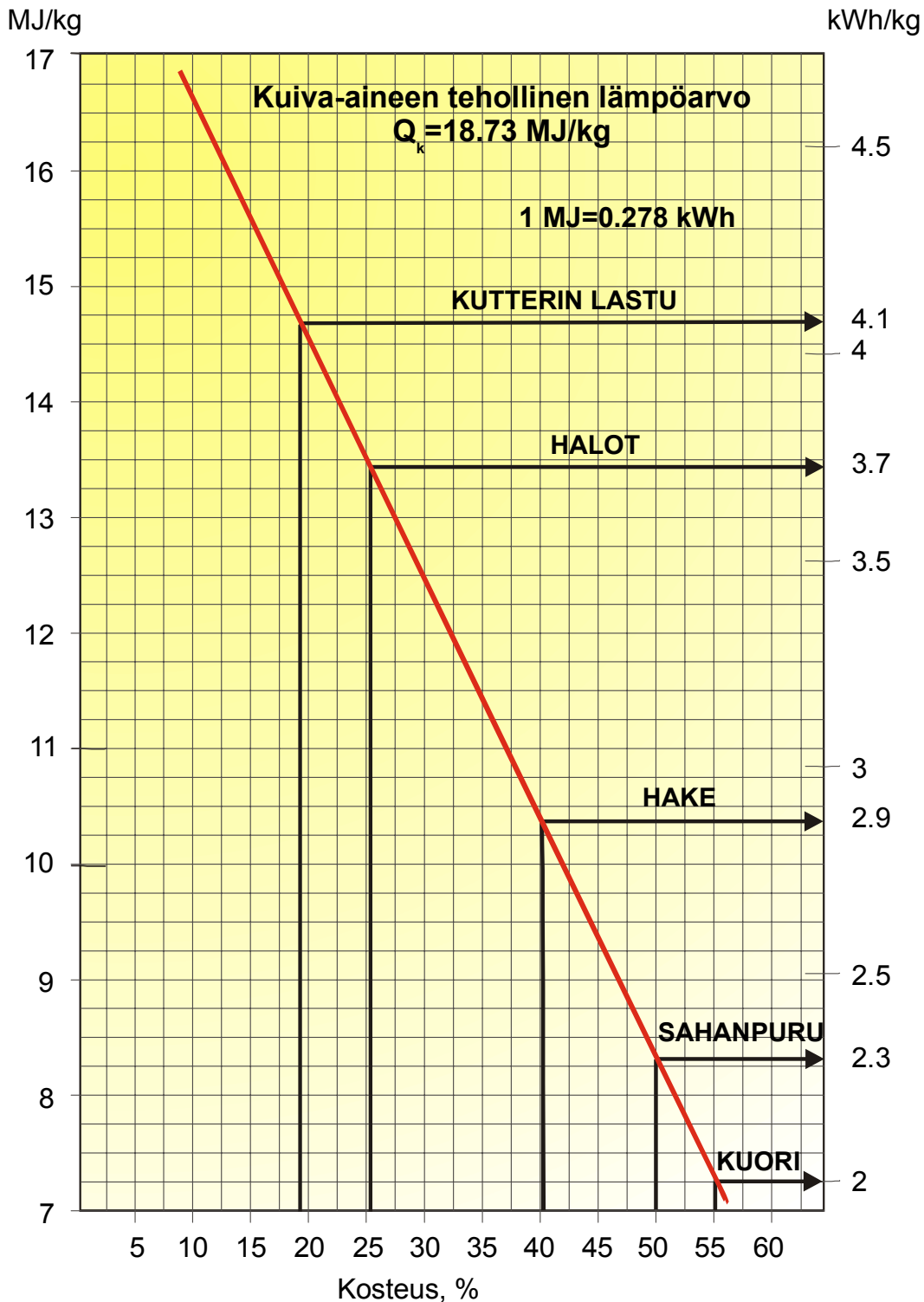
Lähde: Tekniikan käsikirja 2

Kuva 23. Eri polttoaineiden hiili- ja vetypitoisuuksien vertailu.



Kuva 24. Polttoaineiden vertailu tilavuuden ja energiamäärän perusteella (Hakkila 2000).

## PUUN TEHOLLISEN LÄMPÖARVON RIIPPUVUUS KOSTEUEDESTA



Kuva 25. Puupolttoaineen tehollisen lämpöarvon (MJ/kg tai kWh/kg) vertailu kosteuden perusteella. Kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona on käytetty 18,73 MJ/kg.



Taulukko 118. Biopolttoaineiden luokittelu haitallisten aineiden perusteella (Fortum Engineering).

Polttoaine	Korkea alkaalipitoisuus (Na + K)	Korkea klooripitoisuus	Korkea rikkipitoisuus	Korkea kosteuspitoisuus	Korkea tuhkapitoisuus
Vaneritähdehake	X				
Metsätähde	X				
Oliivin kivet	X				
Haavan kuori	X				
Kumipuu	X	X			
Oljet	X	X			
Ruokohelpi	(X)	(X)			
REF		X			
RDF		X		(X)	(X)
Kuori				X	
Turve			(X)		
Bioliete	X	(X)		X	X
Primääriete				X	X

(X) riippuu polttoaineesta.

## 12.1 Puupolttoaineet

Taulukko 119. Eri puupolttoaineiden ominaisuuksien vertailu (Impola 1998, Alakangas et al. 1997, Pirinen 1996).

Ominaisuus	Metsätähdehake	Kokopuuhake	Rankahake	Kantohake	Havupuunkuori	Koivunkuori	Pilke
Kosteus, % (hakkeet kaatotuoreena)	50–60	45–55	40–55	30–50	50–65	45–55	20–25
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	18,5–20	18,5–20	18,5–20	18,5–20	18,5–20	21–23	18,5–19,0
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	6–9	7–10	7–11	8–13	5–9	8–11	13,4–14,5
Irttoisuus saapumistilassa, kg/i-m <sup>3</sup>	250–400	250–350	250–350	200–300	250–350	300–400	240–320
Energiatiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,7–0,9	0,7–0,9	0,7–0,9	0,7–1,0	0,5–0,7	0,6–0,9	1,35–1,6 MWh/p-m <sup>3</sup>
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, %	1–3	1–2	0,5–2	1–3	1–3	1–3	1,2
Hiilipitoisuus kuiva-aineessa C, %	48–52	48–52	48–52	48–52	48–52	48–52	48–52
Vetytitoisuus kuiva-aineessa (H), %	6–6,2	5,4–6	5,4–6	5,4–6	5,7–5,9	6,2–6,8	6,0–6,5
Rikkipitoisuus kuiva-aineessa (S), %	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Typpipitoisuus kuiva-aineessa (N), %	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	0,3–0,5	0,5–0,8	0,3–0,5
Ominaisuus	Puutähdehake	Sahahake	Sahanpuru	Kutterinlastu	Hiontapöly	Puupelletti	Vaneritähde
Kosteus, p-%	10–50	45–60	45–60	5–15	5–15	8–10	5–15
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	18,5–20	18,5–20	19–19,2	19–19,2	19–19,2	19,0–19,2	19–19,2
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	6–15	6–10	6–10	16–18	16–18	16,8	16–18
Irttoisuus saapumistilassa, kg/i-m <sup>3</sup>	150–300	250–350	250–350	80–120	100–150	500–650	200–300
Energiatiheys, MWh/i-m <sup>3</sup>	0,7–0,9	0,5–0,8	0,45–0,7	0,45–0,55	0,5–0,65	2,9–3,4	0,9–1,1
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, %	0,4–1	0,5–2	0,4–0,5	0,4–0,5	0,4–0,8	0,4–0,5	0,4–0,8
Hiilipitoisuus kuiva-aineessa C, %	48–52	48–52	48–52	48–52	48–52	48–52	48–52
Vetytitoisuus kuiva-aineessa (H), %	5,4–6,4	5,4–6,4	6,2–6,4	6,2–6,4	6,2–6,4	6,2–6,4	6,2–6,4
Rikkipitoisuus kuiva-aineessa (S), %	< 0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Typpipitoisuus kuiva-aineessa (N), %	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5

## 12.2 Muut kiinteät polttoaineet ja metsäteollisuuden polttoaineet

Taulukko 120. Kierrätyspolttoaineiden (ks. myös taulukko 80), oljen ja ruokohelpin (ks. myös taulukko 72) ominaisuuksien vertailu (Lindh 1995, VTT Energian analyysit).

Ominaisuus	Kierrätyspuu	Pakkausjäte	Kierrätyspolttoaine*	REF-pelletti	Kotitalouden kuivajäte	Olki	Ruokohelpi syyskorj.	Ruokohelpi kevät
Kosteus,%	15–35	7–25	15–35	3–5	25–36	17–25	20–30	15–20
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	18–21	18–26	20–40	22–26	19,9–23,9	17,9–18,7	18,0–18,9	18,4–18,7
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	18–19	17–25	17–37	21–25	18,5–23,4	17,4	16,7–17,7	17,1–17,5
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	12–16	10,4–10,9	13–35	20–24	11,7–6,9	12,4–14,0	11,0–13,7	13,2–14,2
Irttiheys saapumistilassa, kg/l-m <sup>3</sup>	150–250	100–150	150–250	300–500	150–200	80	80	70
Energiatehous, MWh/m <sup>3</sup>	0,6–0,8	-	0,7–1,0	2,0–2,8	0,7–1,0	0,3–0,4	0,2–0,3	0,3–0,4
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, %	1–5	5–15	3–7	4–10	5,3–16,1	5	5,1–7,1	6,2–7,5
Hiilipitoisuus kuiva-aineessa C, %	48–51	34,5–35,6	45–56	50–60	47,1–53,5	45–47	44,6–46,7	45,5–46,1
Vetytitoisuus kuiva-aineessa (H), %	6–6,5	4,2–4,5	5–9	6,0–8,5	6,1–7,2	5,8–6,0	5,6–5,9	5,7–5,8
Rikki-pitoisuus kuiva-aineessa (S), %	<0,2	0,02–0,06	0,05–0,20	0,10–0,15	0,08–0,22	0,01–0,03	0,06–0,25	0,08–0,13
Typpi-pitoisuus kuiva-aineessa (N), %	0,1–0,8	0,08–0,1	0,2–0,9	0,2–1,5	0,67–1,07	0,4–0,6	0,7–1,1	0,65–1,04
Natrium, Na %	0,0005–0,001	0,002–0,003	0,001–0,0045	0,002–0,0035	0,001–0,0048	0,01–0,6	<0,001	<0,03
Kalium, K, %	0,0007–0,0009	0,001–0,0055	0,001–0,0015	0,001–0,0025	0,0008–0,0038	0,69–1,3	1,2–2,3	0,3–0,5
Kloori, Cl, %	<0,1	<0,1	0,03–1,0	0,1–0,9	0,2–1,5	0,14–0,97	0,4	0,09

\* puuta, muovia ja pakkauksia sisältävä seos

Taulukko 121. Turpeen, kivihiilen, mustalipeän ja lietteiden ominaisuuksien vertailu (Taipale 1996, Vakkilainen 1994, Isännäinen 1994).

Ominaisuus	Jyrsinturve	Palaturve	Kivihiili (keskiarvo)	Mustalipeä	Bioliete	Siistausliete	Primääriliete	Seosliete*
Kosteus, %	48,5	38,9	10	65–80 % kuiva-aine- pitoisuus	80	< 60	60–70	70
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	22,1	22,5	28,8	13–15	-	6,9–15,0		
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	20,9	21,3	27,9	10–13	17,4	8–13		
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	9,66	11,9	24,8	-	0	2,9	2,3	2,5
Irtotiheys saapumistilassa, kg/i-m <sup>3</sup>	340	389		-				
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, %	5,1	4,5	14	-	10	30–60	0,4	10–30
Hiilipitoisuus kuiva- aineessa C, %	52–56	52–56	76–87 (71,5)	35–38	45	25–45	44	45
Vetytitoisuus kuiva-aineessa (H), %	5,0–6,5	5,0–6,5	3,5–5,0 (4,5)	3,5–4,5	6	2,7–5,5	5	5,5
Rikkipitoisuus kuiva-aineessa (S), %	0,05–0,3	0,05–0,3	<0,5	3,5–6,0	1,2	0,1–0,3	0,1	0,45
Tyypipitoisuus kuiva-aineessa (N), %	1,0–3,0	1,0–3,0	0,8–1,5 (1,3)	0,05–0,20	0,4	0,1–0,9	0,4	
Natrium, Na	0,007	0,007	0,012	18–23		0,1–0,3		2–4
Kalium, K	0,02	0,02	0,003	1–6		0,2–0,5		0,6–0,7
Fosfori, P			0,01	0,01			0,02	1,9–2,5
Kloori, Cl, %	0,02–0,06	0,02–0,06	0,10	0,1–2,5	1,5	0,1–0,6	0,5	0,75

\* primääri-, bio- ja kuorimolietteen seos. Seoslietteen ominaisuuksiin vaikuttaa biolietteen osuus.

## 12.3 Nestemäiset polttoaineet

Taulukko 122. Kevyen, raskaan ja pyrolyysiöljyn ominaisuuksien vertailu (Raskaan polttoöljyn ... 1998, Gust 1994, Oasmaa et al. 1997).

Ominaisuus	Kevyt öljy, kotitalous	Kevyt öljy, suurkiinteistöt	Raskas öljy	Pyrolyysiöljy
Kosteus,%	0,01–0,02	0,01–0,02	0,3–0,7	15–30
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg ja MJ/l	42,5–42,9 kesä 36,3 MJ/l talvi 35,9 MJ/l	36,7 MJ/l	41,0–41,3	18–23
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	42,4–42,9	42,4–42,9	40,9–41,2	15–19
Irttoiheys saapumistilassa, kg/l-m <sup>3</sup>	845 kesä, 840 talvi (15 °C)	870	920–1020 (15 °C)	1180–1220
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, %	0,01	0,01	0,04	0,1–0,3
Hiilipitoisuus kuiva-aineessa C, %	86,2	86,2	88,4	32–49
Vetytitoisuus kuiva-aineessa (H), %	13,7	13,7	10,1	6,9–8,6
Rikkipitoisuus kuiva-aineessa (S), %	0,005–0,2	0,1	0,8–0,95	0,006–0,05
Tyypipitoisuus kuiva-aineessa (N), %	0,01–0,03	0,01–0,03	0,3–0,4	0–0,1
Kloori, Cl	-	-	-	
Natrium, %	-	-	<0,00004	Na+K
Kalium	-	-	-	0,0005–0,0500
Nikkeli, %	-	-	<0,02	-
Vanadiini, V, %	-	-	0,030–0,045	-

## 12.4 Kaasumaiset polttoaineet

Taulukko 123. Maakaasun, biokaasun ja jalostamo-, koksamo- ja masuunikaasujen ominaisuuksien vertailu (Maakaasuyhdistys, Suomen biokaasukeskus, Raiko et al. 1995).

Ominaisuus	Maakaasu	Biokaasu	Jalostamo- kaasu	Koksamo- kaasu	Masuuni- kaasu
Kosteus, %	Ka 70–80	2			
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/ m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	39,5				
Tehollinen lämpöarvo, MJ/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	35,6	14,4 –21,6	18,7–68,6	21,5	3,4
Irtotiheys, kg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	0,72 (0 °C, 1,01325 bar)				
Metaani, CH <sub>4</sub> , mol-%	>98	35–80	15,9–41,6	-	-
Etaani, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	>1	-	5,0–82,7	-	-
Propaani, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ja muut hiilivedyt, C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	<0,5	-	13,0–19,7	35,3	-
Vety, H <sub>2</sub>		0–2 % rikkivety	0–50,9	53	3,2
Typpi, N <sub>2</sub>	<1	0–25	8,4	3,4	57,6
Hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	0,03	20–65	2,2	1,8	13,0
Hiilimonoksidi, CO				6,3	26,2

## 13. Yhteenveto

Suomen omat polttoainevarat ovat turpeessa ja puussa. Turpeen käyttö on lisääntynyt 1970-luvulta lähtien. Pääturvepolttoaineet ovat olleet jyrsin- ja palaturve. Lisäksi 1980-luvulla tuotettiin turvepellettejä, -brikettiä ja -koksia, joiden tuotanto on lopetettu Suomessa.

Puupolttoainetta on perinteisesti käytetty kotitalouden tulisijoissa ja lämmityskattiloina pilkkeenä. Käyttö on vähentynyt 1975 vuodesta lähtien ja vakiintunut noin 5,6 miljoonan kiintokuutiometrin tasolle (n. 1,1 Mtoe). Vaikka puu on perinteinen polttoaine sille on kehitetty laatuluokitus vasta 1990-luvun puolivälissä.

Haketta on käytetty vielä melko vähän runsaasta potentiaalista huolimatta. Käyttöön ovat vaikuttaneet polttoaineen hinta sekä laatu. Korkeampilaatuisen (palakoko, kosteus, lämpöarvo) kokopuu- tai rankahakkeen tuotantokustannukset ovat olleet kalliimmat kuin esim. turpeen ja kivihiilen hinta. Viime vuosina on kehitetty uutta korjuutekniikkaa erityisesti päätehakuista saatavan hakkuutähdehakkeen korjuuseen, koska sen tuotanto voidaan integroida teollisuuden ainespuun hankintaan. Käyttö on noin 0,6 miljoonaa m<sup>3</sup> vuodessa (0,1 Mtoe). Hakkuutähdehakkeen käytön ongelmana on talvella mm. kosteus, pienissä laitoksissa palakoko, höyrykattiloissa alkaalit, jos hakkuutähde korjataan neulasineen. Toisaalta puupolttoaineilla on alhainen rikki- ja hiilipitoisuus ja ne eivät lisää hiilidioksidipäästöjä.

Metsäteollisuus on perinteisesti hyödyntänyt tuotantoprosessin sivutuotteiden kuten kuoren, sahanpurun jne. energiantuotantoon. Polttoaineet on perinteisesti käytetty muiden polttoaineiden kanssa ns. seospoltona. Vuonna 1998 kehitettiin hakkeen, sahanpurun ja kuoren käyttöä varten oma laatuluokitus. Erilaiset metsäteollisuuden lietteet on joko viety kaatopaikoille tai poltettu kuorikattilassa lietteiden ominaisuuksista riippuen.

Yhdyskuntien lietteitä ja maatalouden lietteitä on hyödynnetty biokaasun valmistukseen. Kun kaatopaikkakaasun keräys on lainsäädännön mukaan pakollista voidaan myös tätä biokaasua käyttää energiantuotantoon. Ongelmana on ollut löytää hyödyntämiskohde riittävän läheltä.

EU:n uusien määräyksien myötä jätteiden sijoittaminen kaatopaikoille vaikeutuu ja yhdyskunnista ja teollisuudesta on saatavana lajiteltua kuivajätettä, josta voidaan valmistaa kierrätyspolttoaineita. Suomen lainsäädäntö sallii näiden polttoaineiden seospolton ja teollisuuden ja yhdyskuntien höyrykattiloissa onkin polttoaineita jo hyödynnetty. Polttoaineen laatuominaisuudet vaihtelevat paljon alkuperän, jätefraktion

ja käsittelyn mukaan. Myös näillä polttoaineilla on ollut laatuohje koekäytössä ja vuoden 2000 alussa on otettu käyttöön kierrätyspolttoaineiden SFS-standardi.

Suomeen tuodaan kivihiihtä Puolasta, Venäjältä, Indonesiasta, Norjasta, Kolumbiasta, Venezuelasta sekä muutamista muista maista. Vuotuinen käyttö on ollut 4–6,5 miljoonaa tonnia vuodessa. Kivihiihiä käytetään pääkaupunkiseudun ja muiden rannikkokaupunkien voimalaitoksissa. Kivihiihten ominaisuuksista julkaistaan vähän tietoa. Yleensä julkaistut tiedot ovat seospoltosta, jossa kivihiihten lisäksi on käytetty turvetta ja/tai kierrätyspolttoaineita lähinnä pakkauksista tehtyä polttoainetta.

Suomeen tuodaan raakaöljyä sekä valmiita öljytuotteita. Vuotuinen kevyen ja raskaan öljyn käyttö on ollut yhteensä noin 4 miljoonaa tonnia. Suomessa Fortum Oil and Gas jalostaa erilaisia polttoöljyjä. Maakaasun käyttö on lisääntynyt 1990-luvun ja se tuodaan Venäjältä.

Viime vuosina polttoaineiden ominaisuuksia on erityisesti tutkittu niiden polttoaineiden osalta, jotka eivät vielä ole markkinoilla mm. ruokohelpi, järviruoko, pyrolyysiöljy. Ruokohelpeä, olkea ja järviruokoa on kokeiltu turpeen kanssa seospolttoaineena. Ruokohelpeä viljellään noin 1000 hehtaarin alalla. Pyrolyysiöljyn kehitystyö jatkuu ja tärkeänä tutkimuskohteena on ominaisuuksien parantaminen.



## Lähdeluettelo

- AHOKAS, J. 1983. Energiantuotanto maatilatalouden omista energialähteistä. Vihti, Vakola, Tutkimusselostus nro 33. 66 s.
- AHOKAS, J., STÅHLBERG, P. & MAASKOLA, I. 1983. Olki polttoaineena. Vihti, Vakola, Tutkimusselostus nro 30. 88 s. + liitt. 10 s.
- ALAKANGAS, E. 1992. Taloustulisijojen käyttö. Helsinki, Rakennustieto Oy. 68 s
- ALAKANGAS, E. & HÖLTTÄ, P. 1998. Turpeentuotantotekniikka. Koulutusaineisto. Jyväskylä, VTT Energia. 93 s.
- ALAKANGAS, E., KANERVIRTA, M.-L. & KALLIO, M. 1987. Kotimaisten polttoaineiden ominaisuudet. Käsikirja. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 762. 125 s.
- ALAKANGAS, E., SAURANEN, T. & VESISENAHO, T. 1999. Hakkuutähteestä polttihakkeeksi. Koulutusmateriaali. Jyväskylä, VTT Energia. 82 s.
- ALÉN, R. 1998. Relationships between the chemical composition and the combustion properties of softwood and hardwood kraft black liquors. LIEKKI 2 Technical Review 1993–1998. Turku, Åbo Akademi. Vol. 2. S. 829–854.
- ANTIKAINEN, J. 1998. Biopolttoaineiden monipuolistuminen – haaste kattilavalmistajille. Puuenergia 3/98, s. 12–13.
- ARPIAINEN, V., KYLLÖNEN, H. & NISSLÄ M. 1986. Turpeen, puun, kuoren ja ligniinin flash-pyrolyysi. Osa 1. Tutkimusten nykytila ja arvio teollisista sovellusmahdollisuuksista. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 455. 120 s. + liitt. 47 s.
- BACKMAN, R., HUPA, M. & SÖDERHJELM, L. 1995. Mustalipeän polttotekniset ominaisuudet. Suomen Soodakattilayhdistys 24.2.1995.
- BERGGREN, B., KALMARI, A. & LEINO, P. 1980. Classification and properties of peat for fuel purposes. Helsinki, Energiataloudellinen Yhdistys & Ekono Oy, Publ. 158. 30 s.
- BJÖRKLUND, T. 1984. Tervalepän biomassa. Helsinki. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 151. 71 s.

BJÖRKLUND, T. & FERM, A. 1982. Pienikokoisen koivun ja harmaalepän biomassassa ja tekniset ominaisuudet. Helsinki. Folia Forestalia 500. 37 s.

BLOMQVIST, G., FREDRIKSSON, D. & THUN, R. 1984. Egenskaper och testingsmetoder för energitorv. Stockholm. Statens energiverk, projektrapporter, Torv-84/1. 250 s. + liitt. 25 s.

CARPENTER, A. M. 1992. Coal classification. Lontoo, IEA Coal Research IEACR/12. 45 s.

EKMAN, E. 1979. Kiinteiden polttoaineiden koostumus ja muut ominaisuudet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, poltto- ja voiteluainelaboratorio, Tiedonanto 23. 23 s.

ELECTROWATT-EKONO 1999a. Turpeen käyttö vuonna 1998 ja käyttöarvio vuodelle 1999. Espoo, Raportti 60K01412-Q060-021. 9 s + liitt. 21 s.

ELECTROWATT-EKONO 1999b. Jyrsinturpeen laatu vuosina 1997 ja 1998. Espoo, Raportti 60K01412-Q060-023. 47 s.

Energia Suomessa 1999. Helsinki, VTT Energia & Edita. 368 s.

Energiatilastot 1998. Suomen virallinen tilasto XLII. Helsinki, kauppa- ja teollisuusministeriö. 126 s.

FAGERNÄS, L., RANTA, J., NIEMINEN, M., ASPLUND, D. & NYRÖNEN, T. 1980. Turpeen kosteuden mittaaminen. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, poltto- ja voiteluainelaboratorio, Tiedonanto 30. 122 s.

FLYKTMAN, M. 1998. Ruokohelven seospoltto turpeen ja puun kanssa. Jyväskylä. VTT Energia, Tutkimusselostus ENE 33/T0123/98. 36 s. + liitt. 4 s.

GUST, S. 1994. Flash Pyrolysis fuel oil, Alakangas, E (toim.). Bioenergian tutkimusohjelma. Jyväskylä. Julkaisuja 3, Vuosikirja 1993, Osa III, Bioenergian käyttö ja biomassan jalostus. S. 79–97.

HAKKILA, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. Helsinki, Metsäntutkimuslaitos, Folia Forestalia 342, s. 1–38.

HAKKILA, P. 1985. Pienpuun ja metsätähteen korjuu energiakäyttöön. Teoksessa: Metsäenergian mahdollisuudet Suomessa, PERA-projektin väliraportti. Folia Forestalia 624. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos. 76 s. ISBN 951-40-0704-2.

HAKKILA, P. 1989. Utilization of residual forest biomass. Lontoo. Springer-Verlag, Springer Series in Wood Science. 568 s.

HAKKILA, P. (toim.) 1992. Metsäenergia. Helsinki. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 422. 51 s.

HAKKILA, P. 2000. Metsähakkeen energiatiheys. Puuenergia 1/2000. Helsinki, Puuenergia ry. S. 24–25.

HAKKILA, P. & ALAKANGAS, E. 2000. Puuenergian teknologiaohjelman katsaus 1999–2000. Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2000. Espoo. VTT Symposium 205. S. 11–30.

HAKKILA, P. & FREDRIKSSON, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Vantaa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.

HAKKILA, P. & HEISKANEN, V. 1978. Puun ja puutavaran ominaisuuksia. Tapion taskukirja. 18. painos. Jyväskylä, Keskusmetsälautakunta Tapio. S. 448–459.

HAKKILA, P. & KALAJA, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttaminen -tekniikka. Helsinki, Folia Forestalia 552. 37 s.

HAKKILA, P., KALAJA, H., SALAKARI, M. & VALONEN, P. 1978. Whole-tree harvesting in the early thinning of pine. Helsinki, Metsäntutkimuslaitos, Folia Forestalia 333, s. 1–58.

HAKKILA, P., KALAJA, H. & SARANPÄÄ, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä. Helsinki, Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582.

HAKKILA, P., NURMI, J. & KALAJA, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energianlähteenä. Jyväskylä, Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684. 68 s.

HANSEN, M. V., HANSEN, A., JENSEN, L. R. & NILSEN, C. 1987. Förundersgelse av halmfyrede kraftvärmeverker. Köpenhamn, Dk-teknik. Tr-sag nr 1986-/352-86.356.

HELYNEN, S. 1999. Production and consumption potentials for bioenergy in Finland to the year 2010. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Publications 404. 97 s. + liitt. 31 s.

- HELYNEN, S. & NOUSIAINEN, I. 1996. Biopolttoaineiden tuotanto- ja käyttö-potentiaalit. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 26/1996. Helsinki, Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto. 114 s.
- HILLEBRAND, K. & NURMI, J. 2000. Puupolttoaineiden laadunhallinta. Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2000. Espoo. VTT Symposium 205. S. 205–216.
- HILTUNEN, M. 1998. Kierrätyspolttoaineiden käyttömahdollisuudet leijupoltto-kattiloissa. Esitelmä. Jätteiden energiakäyttö – teknologiaohjelman vuosiseminaari, Espoo, 13.8.1998. 8 s.
- HIPPINEN, I. 1988. Kivihiililaatujen syttymisen ja palamisen ennakointi pölypoltossa. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 108 s.
- HUPA, M. 1997. Recovery boiler Chemistry, Kraft Recovery Boilers. Atlanta, USA, TAPPI Press. S. 41–57.
- HUPA, M., FORSSÉN, M., KILPINEN, P., PETTERSSON, R., MARTIN, D. & HELLSTRÖM, P. 1996. Nitrogen chemistry in black liquor combustion – Typpikemia mustalipeän poltossa. LIEKKI 2 -Vuosikirja 1996. Turku. S. 767–801.
- HUUSELA-VEISTOLA, E., PAHKALA, K. & MELA, T. 1991. Peltokasvit sellun ja paperin raaka-aineena. Kirjallisuustutkimus. Jokioinen, Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedotteita 10/91. 37 s.
- HYTÖNEN, J. & FERM, A. 1984. Vesipajun vesojen puuteknisiä ominaisuuksia. Abstract: On the technical properties of *Salix aquatica* sprouts. Helsinki. Metsän-tutkimuslaitoksen tiedonantoja 163, s. 1–20.
- IMMONEN, K. & SEPPÄLÄ, R. 1984. Polttopuun ja palaturpeen alueittainen tuotanto, jakelu ja käyttö. Helsinki, Suomen itsenäisyyden juhluvuoden 1967 rahasto, Sarja B:76. 164 s. + liitt. 27 s.
- IMPOLA, R. 1983. Polttoturpeen laadun ja määrän mittauslaitteet. Helsinki, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Julkaisu 65–83. 17 s.
- IMPOLA, R. 1995. Yhteenveto vuonna 1994 tehdyistä metsähakkeen käyttökokeista Keski-Suomessa. Keski-Suomen Metsäenergia-projekti, Raportti 16.1. Jyväskylä: VTT Energia. 7 s. + liitt. 58 s.

- IMPOLA, R. 1998. Puupolttoaineiden laatuohje. Jyväskylä, FINBIO, Julkaisu 5. 33 s.
- IMPOLA, R., ALA-MUTKA, H. & NIKALA, L. 2000. Kuoren käsittely polttoaineeksi. Puuenergian teknologiaohjelma, Tutkijaseminaari, Jyväskylä, 5.–6.4.2000. 16 s.
- IMPOLA, R., KALLIO, M. & PIRKONEN, P. 1986. Peat classification and standards. State of art. Helsinki, International Energy Agency, Report No. 5. 94 s. + liitt. 6 s.
- ISÄNNÄINEN, S. 1993. Jätevesilietteistä ja niiden hyötykäytöstä. Seminaariesitelmä Vesien suojelu. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, Julkaisuja 4/1994. S. 19–40.
- ISÄNNÄINEN, S. & HUOTARI, H. 1994. Tuhkan ja metsäteollisuuden muiden jätejakeiden prosessointi lannoitekäyttöön soveltuvaksi. Esiselvitys. Jyväskylä, VTT Energia.
- JENSEN, W. 1977. Puukemia. Turku, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja I. 446 s.
- JUVONEN, J. 1998. Kierrätyspolttoaineiden laatuohje, Kokeilukäyttöön. Jyväskylä, FINBIO, Moniste. 29 s. + liitt. 4 s.
- JUVONEN, R. & JOHANSON, P. E. 1986. Mekaaninen metsäteollisuus 2. Sahateollisuus. Helsinki, Ammattikasvatushallitus, Suomen puuteollisuusinsinöörien yhdistys r.y. 290 s.
- Jätepuun käyttö ja jalostus energiaksi. 1993. Helsinki, Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto, Sarja D:40. 38 s.
- Jätteen jalostaminen kiinteäksi polttoaineeksi. 2000. Laadunvalvontajärjestelmä. SFS 5875. Helsinki, Suomen standardisoiimisliitto ja Yleinen teollisuusliitto. 29 s.
- KICHERER, A., GERHARDT, T. L., SPLIETHOFF, H. & HEIN, K. R. G. 1994. Co-combustion of Biomass/ Sewage Sludge with Hard Coal in a Pulverized Fuel Semi-Industrial Test Rig. Stuttgart, Institute for Process Engineering on Power Plant Technology. University of Stuttgart. EC Research Project: APAS-contact COAL-CT92-002. Final report. 30 s.
- KORKMAN, J. 1999. Lannasta biokaasu -seminaari, Lappajärvi, 28.4.1999. Pohjanmaan energiatoimisto, VTT Energia, Tekes, Suomen biokaasukeskus. Seminaariaineisto. 3 s.

KOSTAMO, J. 2000. Co-firing of wood in a coal fired utility boiler. Fortum Engineering, APAS Clean Coal Project COAL-CT92-0001/0002. 17 s.

KOUKI, J. 1997. Pilkkeiden kosteuden ja massan mittaus. Työtehoseuran monisteita 6/1997 (55). S. 29.

KURKI-SUONIO, I. 1981. Polttoaineet ja palaminen, Tekniikan käsikirja osa 2. Yleiset perusteet. Jyväskylä, K.J. Gummerus Osakeyhtiö, Kahdeksas, uusittu ja lisätty painos. S. 541–604.

KYTÖ, M. & ÄIJÄLÄ, M. 1981. Metsäenergian käyttö ja jalostus. Osa 4. Puun pelletoinnin kokeellinen tutkimus. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 41/1981. 45 s. + liitt. 8 s.

KYTÖ, M., ÄIJÄLÄ, M. & PANULA, E. 1983. Metsäenergian käyttö ja jalostus. Osa 8. Puun ominaisuudet ja energiakäyttö. Kirjallisuustutkimus. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 237. 146 s.

KÄRKKÄINEN, M. 1985. Puutiede. Hämeenlinna, Jyväskylän yliopisto, biologian laitos. 415 s.

KÄRKKÄINEN, M. 1971. Puu, sen rakenne ja ominaisuudet. Helsinki, Ylioppilastukiry. 248 s.

LAINEN, R. & SAHRMAN, K. 1985. Puupolttoaineiden ominaisuudet ja hinnoitteluperusteet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 513. 68 s.

LAPPALAINEN, E. & HÄNNINEN, P. 1993. Suomen turvevarat. Espoo, Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 117. 118 s.

LARJAVA, K., SILTANEN, T., TORMONEN, K., KOLSI, A., ORJALA, M. & MUURINEN, M. 1995. Huonekaluteollisuuden lämmityskattiloiden polton tehostaminen. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1709. 52 s. + liitt. 8 s.

LEINO, P. 1975. Kuoren ja turpeen polttoaineominaisuudet. Puun jätteen, kuoren ja turpeen poltto. Helsinki, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Julkaisu 98-74. 10 s. + liitt. 5 s.

LINDH, T. 1995. Ruokohelpin polttoaine- ja palamisominaisuudet. Jyväskylä, VTT Energia, moniste. 22 s. + liitt. 12 s.

LINDH, T., KALLIO, E., PAAPPANEN, T., LEINONEN, A. & KAIPAINEN, H. 1998. Irtokorjuumenetelmän kehittäminen korsibiomassan korjuuseen ja toimitukseen seospolttoaineeksi 1995–1997. Jyväskylä, VTT Energia. Tutkimusselostus ENE 32/T0119/98. 79 s. + liitt. 31 s.

LINNA, V. & JÄRVINEN, T. 1983. Hakkeen keinokuivatuksen tekniset ratkaisut ja taloudellisuus. Helsinki, Suomen itsenäisyyden juhluvuoden 1967 rahasto SITRA. Kotimaisten polttoaineiden alueellinen hyväksikäyttö, Tutkimusraportti nro 25 A. 114 s. + liitt. 9 s.

LINNA, V., KAIPAINEN, H. & OKKONEN, J. 1983. Aurinkolämmön käyttö hakkeen ja palaturpeen puhallinkuivauksessa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tutkimuksia 239. 128 s. + liitt. 7 s.

Maakaasun koostumus ja ominaisuudet 1987. Neste Maakaasu, Julkaisu M1. 24 s.

MANNINEN, H. 1996. Co-combustion Studies of Refuse-derived and Packaging-derived Fuels with Solid Fuels in Fluidized-bed Boilers. Kuopion yliopiston julkaisuja C. Luonnontieteet ja ympäristötieteet 50. 69 s.

MANNINEN, H., PELTOLA, K., JÄRVI-KÄÄRIÄINEN, T. & LEPPÄNEN, A. 1994. Pakkausten energiahyötykäyttö. Pakkausteknologiaryhmä r.y. PTR:n Raportti No. 39. S. 16.

Metsätilastollinen vuosikirja 1999. Suomen Virallinen tilasto 1999:6. Metsäntutkimuslaitos. 352 s.

MIETTINEN, M. & MUTANEN, K. 1985. Hiilen käyttö polttoaineena. Osa 2. Hiilen polttotekniikan uusia sovelluksia, pölypoltto ja hiili-nesteseokset. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 407. 93 s. + liitt. 2 s.

MOILANEN, A., NIEMINEN, M., SIPILÄ, K. & KURKELA, E. 1996. Ash behaviour in thermal fluidised-bed conversion processes of woody and herbaceous biomass. 9th European Bioenergy Conference & 1st European Energy From Biomass Technology Exhibition, 24.–27. June 1996, Copenhagen, Denmark. 6 s

MOILANEN, A. & RANTA, J. 1983. Egenskaper hos industriell torv och dess testningsmetoder. Delrapport 1. Frästorvens förbränningstekniska egenskaper. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, poltto- ja voiteluainelaboratorio (julkaisematon raportti). 58 s.

- MOILANEN, A. & SIPILÄ, K. 1995. Eri peltobiomassojen kaasutusominaisuudet. AgroFood' 95. Tampere 13.–15.11.1995. S. A51.
- MOILANEN, A. & ÄIJÄLÄ, M. 1984. Kivihiihien ominaisuudet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 391. 125 s. + liitt. 206 s.
- MUTANEN, K., KALLIO, M., MIETTINEN, M., OKKONEN, J. & VESTERINEN, R. 1984. Hiilen käyttö polttoaineena. Osa 1. Esiselvitys. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 270. 159 s. + liitt. 7 s.
- MÄLKÖNEN, E. 1974. Annual primary production and nutrient cycle in some Scots pine stands. *Communications Institutii Forestals Fenniae* 84.5. 87 s.
- MÄLKÖNEN, E. 1977. Betydelsen av helträdsutnyttjande i skogens närings-hushållning. *Skogsbruket* Nr. 6. s. 124–125, 136.
- NIEMINEN, M. & RANTA, J. 1982. Kotimaisten polttoaineiden ominaisuuksia. Osa 2. Näytteiden esikäsittely- ja testausohjeet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 164. 50 s.
- NIITTYMÄKI, I. 1993. Bubbling fluidized bed boiler for biofuel combustion. Alakangas, E. (ed.). *Proceedings of the Biofuels Workshop II*. Hanasaari Cultural Centre, August 24–30, 1992. Jyväskylä, VTT Energy. S. 305–322.
- NURMI, J. 1993. Pienkokoisten puiden maanpäällisen biomassan lämpöarvo. Helsinki. *Acta Forestalia Fennica* 236. 30 s.
- NURMI, J. 1997. Heating values of mature trees. Tampere, *Acta Forestalia Fennica* 256. 28 s.
- NURMI, J. 1999. Hakkuutähteen ominaisuuksista. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 722, Kannuksen tutkimusasema. 32 s.
- NURMI, J. 2000. Characteristics and storage of whole-tree biomass for energy. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 758. 42 s.
- OASMAA, A. & CZERNIK, S. 1999. Fuel oil quality of biomass pyrolysis oils. State of the Art for the End Users. American Chemical Society, Energy and Fuels, s. 914–921.



OASMAA, A., LEPPÄMÄKI, E., KOPONEN, P., LEVANDER, J. & TAPOLA, E, 1997. Physical characterisation of biomass-based pyrolysis liquids. Application of standard fuel oil analyses. Espoo, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 306. 46 s. + liitt. 30 s.

PELLIKKA, J. & SAVIHARJU, K. 1983. Kuoren ja puujätteen poltto. Teoksessa: Puumassan valmistus II. Osa 2. Turku, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja. S. 1519–1982.

PELTOLA, A. 1981. Olkipuristeet polttoaineeksi. Valmistuksen tekniikka, energiatase ja talous. Työtehoseuran maatalous- ja rakennusosaston monisteita 2/1981. 50 s.

PIRINEN, H. 1995. Pilkkeiden tilavuuden mittaustarkkuus. Työtehoseuran monisteita 4/1995 (38). 48 s.

PIRINEN, H. 1996. Pilkkeiden irto- ja pinotiiviys. Työtehoseuran monisteita 6/1996 (48). 32 s.

PIRINEN, H. 1997. Pilkeopas omakotitaloille. Huhmari. Työtehoseura. 36 s.

PULKKINEN, P. 1996. Polttoaineen tuottaminen hakkuutähteistä ja muusta jätetuusta hakettamalla ja murskaamalla. Joensuun yliopisto, Metsäteknologian ja puutalouden pro gradu. 60 s. + liitt. 3 s.

PUURONEN, M., VILPPUNEN, P. & KAUPPI, H. 1994. Peltobiomassojen energiataloudellinen hyödyntäminen. Oulu, Oulun yliopisto, Energialaboratorio, Loppuraportti 10.10.1994. 40 s. + liitt. 5 s.

RAIKO, R., KURKI-SUONIO, I., SAASTAMOINEN, J. & HUPA, M. (toim.). 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä, IFRF, Suomen kansallinen komitea. 629 s.

RANTA, J. 1994. Puuhiilen valmistus, käsikirja. Mikkeli, Helsingin yliopiston maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus. Mikkeli. 107 s. + liitt. 24 s.

RANTA, J. 1999. Autonpaloittelujätteen ja rengasromun terminen konversio energiaksi ja raaka-aineeksi. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1960. 81 s. + liitt. 19 s.

RANTA, J. & KORHONEN, M. 1983. Polttoturpeen ja kivihiilen ominaisuuksiin liittyvä terminologia. VTT, Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto, Sarja D:42. 61 s.

Raskaan polttoöljyn käyttöopas. 1998. Helsinki, Neste Oyj. 150 s.

RAUTALIN, A., THUN, R., BRANDT, J., OKKONEN, J. & PYYKKÖNEN, R. 1986. Turvetuotteiden ja hakkeen juoksevuus siilossa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 616. 217 s. + liitt. 7 s.

SAHRMAN, K. & LAINE, R. 1985. Puupolttoaineiden ominaisuudet ja hinnoitteluperusteet. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 513. 68 s.

SANKARI, H. 1994. Bioenergian tuotantoon soveltuvat peltokasvit. Teoksessa: Bioenergian tuotanto elintarviketuotannosta vapautuvalla peltoalalla. Työtehoseuran julkaisuja 333. S. 10–48.

SANKARI, H. 1995. Pellolla viljeltävän non-food-raaka-aineen saatavuus, laatu ja hyödyntäminen kemian teollisuuden tarpeeseen kriisitilanteessa. Tuotannon ja jalostuksen mahdollisuudet Suomessa. Jokioinen, Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedotteita 13/94. 42 s.

SELIN, P. 1999. Turvevarojen teollinen käyttö ja suopohjien hyödyntäminen Suomessa. Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 79. Jyväskylän yliopisto. 239 s.

SEPPÄLÄ, R., ÄIJÄLÄ, M. & ASPLUND, D. 1982. Jyrsinturpeen käsittely ja polttotekniikka Suomessa, Irlannissa ja Neuvostoliitossa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 63/1982. 379 s. + liitt. 91 s.

SIISKONEN, P. & MÄNTYNIEMI, J. 1996. Mustalipeän koostumuksen vaikutus soodakattilan likaantumiskäyttäytymiseen. Paperi ja Puu, Vol. 76, No. 5, s. 310–313.

SILTANEN, T. & RANTASALO, E. 1984. Polttohakkeen laadulle asetettavat vaatimukset pientalolämmityksessä. Helsinki, Suomen itsenäisyyden juhluvuoden 1967 rahasto SITRA. Kotimaisten polttoaineiden alueellinen hyväksikäyttö, Tutkimusraportti nro 34. 81 s. + liitt. 60 s.

SIMOLA, P. 1977. Pienikokoisen lehtipuuston biomassa. Helsinki, Metsäntutkimuslaitos, Folia Forestalia 302. 16 s.

SIMOLA, P. & MÄKELÄ, M. 1976. Rasiinkaato kokopuiden korjuussa. Folia Forestalia 273. 18 s.

SINGER, J. G. 1982. Combustion. Fossil power systems. A reference book on fuel burning and steam generation. USA, Combustion Engineering Inc, International standard handbook no 0-960 5974. 827 s. + liitt. 173 s.

SIPILÄ, K. 1994. Biomassan jalostuksen tutkimus. Bioenergian tutkimusohjelma, Julkaisuja 3, Vuosikirja 1993, Osa III, Bioenergian käyttö ja biomassan jalostus. S. 33–44.

SJÖSTRÖM, E. 1978. Puukemia. Teoreettiset perusteet ja sovellutukset. Otaniemi. 241 s.

SOLANTAUSTA, Y. & ASPLUND, D. 1979. Puun käyttö polttoaineena I. Kirjallisuuskatsaus. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, poltto- ja voiteluainelaboratorio. Tiedonanto 24. 133 s.

SOLANTAUSTA, Y., KOLJONEN, T., PODESSER, E., BECKMAN, D. & OVEREND, R. 1999. Feasibility studies on selected bioenergy concepts producing electricity, heat, and liquid fuel. IEA Bioenergy. Techno-economic analysis activity. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1961. 46 s.

STÅHLBERG, P., WILÉN, C. & HORVATH, A. 1985. Oljen pelletointi ja pellettien käyttö polttoaineena. Vihti, Vakola, Valtion maatalousteknologian tutkimuslaitos, Vakolan tutkimusselostus nro 40.

Suur-Savon Sähkö Oy. 2000. Esittelykalvot pellettien ominaisuuksista.

SÖDERHJELM, L., HUPA, M. & NOOPILA, T. 1989. Combustibility of black liquors with different rheological and chemical properties. Journal of Pulp and Paper Science 15 (4), s. J117–121.

TAHVANAINEN, L. 1995. Pajun viljelyn perusteet. Silva Carelica 30. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta 86. 126 s. + liitt. 12 s.

TAIPALE, R. 1996. Kiinteiden polttoaineiden ominaisuudet. Jyväskylä, Jyväskylän yliopisto, pro gradu -tutkielma. 138 s.

TANSKANEN, J.-H. 1996. Syntypaikkalajitteluun perustuvan yhdyskuntajätehuollon tarkastelu. Suomen ympäristö nro 38. Helsinki, Suomen Ympäristökeskus. 96 s.

Tapion taskukirja. 1997. 23. uudistettu painos. Helsinki, Metsälehti Kustannus. 638 s.

Tempera, kevyen polttoöljyn ominaisuuksia, esite. Neste Oy.

Teollisuusprosessien sivutuotteiden energiakäytön edellytykset. 1988. Selvitys ja käsikirja. Helsinki, Energiataloudellinen yhdistys, Raportti 21/1988.

THUN, R. & KORHONEN, M. (toim.). 1999. SIHTI 2. Energia- ja ympäristö-tekniologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1998. Projektiesittelyt. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Symposium 191. 487 s.

THUN, R. & RAUTALIN, A. 1980. Turpeen juoksevuusominaisuudet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, poltto- ja voiteluainelaboratorio. Moniste. 141 s.

TUOMI, S. & KOUKI, J. 1993. Rypsin siemenet hakepolttimessa. Työtehoseuran metsätiedote 10/1993 (518). 4 s.

TURVETEOLLISUUSLIITTO 1991. Polttoturpeen laatuohje 1991. Helsinki, Energiataloudellinen yhdistys, Lämpölaitosyhdistys ry, Turveteollisuusliitto ry. 20 s. + liitt. 12 s.

TURVETEOLLISUUSLIITTO 1998. Polttoturpeen laatuohje 1989. Energiataloudellinen yhdistys, Turveteollisuusliitto ry. 17 s. + liitt. 8 s.

TUUNANEN, L. 1993. Pellolla kasvatetun biomassan polttaminen. Työtehoseuran maataloustiedote 15 /1993 (437). 6 s.

TUUNANEN, L. 1994. Biomassan polttotekniset laatuvaatimukset. Teoksessa: Bioenergian tuotanto elintarviketuotannosta vapautuvalla peltoalalla. Työtehoseuran julkaisuja 333. S. 49–65.

UOSUKAINEN, H. 1993. The geology of mires in Northern Ostrobothnia, Finland, and their usefulness as sources of peat for gasification. Väitöskirja. Oulun yliopisto, geologian laitos. S. 52.

UUSVAARA, O. 1984. Hakepuun kosteuden alentaminen ennen haketusta korjuuseen ja varastointiin liittyvin toimenpitein. Folia Forestalia 599. 31 s.

UUSVAARA, O. & VERKASALO, E. 1987. Metsähakkeen tiiviys ja muita teknisiä ominaisuuksia. Folia Forestalia 683. Helsinki, Metsäntutkimuslaitos. 53 s. ISBN 951-40-0775-1.

VAKKILAINEN, E. 1993. Energian tuotannon ja sellunvalmistuksen teknologiakehityksen vaikutukset tehdasintegraatin energiatalouteen. INSKO, Energia metsäteollisuuden liiketoiminnassa, 241595-93 III. 23 s.

VAKKILAINEN, E. 1994. High black liquor dry solids changes operation of recovery boiler. Paperi ja Puu, Vol. 76, No 8, s. 496–503.

VASANDER, H. (toim.). 1998. Suomen suot. Suoseura ry. 168 s.

WECKMAN, H. 1986. Kotimaisten polttoaineiden turvallinen tuotanto ja käyttö. Osa 4. Turpeen palo- ja räjähdysominaisuudet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 448. 39 s. + liitt. 5 s.

VERKASALO, E. 1988. Polttohakkeen ja -hakepuun mittaus. Työtehoseuran metsätiedote 447. Helsinki, Työtehoseura. 3 s.

VESTERINEN, R. 1995. Gasification of waste preserved wood impregnated with toxic inorganic and/or organic chemicals – Gasification test with impregnated waste wood at 5 MW Jalasjärvi gasification plant. Espoo, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 244. 38 s. + liitt. 35 s.

VESTERINEN, R. 1997. Kierrätyspolttoaineen, turpeen ja kivihiilen seospoltto leijukerrosreaktorissa. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja 825. 44 s. + liitt. 89 s.

VIINIKAINEN, S. & AITTOJA, J.-P. 1990. Kuitupohjaisten pakkausmateriaalien polttaminen – kirjallisuusselvitys. Pakkausteknologiaryhmä, Raportti No. 26. 44 s.

WILÉN, C., MOILANEN, A. & KURKELA, E. 1996. Biomass feedstock analyses. Espoo, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 282. 25 s. + liitt. 8 s.

WILÉN, C., MOILANEN, A., RAUTALIN, A., TORRENT, J., CONDE, E., LÖDEL, R., CARSON, D., TIMMERS, P. & BREHM, K. 1999. Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures. Espoo, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 394. 117 s. + liitt. 8 s.

VIRTANEN, R., RITALA, P. & LIND, M. 1984. Nalikoiden tuotanto ja jakelu taajamissa. Helsinki, Suomen itsenäisyyden juhluvuoden 1967 rahasto SITRA. Kotimaisten polttoaineiden alueellinen hyväksikäyttö, Tutkimusraportti 38. 116 s. + liitt. 3 s.

VOIPIO, R. & LAAKSO, T. 1992. Pienikokoisten puiden maanpäällisen biomassan kemiallinen koostumus. *Folia Forestalia* 789. 22 s.

VON POST, L. 1922. Sveriges Geologiska Undersöknings torv-inventering och några av dess hittills vunna resultat. *Svenska Mosskulturforeningens Tidsskrift* 1, s. 1–27.

Ympäristönsuojelun vuosikirja – Massa- ja paperiteollisuuden vuoden 1998 tilastot. 1999. Helsinki, Metsäteollisuus ry.

ÄIJÄLÄ, M., MOILANEN, A. & PANULA, E. 1984. Uutta kivihiilitekniikkaa. Osa 1. Kivihiilen rakennetutkimus, luokitteluehdotus ja puhdistus. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. *Tiedotteita* 332. 49 s.

ÖHMAN, K. 1980. Kuoren poltto. Kotimaisten polttoaineiden käyttöön liittyvät turvallisuustekijät. Helsinki, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, *Julkaisu* 57-80. 12 s.

# Liite A. Polttoaineiden laatuluokitukset

## A.1. Puupolttoainelajien laatuluokitus.

### Energiatiheys saapumistilassa MWh/i-m<sup>3</sup> vähintään

	Hake	Puru	Kuori
E1	0,9	0,7	0,7
E2	0,8	0,6	0,6
E3	0,7	0,5	0,5
E4	0,6	0,4	0,4

### Kosteuspitoisuus % enintään

	Hake	Puru	Kuori
K1	40	30	40
K2	50	50	50
K3	60	60	60
K4	65	65	65

### Partikkelikoko 95 % < mm

	Hake	Puru	Kuori
P1	30	5	60
P2	45	10	100
P3	60	20	200
P4	100	30	Repimätön

Lähde:

*Impola, R.* Puupolttoaineiden laatuohje. FINBIO Julkaisu 5. Jyväskylä 1998. 33 s.

## *A.2. Pilkkeen laatuluokitus.*

	1 luokka	2 luokka	3 luokka
Puulaji*			
Koivu	ei muita puulajeja	enintään 5% muita lehtipuita enintään 5% havupuuta	enintään 10% muita lehtipuita enintään 10% havupuuta
Lehtipuu	ei havupuita		
Havupuu	lehtipuuta sallitaan rajoituksetta	lehtipuuta sallitaan rajoituksetta	lehtipuuta sallitaan rajoituksetta
Pituus, cm	33 cm / 50 cm ± 2 cm (25 cm ± 1 cm)	33 cm /50 cm ± 4 cm (25 cm ± 3 cm)	33 cm/ 50 cm ± 6 cm (25 cm ± 4 cm)
Paksuus halkaistuna	4–10 cm	4–12 cm	4–15 cm
Kosteus, p-%	enintään 20%	enintään 25%	enintään 30%
Halkaisupinta	tasainen ja suora	päiden epätasaisuus sallitaan	päiden epätasaisuus sallitaan
Valinnaisesti halottujen/aisattujen osuus tilavuudesta	enintään 5%	enintään 15%	enintään 25%
Puhtaus	ei vieraita aineita	ei vieraita aineita	ei vieraita aineita
Home	ei sallita	yksittäisiä täpliä sallitaan	pieniä esiintymiä sallitaan
Väri	värivikaa ei sallita	vähäinen värivika sallitaan	värivikaa sallitaan
Laho	ei sallita	vain kovaa lahoa enintään 5 % tilavuudesta	kovaa lahoa enintään 5 % tilavuudesta pehmeää lahoa enintään 1 % tilavuudesta

\* ei koske sekapilkkeitä.

Lähde:

*Pirinen, H.* Pilkeopas omakotitaloille. Helsinki, Työtehoseura, 1997. 36 s.

Lämmityspilkkeen laatuohje. FINBIO Julkaisu 8, Jyväskylä 1998. 16 s.



### A.3. Kierrätyspolttoaineiden SFS-standardin laatuluokat I–III.

Kohta	Ominaisuus	Yksikkö	Ilmoitus-tarkkuus	Laatuluokat			Raja-arvon kohdistuminen
				I	II	III	
1	Klooripitoisuus kuiva-aineessa	p-% <sup>2)</sup>	0,01	< 0,15	< 0,50	< 1,50	<sup>6)</sup>
2	Rikkipitoisuus kuiva-aineessa	p-% <sup>2)</sup>	0,01	< 0,20	< 0,30	< 0,50	<sup>6)</sup>
3	Typpipitoisuus kuiva-aineessa	p-% <sup>2)</sup>	0,01	< 1,00	< 1,50	< 2,50	<sup>6)</sup>
4	Kalium- ja natriumpitoisuus kuiva-aineessa <sup>1)</sup>	p-% v	0,01	< 0,20	< 0,40	< 0,50	<sup>6)</sup>
5	Alumiinipitoisuus kuiva-aineessa (metallinen)	p-% <sup>2)</sup>	0,01	<sup>3)</sup>	<sup>4)</sup>	<sup>5)</sup>	<sup>6)</sup>
6	Elohopeapitoisuus kuiva-aineessa	mg/kg	0,1	< 0,1	< 0,2	< 0,5	<sup>6)</sup>
7	Kadmiumpitoisuus kuiva-aineessa	mg/kg	0,1	< 1,0	< 4,0	< 5,0	<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup> Yhteenlaskettu (K+Na) vesiliukoisen ja ionivaihtuvan osan pitoisuus kuiva-aineessa.

<sup>2)</sup> p-% tarkoittaa massan osuutta prosentteina.

<sup>3)</sup> Metallista alumiinia ei sallita, mutta se on hyväksyttävissä ilmoitustarkkuuden rajoissa

<sup>4)</sup> Syntyäpaikkalajittelulla ja polttoaineen valmistusprosessilla pyritään poistamaan metallinen alumiini.

<sup>4)</sup> Metallinen alumiinipitoisuus sovitaan erikseen

<sup>5)</sup> Raja-arvo kohdistuu enintään 1000 m<sup>3</sup>:n tai yhden kuukauden aikana valmistettuun tai toimitettuun polttoainemäärään ja tulee verifioida vähintään vastaavalla tiheydellä.

Laatuluokituksen määrävien raja-arvojen (kohdat 1–7) tulee toteutua samanaikaisesti. Raja-arvot verifioidaan standardissa kuvattujen menettelytapojen mukaisesti (standardin liite D, näytteenotto ja liite E, analyysimenetelmät).

Lähde:

*Jätteen jalostaminen kiinteäksi polttoaineeksi.* Laadunvalvontajärjestelmä. SFS 5875. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto ja Yleinen teollisuusliitto. 29 s.

A.4. Jyrsinturpeen laatuluokitus.

KOH- TA	OMINAISUUS	RAJA-ARVON KOHDISTU- MINEN	RAJA-ARVOT					TOTEAMIS- TAPA, KATTAVUUS JA TAAJUUS	NÄYTTEEN-OTTO, ANALYSOINTI- JA LASKENTA- OHJEET KOHDISSA
			Yksikkö	Ilm.tarkk.	J6	J8	J10		
1	Kosteus saapumistilassa	Toimituserä - vähintään - enintään  Yksittäinen kuorma - vähintään - enintään	p-% p-%  p-% p-%	0,1 0,1  0,1 0,1	40,0 60,0  38,0 65,0	40,0 56,0  38,0 63,0	40,0 50,0  38,0 60,0	A, 1/vrk A, 1/vrk  C	3.6.1–3.6.3 4.1  3.4 3.6.1–3.6.3,4.1
2	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	Toimituserä, vähintään	MJ/kg	0,1	6,0	8,0	10,0	A, 1/vrk	3.6.4–3.6.5 4.3
3	Energiatiheys saapumistilassa	Toimituserä, vähintään	MWh/m <sup>3</sup>	0,01	0,5	0,70	0,8	A, 1/vrk	3.6.4–3.6.5 4.3
4	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	Kuukausierä, vähintään	MJ/kg	0,01	18,0	18,0	19,0	B, 1/kk	3.6.4–3.6.5,4.3
5	Tuhkapitoisuus, kuiva-aineessa	Kuukausierä enintään  Toimituserä ja kuukausierä yhdeltä toimituspaikalta enintään	p-% p-%	0,1 0,1	10,0 15,0	10,0 15,0	10,0 15,0	B, 1/kk C	3.6.4–3.6.5 4.4.1
6	Tuhkan sulamiskäyttä- tyminen	Kuukausierä, puolipallopiste vähintään	°C	10	+1120 kaikille luokille ellei etukäteen toisin ole sovitettu			C	3.6.4–3.6.5 4.4.2
7	Rikkipitoisuus kuiva-aineessa	Kuukausierä, enintään	p-%	0,01	0,30 kaikille luokille ellei etukäteen toisin ole ilmoitettu			B, 1/kk	3.6.4–3.6.5 4.10
8	Suuret kappaleet	Kuorma, silmäkooltaan 200X200 mm täyrytilällä jäävä osuus enintään  Yksittäisen kappaleen suurin sallittu ulottuvuus ja tilavuus	p-%  m m <sup>3</sup>	0,2  0,1	1,0  1,0 0,2	1,0  1,0 0,2	0,5  1,0 0,2	C  C	4.6
9	Karkea aines	Toimituserä 200X200 mm täyrytilän läpäisevä mutta 40x40 mm seulalle jäävä osuus enintään	p-%	1	6 enintään kaikille luokille ellei etukäteen toisin ole sovitettu			C	4.7
10	Irtotiheys	Kuorma - vähintään - enintään	kg/ m <sup>3</sup> kg/ m <sup>3</sup>	10 10	200 450	220 450	240 450	C	4.5

**Raja-arvot:**

Ominaisuuden arvon katsotaan olevan ilmoitetun arvon mukainen, mikäli se poikkeaa raja-arvosta enintään puolet ilmoitustarkkuudesta epäedulliseen suuntaan.

**Kattavuus:**

- A. Koko turvemäärän kattava säännöllinen ominaisuuden määrittäminen turpeen arvon määrittämiseksi.
- B. Koko turvemäärän kattava säännöllinen ominaisuuden määrittäminen, ei ole sidottu turpeen arvoon.
- C. Ominaisuus määritetään satunnaisesti tai tarpeen vaatiessa.

**Taajuus:**

Ilmoitettu taajuus on vähimmäistaajuus, jolla ominaisuus määritetään.

**Lähde:**

*Polttoturpeen laatuohje 1989.* Jyväskylä, Energiataloudellinen yhdistys, Turveteollisuusliitto ry, 1989. 17 s. + liitt. 8 s.

### A.5. Palaturpeen laatuluokitus.

KOH- TA	OMINAISUUS	RAJA-ARVON KOHDISTUMINEN	RAJA-ARVOT						TOTEAMIS- TAPA, KATTA- VUUS JA TAAJUUS	NÄYTTEEN- OTTO, ANA- LYSOINTI- JA LASKENTA- OHJEET KOHDISSA
			Yksikkö	llm.tark.	P9	P11	P13	P15*		
1	Kosteus saapumistilassa	Toimituserä – vähintään – enintään	p-% p-%	0,1 0,1	35,0 53,0	30,0 47,0	27,0 40,0**	20,0 33,0**	A, 1/vrk A, 1/vrk	3.1–3.6.3 4.1
2	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa***	Toimituserä, vähintään	MJ/kg	0,1	9,0	11,0	13,0	15,0	A, 1/vrk	3.6.4-3.6.5 4.3
3	Energiatehous saapumistilassa***	Toimituserä, vähintään	MWh/m <sup>3</sup>	0,01	1,0	1,15	1,30	1,50	A, 1/vrk	3.6.4-3.6.5 4.3
4	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	Kuukausierä, vähintään	MJ/kg	0,01	18,00	19,00	19,0	20,00	B, 1/kk	3.6.4-3.6.5 4.3
5	Tuhkapitoisuus, kuiva-aineessa	Kuukausierä enintään  Toimitus- ja kuukausierä yhdeeltä toimituspaikalta enintään	p-% p-%	0,1 0,1	10,0 15,0	10,0 15,0	8,0 12,0	6,0 8,0	B, 1/kk C	3.6.4-3.6.5 4.4.1
6	Tuhkan sulamis- käyttäytyminen	Kuukausierä, puolipallopiste vähintään	°C	+1120	+1120	+1120	+1120	+1120	C	3.6.4-3.6.5 4.4.2
7	Rikkihaittoisuus kuiva-aineessa	Kuukausierä, enintään	p-%	0,01	0,3	0,3	0,3	0,3	B, 1/kk	3.6.4-3.6.5 4.11
8	Suuret kappaleet	Kuorma, suurin ulottuvuus enintään  osuus, enintään	mm p-%	10 0,1	300 1,0	300 1,0	300 1,0	300 1,0	C	4.8
9	Palakoko	Keskimääräiset mitat – halkaisija – pituus	mm mm	10 10	20–80 80–200	20–80 80–200	20–80 80–200	20–80 80–200	C	4.9
9	Hienoaineksen osuus	Kuorma, silmäkooltaan 20X20 mm verkkoseulan läpäisevä osuus enintään	p-%	1	20	15	5**** tai 10	5****	C	3.8 4.10
10	Irtotiheys	Kuorma – vähintään – enintään	kg/ m <sup>3</sup> kg/ m <sup>3</sup>	10 10	280 550	280 550	300 520	300 500	C	4.5

- \*) Pienkäyttöluokka, jonka osalta toteamistapa (kattavuus ja taajuus) sovitaan tapauskohtaisesti.
- \*\*\*) Erityisrajoitus kohdassa 5.2.
- \*\*\*\*) Sovitaan toimitussopimuksessa, kumpaa käytetään, MJ/kg vai MWh/m<sup>3</sup>, ei molempia samanaikaisesti. Huom. MJ/kg vai MWh/m<sup>3</sup> ei ole tästä syystä synkronoitu keskenään.
- \*\*\*\*\*) Seulottu kuormausvaiheessa.

**Raja-arvot:**

Ominaisuuden arvon katsotaan olevan ilmoitetun arvon mukainen, mikäli se poikkeaa raja-arvosta enintään puolet ilmoitustarkkuudesta epäedulliseen suuntaan.

**Kattavuus:**

- A. Koko turvemäärän kattava säännöllinen ominaisuuden määrittäminen turpeen arvon määrittämiseksi.
- B. Koko turvemäärän kattava säännöllinen ominaisuuden määrittäminen, ei ole sidottu turpeen arvoon.
- C. Ominaisuus määritetään satunnaisesti tai tarpeen vaatiessa.

**Taajuus:**

Ilmoitettu taajuus on vähimmäistaajuus, jolla ominaisuus määritetään.

**Lähde:**

*Polttoturpeen laatuohje 1991.* Jyväskylä, Turveteollisuusliitto, Energiataloudellinen yhdistys, Lämpölaitosyhdistys, 1991. 20 s. + liitt. 12 s.

## A 6. Kivihiilen luokittelu.

Vitriinin (keskimääräinen satunnainen heijastuskerroin (reflektanssi))		Reflektogrammin ominaisuus <sup>1)</sup>				Maseraaliryhmäkoostumus * (mmf)				Upokaspaisumisluku	
						Inertiniitti <sup>2)</sup>		Liptiniitti			
Koodi	R <sub>satunnainen</sub> %	Koodi	Keskijajonta		Tyyppi	Koodi	Til-%	Koodi	Til-%	Koodi	Luku
02	0,2–0,29	0	≤0,1	Ei väliä	Juonnehiili	0	0 - <10	1	0 - <5	0	0–0,5
03	0,3–0,39	1	>0,1 ≤ 0,2	Ei väliä	Yksinkert. seos	1	10 - <20	2	5 - <10	1	1–1,5
04	0,4–0,49	2	>0,2	Ei väliä	Kompleksinen seos	2	20 - <30	3	10 - <15	2	2–2,5
-	-	3		1 väli	Seos, jossa 1 väli	-	-	-	-	-	-
48	4,8–4,89	4		2 väliä	Seos, jossa 2 väliä	7	70 - <80	7	30 - <35	7	7–7,5
49	4,9–4,99	5		>2 väliä	Seos, jossa > 2 väliä	8	80 - <90	8	35 - <40	8	8–8,5
50	≥5,0					9	≥90	9	≥40	9	9–9,5
Haihtuvat aineet <sup>3)</sup> , daf**			Tuhka, kuiva-aine			Kokonaisrikki, kuiva-aine			Ylempi lämpöarvo, daf**		
48	≥48	00		0 - <1		00	0 - <0,1	21		<22	
46	46 - <48	01		1 - <2		01	0,1 - <0,2	22		22 - <23	
44	44 - <46	02		2 - <3		02	0,2 - <0,3	23		23 - <24	
-	-	-		-		-	-	-		-	
12	12 - <14	20		20 - <21		29	2,9 - <3,0	37		37 - <38	
10	10 - <12	-		-		30	3,0 - <3,1	38		38 - <39	
09	9 - <10					-	-	39		≥39	
-	-										
02	2 - <3										
01	1 - <2										

Korkeimman laatuluokan kivihiiliä ovat ne, joiden ylempi lämpöarvo (maf<sup>\*\*\*</sup>) on >24 MJ/kg ja ne, joiden ylempi lämpöarvo (maf) on <24 MJ/kg edellyttäen, että keskimääräinen vitriinin satunnainen heijastuskerroin on >0,6 %.

\*\*\* maf tarkoittaa moist, ash free eli kostea, tuhkaton, kosteus määritetään standardimenetelmän ISO 1018 mukaan.

\*mmf on mineral matter free (ei sisällä mineraaleja), \*\* daf on dry, ash free (kuiva, tuhkaton)

<sup>1)</sup> koodia 2 olevan reflektogrammi voi tarkoittaa myös korkean luokan juonnehiiliä.

<sup>2)</sup> Osa inertiniitistä voi olla reaktiivista

<sup>3)</sup> Tuhkapitoisuudeltaan yli 10 %:a olevan kivihiilen tuhkapitoisuus on alennettava ennen analyysiä alle 10 %:iin käyttäen korkean tiheyden väliaineeseen perustuvaa erotusmenetelmää; näissä tapauksissa ilmoitetaan erottuva tiheys ja tulokseksi saatu tuhkapitoisuus

Lähteet: *Carpenter, A. M. 1992. Coal classification. Lontoo, IEA Coal Research IEACR/12. 45 s.*

*Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. & Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen, Jyväskylä, International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen komitea. 629 s.*

## Liite B. Suomessa käytettyjen kivihiilien keskimääräisiä ominaisuuksia

*B.1. Suomessa käytettyjen kivihiilien polttoaineominaisuuksia. (Lähde: Taipale 1996).*

Maa	Määr.	p-%	Tuhkapitoisuus k.a. p-%	Haihtuvat aineet k.a p-%	Kalorim. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo saap. MJ/kg	Kiinteä hiili k.a. p-%	Hardgrove- indeksi	Leipoutuvuus- indeksi	Koksausjäännös k.a. p-%
Puola	ka	9.9	15.4	33.8	28.74	27.76	24.8	54.3	57	1.4	68.9
	lkm	619	619	619	461	460	614	164	442	397	163
	min	5.4	7.5	26	23.32	22.5	18.88	42.8	41	0	62.2
	max	15.8	27.5	37.8	32.88	31.88	29.35	62.1	87	7	73.5
Venäjä	ka	10.4	14.8	33.4	26.68	28.12	24.47	52.5	60	2.4	68
	lkm	193	193	193	157	153	191	71	61	48	128
	min	4.6	4.6	23	23.15	22.22	19.75	37.8	49	0	50.7
	max	20.8	29.5	43.9	30.37	29.33	26.83	62.7	76	7.5	77
Kolumbia	ka	9.9	7.3	37.6	31.39	30.3	27.24	53.4	51		
	lkm	8	8	8	4	4	8	2	4		
	min	8.2	6.1	36.1	31.14	30.13	26.74	52.8	48		
	max	11.3	9	38.9	31.67	30.56	28.38	53.9	57		
Englanti	ka	12.1	15.7	33.1	27.76	26.79	24.12	49.8	61	2.4	69.3
	lkm	8	8	8	4	4	8	3	7	4	3
	min	7.9	11.1	30.2	27.18	25.76	21.98	48.8	52	1	68.7
	max	18	21	36.6	29.65	28.63	26.8	50.5	73	5	69.8
Venezuela	ka	7.4	5.5	38	32.6	31.42	28.85	57.1	48	4.8	
	lkm	4	4	4	3	3	4	2	3	2	
	min	6.6	3.6	37.2	30.84	29.69	27.17	55.8	45	4.5	
	max	8.4	7.6	38.9	33.49	32.31	30.02	58.3	51	5	

*B.1 jatkuu – Suomessa käytettyjen kivihiilien polttoaineominaisuuksia (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	Kokonaiskosteus p-%	Tuhkapitoisuus k.a. p-%	Haihtuvat aineet k.a p-%	Kalorim. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo k.a. MJ/kg	Teholl. lämpöarvo saap. MJ/kg	Kiinteä hiili k.a. p-%	Hardgrove- indeksi	Leipoutuvuus- indeksi	Koksausjäännös k.a. p-%
Australia	ka	9.7	13.9	27.4	28.85	27.91	25.18	58.7	57	0.5	
	lkm	3	3	3	2	2	3	3	2	1	
	min	6.5	8.6	26.2	28.65	27.71	23.72	56.5	51	0.5	
	max	16	17.3	29.4	29.05	28.11	26.06	61.9	63	0.5	
Etelä-Afrikka	ka	7.8	14.1	28.7	28.58	27.63	25.29	57.2	44.8		71.4
	lkm	3	3	3	3	3	3	3	2		
	min	7.6	13.6	27.4	28.41	27.47	25.13	55	44		69
	max	7.9	14.7	31	28.71	27.76	25.48	58.7	45.6		72.6
Yhdysvallat	ka	7.4	6.9	37.4			28.84				
	lkm	1	1	1			1				
	min	7.4	6.9	37.4			28.84				
	max	7.4	6.9	37.4			28.84				
Kanada	ka	11.5	13.2	36.9	26.9		22.7	49.9	43		
	lkm	1	1	1	1		1	1	1		
	min	11.5	13.2	36.9	26.9		22.7	49.9	43		
	max	11.5	13.2	36.9	26.9		22.7	49.9	43		
Kiina	ka	10.5	10.9	30.2			25.6	52			
	lkm	3	3	3			3	3			
	min	7.8	9	28.6			25.3	50			
	max	12.5	13.7	32			26.1	56			
Indonesia	ka	23.8	1.4	48.4	29.56	28.4	21.07	48.8	43.8		
	lkm	2	2	2	2	2	2	1	1		
	min	23.5	1.3	46.8	29.53	28.36	20.96	48.8	43.8		
	max	24	1.6	49.9	29.58	28.43	21.17	48.8	43.8		



*B.2. Suomessa käytettyjen kivihiilien alkuainepitoisuuksia (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	Hiilipitoisuus k.a. p-%	Vetytitoisuus k.a p-%	Typipitoisuus k.a. p-%	Happipitoisuus k.a. p-%	Rikkipitoisuus k.a. p-%	Klooripitoisuus k.a. p-%	Fluoridipitoisuus k.a. p-%	Fosforipitoisuus k.a. p-%
Puola	ka	70,1	4,4	1,1	8,3	0,91	0,12	0,008	
	lkm	30	30	33	18	521	20	2	
	min	59,1	3,9	0,7	5,7	0,57	0,10	0,007	
	max	80,8	4,7	1,4	10,0	1,7	0,24	0,008	
Venäjä	ka	70,9	4,5	1,8	5,6	0,55	0,022	0,007	0,020
	lkm	7	7	7	1	196	4	2	1
	min	67,1	4,3	1,5	5,6	0,22	0,009	0,006	0,020
	max	75,9	4,7	2,1	5,6	2,30	0,03	0,008	0,020
Kolumbia	ka	77,1	4,5	1,4	11,7	0,73	0,04		
	lkm	5	5	5	2	8	2		
	min	72,9	3,1	1,3	10,6	0,62	0,03		
	max	80,5	5,2	1,5	12,8	0,88	0,04		
Englanti	ka	72,8	4,7	1,3	5,8	1,61	0,17		
	lkm	12	12	12	1	8	3		
	min	70,9	4,6	1,2	5,8	1,16	0,10		
	max	75,5	4,7	1,5	5,8	2,50	0,24		
Venezuela	ka	78,0	5,2	1,6	8,5	0,7	0,032		
	lkm	3	4	4	2	4	3		
	min	76,2	4,8	1,4	8,2	0,5	0,021		
	max	80,4	5,4	1,7	8,7	1,0	0,040		
Australia	ka	74,7	4,0	1,6	11,4	0,31	0,07		0,008
	lkm	1	1	1	1	3	1		1
	min	74,7	4,0	1,6	11,4	0,27	0,07		0,008
	max	74,7	4,0	1,6	11,4	0,34	0,07		0,008

*B.2 jatkuu – Suomessa käytettyjen kivihiilien alkuainepitoisuuksia (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	Hiilipitoisuus k.a. p-%	Vetytitoisuus k.a. p-%	Typpipitoisuus k.a. p-%	Happipitoisuus k.a. p-%	Rikki-pitoisuus k.a. p-%	Klooripitoisuus k.a. p-%	Fluoridipitoisuus k.a. p-%	Fosforipitoisuus k.a. p-%
Etelä- Afrikka	ka					0,63			
	lkm					3			
	min					0,55			
	max					0,72			
Yhdysvallat	ka	70,8	4,5	1,3		1,15	0,07	0,008	
	lkm	2	21	21		4	1	1	
	min	61,6	4,0	1,0		0,90	0,07	0,008	
	max	76,1	4,8	1,5		1,61	0,07	0,008	
Kanada	ka	68,1	4,4	1,3		0,44			
	lkm	1	1	1		1			
	min	68,1	4,4	1,3		0,44			
	max	68,1	4,4	1,3		0,44			
Kiina	ka					0,9			
	lkm					3			
	min					0,8			
	max					1,0			
Indonesia	ka					0,09			
	lkm					2			
	min					0,08			
	max					0,10			

*B.3. Suomessa käytettyjen kivihiilien metallipitoisuuksia (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	Hg k.a.mg/kg	Pb k.a mg/kg	Cd. k.a. mg/kg	Co k.a. mg/kg	As k.a.mg/kg	V k.a. mg/kg	Ni k.a.mg/kg	Cr k.a. mg/kg
Puola	ka	0,10	23,5	0,24	7,8	3,8	50	21	19,3
	lkm	4	4	4	1	4	1	1	4
	min	0,07	12	0,17	7,8	2	50	21	12
	max	0,18	30	0,3	7,8	6,2	50	21	29
Venäjä	ka	0,15	9,5	0,09	4,6	4,4	20	16	14,5
	lkm	3	3	3	1	3	1	1	3
	min	0,07	5	0,05	4,6	2,4	20	16	8,6
	max	0,23	17	0,12	4,6	6	20	16	18
Kolumbia	ka	0,05	3,5	0,18	1,3	3,1	14	8,5	8,5
	lkm	3	3	3	1	3	1	1	3
	min	0,03	1	0,13	1,3	1	14	8,5	7
	max	0,07	5	0,2	1,3	5	14	8,5	10
Englanti	ka	0,14	12	0,8		13			13
	lkm	1	1	1		1			1
	min	0,14	12	0,8		13			13
	max	0,14	12	0,8		13			13
Venezuela	ka	0,04	2	0,1		6			3
	lkm	1	1	1		1			1
	min	0,04	2	0,1		6			3
	max	0,04	2	0,1		6			3
Yhdysvallat	ka	0,14	11,6	0,19	3,8	6,8	23	11	16,3
	lkm	3	3	3	1	3	1	1	3
	min	0,11	3,8	0,07	3,8	4	23	11	13
	max	0,19	20	0,21	3,8	5,5	23	11	18

*B.4. Suomessa käytettyjen kivihiilien sulamiskäyttäytymistä (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (DIN)			Tuhkan sulamiskäyttäytyminen pelkistävässä atmosfäärissä (DIN)			Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (ASTM)				Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (DIN)			
		A (°C)	B (°C)	C (°C)	A (°C)	B (°C)	C (°C)	IT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)	IT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)
Puola	ka	1237	1412	1442				1317	1358	1389	1425				
	lkm	397	397	397				19	19	19	19				
	min	1180	1290	1320				1245	1285	1325	1360				
	max	1300	1550	1580				1385	1410	1325	1360				
Venäjä	ka	1213	1377	1406				1280	1323	1383	1455				
	lkm	48	48	48				2	2	2	2				
	min	1014	1260	1310				1210	1230	1320	1450				
	max	1280	1520	1530				1350	1415	1445	1460				
Kolumbia	ka							1295	1352	1384	1407	1233	1296	1337	1382
	lkm							2	2	2	2	2	2	2	2
	min							1274	1338	1865	1387	1227	1288	1322	1362
	max							1316	1366	1402	1427	1238	1304	1352	1402
Englanti	ka	1280	1430	1450				1355	1375	1390	1400				
	lkm	2	2	2				1	1	1	1				
	min	1160	1360	1400				1355	1375	1390	1400				
	max	1400	1500	1500				1355	1375	1390	1400				
Venezuela	ka							1292	1370	1395	1440	1263	1297	1322	1369
	lkm							4	4	4	4	1	1	1	1
	min							1210	1255	1295	1380	1263	1297	1322	1369
	max							1430	1455	1470	1500	1263	1297	1322	1369

*B.4 jatkuu – Suomessa käytettyjen kivihiilien sulamiskäyttäytymistä (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (DIN)			Tuhkan sulamiskäyttäytyminen pelkistävässä atmosfäärissä (DIN)			Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (ASTM)				Tuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa atmosfäärissä (DIN)			
Australia	ka	1570	1580	1590	1550	1580	1580								
	lkm	1	1	1	1	1	1								
	min	1570	1580	1590	1550	1580	1580								
	max	1570	1580	1590	1550	1580	1580								
Kanada	ka							1270	1290	1400	1460	1250	1280	1300	1500
	lkm							1	1	1	1	1	1	1	1
	min							1270	1290	1400	1460	1250	1280	1300	1500
	max							1270	1290	1400	1460	1250	1280	1300	1500

*B.5. Suomessa käytettyjen kivihiilien tuhkan koostumuksia (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	CaO k.a. p-%	Na <sub>2</sub> O k.a. p-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> k.a. p-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> k.a. p-%	TiO <sub>2</sub> k.a. p-%	MgO k.a. p-%	K <sub>2</sub> O k.a. p-%	SiO <sub>2</sub> k.a. p-%	SO <sub>2</sub> k.a. p-%	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> k.a. p-%	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> k.a. p-%	BaO k.a. p-%
Puola	ka	3.8	1.1	23.8	9.5	1.1	2.9	2.4	47.7	2.1	0.41		
	lkm	8	8	10	8	8	8	8	8	4	10		
	min	2.2	0.6	20.6	7.5	1	1.6	1.5	44.2	1.2	0.2		
	max	6.4	1.9	27.1	12.2	1.3	4.3	3.2	51.4	4.3	0.7		
Venäjä	ka	4	0.92	20.1	5.3	0.87	1.5	2.1	59	2	0.51	0.11	
	lkm	4	3	6	5	5	4	3	5	4	3	1	
	min	3.2	0.57	15.3	3.1	0.34	1.2	1.2	56.8	1	0.38	0.11	
	max	5.7	1.5	25.3	7.9	1.3	2	2.8	62.6	3	0.64	0.11	
Kolumbia	ka	4.1	1.1	14.8	7.1	0.8	4.9	1.6	63.3	1.9	0.13		
	lkm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
	min	2,0	1.1	10.6	6.2	0.7	1.8	1.3	59.3	1.9	0.06		
	max	6,1	1,1	19,0	7,9	0,8	8,0	1,9	67,2	1,9	0,2		
Englanti	ka	3,	01,8	24,1	12,8	1,0	1,7	2,2	45,7	1,7	0,35		
	lkm	10	10	10	10	10	10	10	10	1	10		
	min	2,0	0,8	20,7	9,4	0,9	1,3	1,9	41,8	1,7	0,26		
	max	5,4	2,3	27,0	15,1	1,1	3,9	3,0	49,0	1,7	0,55		
Venezuela	ka	5,6	0,47	22,3	5,8	0,87	3,9	1,42	51,4	8,1	0,19		
	lkm	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
	min	5,2	0,43	22,0	5,5	0,77	3,8	0,96	50,0	6,3	0,17		
	max	6,0	0,50	22,6	6,0	0,97	4,0	1,88	52,8	9,8	0,21		
Australia	ka	0,54	0,21	30,2	4,2	1,58	0,50	0,3	61,3	0,15	0,25	0,10	0,10
	lkm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	min	0,54	0,21	30,2	4,2	1,58	0,50	0,3	61,3	0,15	0,25	0,10	0,10
	max	0,54	0,21	30,2	4,2	1,58	0,50	0,3	61,3	0,15	0,25	0,10	0,10

*B.5 jatkuu – Suomessa käytettyjen kivihiilien tuhkan koostumuksia (Taipale 1996).*

Maa	Määr.	CaO k.a. p-%	Na <sub>2</sub> O k.a. p-%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> k.a. p-%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> k.a. p-%	TiO <sub>2</sub> k.a. p-%	MgO k.a. p-%	K <sub>2</sub> O k.a. p-%	SiO <sub>2</sub> k.a. p-%	SO <sub>2</sub> k.a. p-%	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> k.a. p-%	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> k.a. p-%	BaO k.a. p-%
Yhdysvallat	ka	1,5	0,8	23,8	11,5	1,1	1,1	2,6	48,1		0,21		
	lkm	4	4	4	4	4	4	4	4		4		
	min	0,9	0,4	23,1	7,7	0,2	0,8	1,7	42,4		0,1		
	max	2,3	1,8	24,1	14,6	1,6	1,4	3,1	51,1		0,36		
Kanada	ka	0,5	0,2	16,5	2,7	0,6	0,3	0,4	58,8	4,7	0,3		
	lkm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	min	0,5	0,2	16,5	2,7	0,6	0,3	0,4	58,8	4,7	0,3		
	max	0,5	0,2	16,5	2,7	0,6	0,3	0,4	58,8	4,7	0,3		
Kiina	ka	4,5	0,25	29,8	12,0	1,4	1,2	0,5	46,6	2,9	0,7		
	lkm	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1		
	min	3,2	0,1	18,3	4,4	1,3	0,3	0,2	42,7	2,9	0,7		
	max	5,8	0,4	41,3	19,6	1,5	2,0	0,8	50,5	2,9	0,7		

ka= keskiarvo







Tekijä(t) Alakangas, Eija			
Nimeke <b>Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia</b>			
Tiivistelmä Julkaisussa käsitellään lämmön- ja sähkötuotantoon käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia kirjallisuuden sekä VTT Energian analyysien perusteella. Liikennepolttoaineita ei käsitellä. Tärkeimmät polttoaineiden ominaisuudet, joita julkaisussa käsitellään ovat <ul style="list-style-type: none"> <li>• lämpöarvo</li> <li>• polttoaineen kemiallinen koostumus</li> <li>• kosteus</li> <li>• tiheys, jauhautuvuus sekä muut käsittelytekniset ominaisuudet</li> <li>• tuhkapitoisuus, tuhkan sulamiskäyttäytyminen ja tuhkan koostumus</li> <li>• haitallisten aineiden, kuten mm. alkalien ja raskasmetallien, pitoisuudet.</li> </ul> Erilaisten puuperäisten polttoaineiden, turpeen, peltobiomassojen, kierrätyspolttoaineiden, lietteiden, kivihiilen, kaasumaisten polttoaineiden sekä öljyjen ominaisuuksia esitellään vertailevina taulukoina. Aineistossa on sekä kaupallisia polttoaineita sekä tutkimuskohteena olevia polttoaineita (mm. ruokohelpi ja bioöljyt). Julkaisun alussa esitellään ominaisuuksien määrittämenetelmiä ja laskentakaavoja. Lisäksi julkaisussa esitellään myös kotimaisten polttoaineiden tuotantomenetelmiä lyhyesti sekä potentiaalitietoja. Julkaisun lopussa ovat yhteenvetotaulukot ominaisuuksista sekä Suomessa voimassa olevat polttoaineiden laatu- luokitukset.			
Avainsanat physical properties, wood fuels, peat, energy crops, coal, oils, gas, Finland, chemical composition, moisture content, density, combustion properties, calorific value, ash content, alkali metals, heavy metals			
Toimintayksikkö VTT Energia, Energian tuotanto, Koivurannantie 1, PL 1603, 40101 JYVÄSKYLÄ			
ISBN 951-38-5699-2 (nid.) 951-38-5740-29 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Projektinumero ENE4808 ENET931	
Julkaisu-aika Lokakuu 2000	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 172 s. + liitt. 17 s.	Hinta D
Projektin nimi		Toimeksiantaja(t) Imatran Voima Oy:n säätö, VTT Energia	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Julkaisussa käsitellään lämmön- ja sähkötuotantoon käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Liikennepolttoaineita ei käsitellä. Tärkeimmät polttoaineiden ominaisuudet, joita julkaisussa käsitellään, ovat lämpöarvo, polttoaineen kemiallinen koostumus, kosteus, tiheys, jauhautuvuus sekä muut käsittelytekniset ominaisuudet, tuhkapitoisuus, tuhkan sulamiskäyttäytyminen ja tuhkan koostumus sekä haitallisten aineiden, kuten mm. alkalien ja raskasmetallien, pitoisuudet. Ominaisuustietoja kerättiin puuperäisistä polttoaineista, turpeesta, peltobiomassoista, kierrätyspolttoaineista, lietteistä, kivihiilestä, kaasumaisista polttoaineista sekä öljyistä. Ominaisuuksia esitetään vertailevina taulukoina. Aineistossa on sekä kaupallisia polttoaineita että tutkimuskohteena olevia polttoaineita (ruokohelpi ja bioöljyt). Julkaisun alussa esitellään ominaisuuksien määrittämenetelmiä ja laskentakaavoja. Lopussa ovat yhteenvedotaulukot ominaisuuksista sekä Suomessa voimassa olevat polttoaineiden laatuluokitukset.

---

Tätä julkaisua myy  
VTT TIETOPALVELU  
PL 2000  
02044 VTT  
Puh. (09) 456 4404  
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av  
VTT INFORMATIONSTJÄNST  
PB 2000  
02044 VTT  
Tel. (09) 456 4404  
Fax (09) 456 4374

This publication is available from  
VTT INFORMATION SERVICE  
P.O.Box 2000  
FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. + 358 9 456 4404  
Fax + 358 9 456 4374

---



Author(s) Alakangas, Eija			
Title <b>Properties of fuels used in Finland</b>			
Abstract <p>The properties of fuels used or studied in Finland have been studied in this publication based both on the literature and researches carried out at VTT Energy. The transportation fuels are not included.</p> <p>The main properties of the fuels, discussed in this publication, are:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• calorific value</li> <li>• chemical composition of the fuel</li> <li>• moisture content</li> <li>• density, grindability and other fuel handling properties</li> <li>• ash content, ash melting behaviour and ash composition</li> <li>• concentrations of harmful substances, such as alkali and heavy metals.</li> </ul> <p>The properties of different kinds of fuels, such as wood fuels, peat, agrobiomasses, sludges, coal, gaseous fuels and oils are presented in the form of comparison tables. The material contains both commercial fuels and fuels under research (reed canary grass and bio-oils). The definitions for fuels and the properties, the analysis methods for different properties, and the formulas for calculation of the values are presented in the beginning of the publication. VTT Energy has recently studied the fuel handling properties of solid fuels in the Multi Fuel Research programme, but there is quite a little new data to be published, so much of the data presented in this publication is based on the publication "Properties of biomass and peat fuels. Handbook." written by the author. Additionally, a brief presentation is also given of the production methods of indigenous fuels, as well as the estimates of the production and utilisation potentials. At the end of the publication there are summary tables of the fuel properties, and the fuel quality classifications in force in Finland.</p>			
Keywords physical properties, wood fuels, peat, energy crops, coal, oils, gas, Finland, chemical composition, moisture content, density, combustion properties, calorific value, ash content, alkali metals, heavy metals			
Activity unit VTT Energy, Fuel Production, Koivurannantie 1, P.O.Box 1603, FIN-40101 JYVÄSKYLÄ, Finland			
ISBN 951-38-5699-2 (soft back ed.) 951-38-5740-9 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Project number ENE4808 ENET931	
Date October 2000	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 172 p. +app. 17 p.	Price D
Name of project		Commissioned by Imatran Voima Oy Foundation, VTT Energy	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	