



Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia

Eija Alakangas | Markus Hurskainen |
Jaana Laatikainen-Luntama | Jaana Korhonen

Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia

Eija Alakangas, Markus Hurskainen,

Jaana Laatikainen-Luntama & Jaana Korhonen



ISBN 978-951-38-8418-5 (nid.)
ISBN 978-951-38-8419-2 (URL: <http://www.vtt.fi/julkaisut>)

VTT Technology 258

ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-1211 (Painettu)
ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu)
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8419-2>

Copyright © VTT 2016

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)
02044 VTT
Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

Teknologiska forskningscentralen VTT Ab
PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)
FI-02044 VTT
Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)
FI-02044 VTT, Finland
Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Esipuhe

Tämä julkaisu on yhteenveto Suomessa käytettävien polttoaineiden keskeisistä ominaisuuksista. Julkaisuun on koottu puun, turpeen, kivihiilen, peltobiomassojen, eläinperäisten tähteiden, kierrätyspolttoaineiden, lietteiden, maakaasun, biokaasun sekä mineraali- ja bioöljyjen ominaisuuksia. Tiedot ovat peräisin kirjallisista lähteistä, tutkimuslaitoksista ja yrityksistä sekä VTT:n analyysilaboratorioiden määrittämisistä.

Ominaisuuksiin liittyviä määritelmiä on kerätty mm. puupolttoaineiden, turpeen ja kierrätyspolttoaineiden laatustandardeista sekä tämän julkaisun viitteistä. Polttoaineiden analyysimenetelmät kuvataan alan yleisesti käyttämien menetelmien mukaisesti. Julkaisuun on koottu myös keskeiset, kuhunkin polttoaineanalyysiin sovellettavat standardit.

Johtava tutkija Eija Alakangas on kirjoittanut muut luvut ja liitteet, paitsi tutkija Markus Hurskainen vastasi luvuista 5 ja 10 sekä liitteestä H ja erikoistutkija Jaana Laatikainen-Luntama vastasi luvuista 2.9, 8.5 ja 13.5. Tutkimusteknikko Jaana Korhonen on vastaavasti osallistunut luvun 11.2 sekä liitteen D kirjoittamiseen. Alakangas ja Hurskainen kokosivat yhteen termit sekä luvun 13.

Haluamme kiittää kaikkia tutkijoita ja yrityksiä edustajia, jotka ovat antaneet aineistoa julkaisun tekoon. Lisäksi kiitämme VTT:tä työn rahoittamisesta.

Jyväskylässä, huhtikuussa 2016

Tekijät

Sisältö

Esipuhe	3
Symbolit, termit ja muuntokertoimet	7
1. Johdanto	22
2. Ominaisuuksien määrittäminen ja laskentakaavat	23
2.1 Ominaisuuksien määrittämiseen ja laatuluokitteluun käytetyt menetelmät ...	23
2.2 Kosteuden määrittäminen kiinteille biopolttoaineille.....	24
2.2.1 Kosteuden määrittäminen uunikuivausmenetelmällä	24
2.2.2 Polttopuun kosteuden määrittäminen katkaisupurujen avulla	27
2.3 Lämpöarvojen, energiatihedysten ja energiamäärän laskenta.....	28
2.3.1 Yleistä	28
2.3.2 Kalorimetrinen lämpöarvo.....	28
2.3.3 Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	28
2.3.4 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa.....	29
2.3.5 Energiatiheys saapumistilassa.....	31
2.3.6 Toimitettu energiamäärä.....	31
2.4 Palakoon määrittäminen	31
2.5 Irtoisuuden määrittäminen.....	33
2.6 Pellettien ja brikettien mekaanisen kestävyuden määrittäminen.....	35
2.7 Kivihiilen jauhautuvuus ja leipoutuvuusindeksi	36
2.8 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen.....	37
2.9 Polttoaineen reaktiivisuus kaasutuksessa	37
2.10 Päästökertoimen laskeminen.....	39
3. Näytteenotto ja näytteen käsittely	41
3.1 Yleistä näytteenotosta.....	41
3.2 Näytteenottopaikka ja -tapa.....	42
3.3 Koneellinen näytteenotto.....	42
3.4 Manuaalinen näytteenotto	43
3.5 Yksittäisnäytteiden lukumäärä ja näytteiden koko.....	45
3.6 Näytteiden muodostaminen ja käsittely	47
3.7 Näytteen jakaminen	51
4. Puupolttoaineet	54
4.1 Puun ja puunosien ominaisuuksia.....	54
4.2 Hake ja murske.....	66
4.2.1 Yleistä hakkeesta ja murskeesta.....	66
4.2.2 Hakkuutähteet.....	68
4.2.3 Kokopuu- ja rankahake.....	75
4.3 Kuori ja kannot.....	81
4.4 Sahanpuru ja kutterinlastu.....	85
4.5 Polttopuu	86

4.6	Puubrikit	94
4.7	Puupelletit.....	95
4.8	Puuhiihi ja termisesti käsitellyt tiivistetyt biomassapolttoaineet	98
4.8.1	Puuhiihi.....	98
4.8.2	Termisesti käsitellyt tiivistetyt kiinteät biopolttoaineet	99
4.9	Kierrätyspuu	103
5.	Mustalipeä	109
6.	Turve.....	116
6.1	Turvevarat ja käyttö.....	116
6.2	Jyrsinturve.....	117
6.3	Palaturve.....	118
6.4	Turve polttoaineena	119
7.	Peltobiomassat ja eläinperäiset tähteet	130
7.1	Peltobiomassojen bioenergiamahdollisuudet.....	130
7.2	Vilja ja olki	131
7.3	Ölly- ja kuitukasvit	138
7.4	Ruokohelpi ja järviruoko	139
7.5	Eläinperäiset tähteet	145
8.	Kierrätyspolttoaineet.....	148
8.1	Jätteiden synty.....	148
8.2	Pakkaukset ja jätepaperi	152
8.3	Jätepelletit	156
8.4	Teollisuuden ja rakennustoiminnan jätteet.....	157
8.5	Autohajottamojäte ja rengasromu	162
8.6	Kaatopaikkajätteen ominaisuuksia.....	164
9.	Lietteet.....	165
10.	Kivihiihi.....	169
10.1	Hiilen synty ja luokittelu	169
10.2	Hiilen käyttö Suomessa	171
10.3	Suomessa käytettävien kivihiihten ominaisuudet	172
11.	Polttoöljyt	180
11.1	Raskaat ja kevyet polttoöljyt.....	180
11.2	Nopeapyrolyysiöljy	182
12.	Kaasumaiset polttoaineet.....	186
12.1	Maakaasu.....	186
12.2	Nestekaasut.....	187
12.3	Jalostamo-, koksaaamo- ja masuunikaasu.....	188
12.4	Biokaasu	189
13.	Polttoaineiden ominaisuudet ja energiantuotanto.....	196
13.1	Polttoaineominaisuuksien yhteys polttoon.....	196
13.2	Polttoaineet ja niiden asettamat haasteet polttoprosessille	198
13.3	Biopolttoaineiden ja turpeen/kivihiihten seospoltto.....	200
13.4	Kiinteiden polttoaineiden laatuvaatimukset eri käyttäjärhymille.....	203
13.5	Polttoaineen reaktiivisuuden vaikutus kaasutukseen	206

Lähdeluettelo	215
----------------------------	------------

Liitteet

- Liite A. Kiinteisiin biopolttoaineisiin liittyvät standardit
- Liite B. Kierrätyspolttoaineiden standardit
- Liite C. Turpeen ja kivihiilen standardit
- Liite D. Pyrolyysi- ja mineraaliöljyjen määrittämiseen liittyvät standardit
- Liite F. Jyrsinturpeen ja palaturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia
- Liite G. Turvepolttoaineiden laatuluokitus
- Liite H. Kivihiilen ominaisuuksia
- Liite I. Tilastokeskuksen polttoaineiden luokitus

Tiivistelmä

Abstract

Symbolit, termit ja muuntokertoimet

Symbolit

d, k.a.	kuiva-aines, kuivana
daf	tuhkaton kuiva-aines
ad	analyysikuiva, ilma-kuiva
ar	saapumistilassa
A	tuhkapitoisuus, A_d , p-%, kuiva-aineessa
ρ	tiheys, kg/m ³
BD	irtotiheys, kg/m ³
DE	kiintotiheys (saapumistilassa), kg/dm ³
D	halkaisija, mm
DU	mekaaninen kestävyys, p-%
E	energiatiheys saapumistilassa, E_{ar} , MWh/m ³ tai kWh/irto-m ³
F	hienoaineksen määrä (< 3,15 mm), p-%
i-m ³	irtokuutiometri
L	pituus, mm tai cm
m	massa, mg, g tai kg
m ³	puulla tarkoittaa yleensä kiintokuutiometriä tai k-m ³
M	kokonaiskosteuspitoisuus saapumistilassa märkänä M_{ar} , p-%
MD	yksittäisen rakeen/palan suurin mitta ja suurimpien mittojen summa, mm
OP	ylisuuret kappaleet, p-%
p-%	paino-% (tässä julkaisussa pääominaisuudet on ilmoitettu painoprosentteina, vaikka aina ei ole prosenttimerkin edessä p- tai paino-sanaa)
P	palakoon tai palakokojakauman nimike saapumistilassa, nimike on pääfraktion mukaan
$q_{p,net, d}$	tehollinen lämpöarvo vakiopaineessa kuiva-aineessa, MJ/kg
$q_{V,gr, d}$	kalorimetrinen lämpöarvo vakiotilavuudessa, kuiva-aineessa, MJ/kg
Q	tehollisen lämpöarvon nimike vakiopaineessa, saapumistilassa, $q_{p,net,ar}$ J/kg tai kWh/kg tai MWh/t standardissa SFS-EN ISO 17225-1

VM	haihtuvat aineet, % kuiva-aineessa
W	toimitettu energiamäärä, MWh tai GJ
U	kosteussuhde, kosteus kuiva-painosta U_d , p-%

Käytetyt termit (Terms in English)

Alkuaineanalyysi, elementaarianalyysi, p-% (elementary analysis, ultimate analysis)

polttoaineen hiilen C, vedyn H, typen N ja rikin S määrittäminen täydellisen polton avulla. Happi voidaan mitata, mutta tyypillisesti happipitoisuus O kuiva-aineessa lasketaan seuraavasti: 100 % – kuiva-aineen CHNS- ja tuhkapitoisuus (p-%).

Analyysinäyte (analysis sample)

laboratorionäytteen osanäyte, jonka nimellisesti suurin palakoko on 1 mm tai alle ja jota käytetään monissa kemiallisissa ja fysikaalisissa analyyseissä.

Antrasiitti (anthracite 1211¹)

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

Asettumiskulma (angle of drain)

ks. kitkakulma.

Biodiesel (biodiesel)

yleisnimitys biopohjaiselle dieselpolttoaineelle. Esteröimällä kasviöljy alkoholilla saadaan tavallisiin dieselmootoreihin sopivaa polttoainetta. Biodieseliä voidaan valmistaa myös puuperäisistä polttoaineista. Dieselöljyssä (1133) on keskimäärin 11 % bio-osuutta tilavuudesta laskien.

Biokaasu (321) (biogas)

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.

Bioliete (3149) (biosludge)

jäteveden biologisessa puhdistuksessa syntyvää lietettä. Metsäteollisuuden biolietettä voi verrata yhdyskuntien puhdistamolieteteeseen. Siinä on mikrobimassan lisäksi myös puun uuteaineita, ligniiniyhdisteitä ja absorboituneita klooriorgaanisia yhdisteitä.

Biomassa (biomass)

biologista alkuperää oleva aine, lukuun ottamatta geologisiin muodostuksiin peittyneitä ja/tai fossilisoituneita aineksia. Biomassoja ovat puubiomassa, kasvibiomassa, hedelmäbiomassa ja vesibiomassa. Lisäksi EU-direktiiveissä on hieman toisistaan poikkeavia määritelmiä biomassalle.

Biopohjainen osuus (biobased content)

polttoaineen osuus, joka on peräisin biomassasta, joka tavallisesti ilmoitetaan prosentteina tuotteen kokonaismassasta.

Biopolttoaine (biomass fuel)

biomassasta suoraan tai epäsuorasti tuotettu polttoaine.

Bioöljy (3221) (bio-oil)

kasveista (mm. rypsiä, rapsista, ohrasta), puusta ja metsäteollisuuden sivutuotteista valmistettua öljyä.

¹ Tilastokeskuksen luokitus, ks. www.tilastokeskus.fi/polttaineluokitus

Ei-puupohjainen biomassa (non-woody biomass)

biopolttoaine, joka on valmistettu kasvi-, hedelmä- tai vesibiomassasta ja johon kuuluvat sekoitukset ja seokset. Hedelmäpuiden runko ja energiakasvit kuten poppeli kuuluvat puubiomassaan.

Eläinperäiset tähteet (318) (animal residues and by-products)

eläinten hoidosta peräisin olevat maataloussivutuotteet tai tähteet mm. eläinten lanta.

Energiajae (energy fraction)

energiakäyttöä varten syntypaikalla lajiteltu polttokelpoinen jäte.

Energiajyvä (3172) (energy grain)

jyvä, jota käytetään energian tuottamiseen.

Energiapaju (3115) (energy willow)

lyhytkiertoisella viljelyllä energiakäyttöön kasvatettu pajupuusto tai pajubiomassa.

Energiaturve (21) fuel peat

turvetuote, joka on tarkoitettu energiantuotantoon.

Epäpuhtaus (impurity, foreign material)

partikkeli, kemikaali tai muu ei-toivottava aine tai esine, joka ei normaalisti esiinny polttoaineessa. Epäpuhtauksia ovat mm. kivet, hiekka, metalli, betoni, uretaanivaaho, pinnoitusaineet, liimat, muovit ja narut.

Fraktio (fraction)

jae, partikkeli, rae. vrt. palakoko.

Haihtuva aine, % (volatile matter)

polttoaineen sisältämien orgaanisten aineiden kaasumuodossa poistuvia komponentteja ja hajoamistuotteita kuumennettaessa polttoainetta 900 °C ± 10 °C seitsemän minuutin ajan standardisoidussa ilmatilassa. Haihtuvien aineiden prosenttiosuus lasketaan massan vähenemisenä, kun tuloksesta on vähennetty ensin kosteuden aiheuttama massan väheneminen. Haihtuvat aineet ilmoitetaan painoprosenteina kuiva-aineessa.

Hake, puuhake (chip, wood chip)

tietynkokoisiksi palasiksi haketettu puubiomassa, joka on valmistettu mekaanisesti leikkaavilla terillä. Puuhakkeen palat ovat suorakaiteen muotoisia, sivujen tyypillinen pituus on 5–50 mm ja paksuus on pieni verrattuna muihin mittoihin.

Halko (3111) (wood log)

noin yhden metrin pituisia, polttokäyttöön tarkoitettuja halkaistuja tai pyöreitä karsittuja pölkkyjä.

Hakkuutähde (3113) (logging residue)

runkopuun hakkuun yhteydessä syntyvä metsään jäävä puuaines, kuten oksat ja latvat sekä hakkuualueille jäävä pienikokoinen puu, ns. raivauspuu ja hylkypölkkyt.

Happoluku (acid number)

karboksyylihappoluku (CAN) ilmaisee kaliumhydroksidin määrän, joka tarvitaan neutraloimaan hapot yhdessä grammassa öljyä. Karboksyylihappoluku ei erottele happoja niiden vahvuuden perusteella, vaan osoittaa karboksyylihappojen kokonaismäärän näytteessä. Karboksyylihappolukuun eivät kuitenkaan vaikuta erittäin heikot hapot, joiden dissosioitumisvakio (pKa) on alle 10⁻⁹. Fenoliluku (PN) mittaa fenolisten yhdisteiden happamuuden. Kokonaishappoluku (TAN) koostuu näistä molemmista (CAN+PN). Pyrolyysiöljyn happoluvun mittauksissa suositellaan käytettäväksi ASTM standardia D664 (potentiometrinen).

Harvennuspuu (3112) (thinning wood)

harvennushakkuissa poistettava osa metsikön puustosta, harvennushakkuista korjattu puutavara.

Hienoaines (p-%) (fines)

palamaisen polttoaineen joukossa olevaa tuotanto- ja käsittelyvaiheessa syntynyttä ainesta, jonka osuus määritetään seulomalla. Hienoaineksen palakoko on alle 3,15 mm.

Hiiltojäännös, % (MCR, carbon residue)

syntyy näytteen haihtumisen ja pyrolyysin jälkeen typpikehässä. Tulos indikoi näytteen taipumusta muodostaa suhteellista hiiltä. Hiiltojäännös määritetään myös mineraaliöljyille.

Hiiltymisaste (coal rank)

hiilten luokitteluparametri, joka kuvaa alkuperäisen kasvimateriaalin muuntumisastetta hiileksi. Antrasiitilla hiiltymisaste on korkein, ligniitillä alhaisin.

Hiontapöly (3124) (grinding dust)

puutavaran ja puulevyjen hionnassa syntyvä pölymäinen puutähdde.

Hivenaineet (trace elements, micronutrient)

aineita, joiden määrä kasveissa ja eläimissä on vähäinen, mutta jotka ovat välttämättömiä niiden normaalille kehitykselle mm magnesium (Mg), kalsium (Ca), rauta (Fe), sinkki (Zn), seleeni (Se) ja kromi (Cr). Ks. mineraalit.

Hydrofiilinen (hydrophilic)

materiaali, jolla on taipumus vetää vettä puoleensa.

Hydrofobinen (hydrophobic)

materiaali, jolla on taipumus hylkiä vettä.

Hygroσκοoppinen (hygroscopic)

materiaali, jolla on taipumus adsorboida tai absorboida kosteutta ilmasta.

Höyryhiili, kivihiili (1212) (steam coal)

käytetään voimalaitoksilla lämmön ja sähkön tuottamiseen.

Irtotiheys, BD (bulk density)

homogeenisen materiaalin *irtotiheys* (tilavuuspaino) on polttoaineen massa laskettuna kehystilavuutta (eli kuormatilavuutta) kohti.

Jyrsinturve (211) (milled peat)

energiaturve, joka on tuotettu jyrsimällä turvetta turvesuon pinnalta ja kuivattamalla se. Yleensä turve kuivatetaan turvesuolla aurinkoenergialla. Jyrsinturve on palakooltaan epätasaista ja sisältää pääasiassa pölymäistä turvetta sekä erikokoisia turverakeita. Turveaineksen lisäksi jyrsinturve voi sisältää myös pieniä määriä maatumattomia tai huonosti maatumattomia karkeita kasvinosia (liekokuuta, varpuja, tupasvillaa yms.) sekä pieniä määriä epäpuhtauksia.

Jähmepiste, °C (pour point)

alin lämpötila, jossa öljy on vielä juoksevaa.

Jäte (waste)

aine tai esine, jonka sen haltija on poistanut, aikoo poistaa käytöstä taikka on velvollinen poistamaan käytöstä.

Jätepuu (315) (waste wood, used wood)

rakennus-, purku- ja korjaustoiminnassa syntyvää jättepuuta sekä puunjalostusteollisuudessa syntyvää jättepuuta, joka sisältää liima-, maali-, kyllästys- tms. aineita. Poikkeuksena on painekyllästetty puu, joka on vaarallista jätettä.

Kalorimetrinen lämpöarvo, $q_{gr,v}$ (gross calorific value)

ylempi lämpöarvo ja 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 ja arvo ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti vakiotilavuudessa. Katso myös lämpöarvo, tehollinen lämpöarvo ja tehollinen lämpöarvo saapumistilassa.

Kanto (3114) (stump)

kaatopinnan alapuolinen rungon osa, joka nousee kannon mukaan kannon noston yhteydessä.

Kemiallinen käsittely (chemical treatment)

mikä tahansa käsittely kemikaaleilla ilmaa, lämpöä tai vettä lukuun ottamatta (esim. liima, pinnoite ja maali). Kemiallisia käsittelyjä kuvataan SFS-EN ISO 17225–1 standardin opastavassa liitteessä C.

Kierrätyspolttoaine, SRF (3231) (solid recovered fuel)

yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoisista, kuivista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua polttoainetta. Katso myös RDF ja REF.

Kierrätyspuu (315)

biopolttoaineeksi luokiteltava puhdas puutähdde tai käytöstä poistettu puu tai puutuote, joka ei sisällä muovipinnoitteita tai halogenoituja orgaanisia yhdisteitä eikä raskasmetalleja. Esimerkiksi uudisrakentamisen puutähdde, kuormalavat, puupakkaukset jne.

Kiinteä hiili (fixed carbon)

hiili, joka ei poistu haihtuvien aineiden mukana (terva-aineisiin tai kaasuihin), vaan jää hiiltojäännökseksi, josta on poistettu tuhkan osuus. Kiinteä hiili kuiva-aineessa lasketaan seuraavasti: 100 % - Haihtuvat aineet (p-% kuiva-aineessa) – tuhka (p-% kuiva-aineessa).

Kiintoaine (pyrolysis solid)

öljyn kiintoaine on pääosin syklonista kaasun mukana kulkeutunutta hiiltojäännöstä. Mukana on myös kattilan hiekkapedistä tai raaka-aineesta peräisin olevaa hiekkaa ja tuhkaa. Kiintoaine määritetään standardimenetelmällä ASTM D7579 liukenemattomana aineksena metanoli-dikloorimetaaniliuokseen (1:1). Kiintoaineksessa on mukana orgaanisen aineksen jäämiä, jotka eivät liukene ko. liuottimeen.

Kiintotiheys, todellinen tiheys, (gross density)

saadaan, kun polttoaineen massa jaetaan materiaalin todellisella tilavuudella, jolloin tilavuudessa ei ole mukana materiaalin sisältämien huokostenkaan tilavuutta. Huokoisuus on näennäistiheyden ja todellisen tiheyden suhde.

Kitkakulma (α) (angle of repose)

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.

Kivihiili (1212) (coal)

kiinteä orgaaninen fossiilinen polttoaine, jonka lämpöarvo on yli 24 MJ/kg tuhkatomassa aineessa. Kivihiililaadut luokitellaan pääasiassa haihtuvien aineiden määrän ja lämpöarvon perusteella.

Klooripitoisuus, Cl, % tai mg/kg kuiva-aineessa (chlorine)

polttoaineen sisältämä kokonaiskloorimäärä.

Kokoomanäyte (combined sample)

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

Kokopuu (3112) (whole tree)

kaadettu ja karsimaton puu kanto ja juuristo pois lukien. Sisältää rungon kuorineen, oksat ja neulat/lehdet.

Koksi (123) (coke)

kivihilestä kuivatislaamalla valmistettu polttoaine, jota käytetään pääasiassa rauta- ja metalliteollisuudessa. Koksia voidaan valmistaa myös turpeesta tai biomassasta.

Koksihiili (122)(coking coal)

ks. metallurginen hiili

Kosteus, kosteuspitoisuus, M, paino-%, p-% (moisture, water)

polttoaineen sisältämä vesimäärä, joka ilmoitetaan joko kosteaa tai kuivaa ainetta kohti. *Kosteusprosentti* eli kosteus märkäpainosta on veden prosenttiosuus aineen kokonaismassasta. *Tasapainokosteudella* tarkoitetaan vesimäärää, jonka polttoaine kykenee pidättämään tietyissä oloissa. *Toimituskosteudeksi (as received)* kutsutaan kosteutta, joka polttoaineella on, kun se toimitetaan kuluttajalle. *Käyttökosteus* tarkoittaa käyttövalmiin polttoaineen kosteutta. Puupolttoaineiden yhteydessä puhutaan *tuorekosteudesta*, joka tarkoittaa kuivattamattoman polttoaineen kosteutta. *Kosteussuhde (U)* on polttoaineen vesimäärän suhde kuiva-aineeseen. Katso tarkemmin *Ominaisuuksien määrittäminen* (luku 2). Öljyille käytetään termiä vesipitoisuus (water content).

Kosteusnäyte (moisture sample)

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

Kuiva-aine, k.a., d, TS (dry matter)

kuiva-aineen osuus materiaalin kokonaismäärästä massana. Tämä on polttoaine- ja muiden analyysien raportointiperusta. Polttoaineen kuiva-aineessa on sekä palavia että palamattomia ainesosia. Kuiva-aine koostuu hiilestä, vedystä, hapesta, typestä, rikistä ja palamattomasta epäorgaanisesta ainesosasta eli mineraaliaineksestä (tuhka).

Kuivajae (dry fraction)

jäljelle jäävä polttokelpoinen jäte, kun yhdyskuntajätteestä on lajiteltu erilleen biojäte, ongelmajäte ja muu kierrätyskelpoinen jäte.

Kuiva-tuoretiheys (basic density)

pelkän puuaineen kuivamassan tuoreessa tilassa mitattuna tilavuusyksikköä kohti eli kuiva-tuoretiheys (kg/m^3) on kuivamassa (kg) jaettuna tilavuudella tuoreena (m^3).

Kuori (3121) (bark)

ainespuusta eri kuorintatekniikoilla syntyvä kuoritähde.

Kuorimolietteet (3149) (debarking sludges)

kuorimossa syntyviä lietteitä, mm. kuoriliete, hiekanerottimen hiekkaliete ja selkeyttimen liete.

Kutterinlastu, höylänlastu (3124) (cutter chips, shavings)

puutavaran höyläyksessä syntyvä puutähde

Kyllästetty puu (3233) (impregnated wood)

kyllästetyt puutuotteet esimerkiksi painekyllästetty puu ja sähkö- ja puhelinpylväät sekä kestopuu.

Käytöstä poistettu puu tai puutuote (315) (used wood)

puuaines, joka on poistettu ensisijaisesta käytöstä. Termi vastaa tilastojen kierrätyspuutermiä (315).

Laboratorionäyte (laboratory sample)

toimituserästä tai sen osasta kootuista kokoomanäytteistä homogenisoimalla ja jakamalla muodostettu osanäyte, joka toimitetaan laboratorioon analysoitavaksi. Vertailuja varten voidaan samasta kokoomanäyt-

teestä muodostaa useampia rinnakkaisia laboratorionäytteitä esimerkiksi kosteuden määrittystä varten. Laboratorionäytteen voi valmistaa näytteentoimittaja tai laboratorio sinne toimitetusta kokoomanäytteestä.

Latvusmassa (3113) (crown, tops)

ainespuihakuun sivutuote, johon kuuluvat latvat, oksat, neulasen ja lehdet. Latvusmassa on synonyymi latvuksille ja oksille.

Leimahduspiste (flash point)

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

Ligniitti (1221) (lignite)

ruskahiili, jossa on vielä näkyvä puun rakenne. Ruskohiilellä on alhaisempi hiilipitoisuus, mutta happi- ja vetypitoisuus vastaavasti kivihiiltä korkeampi.

Lignoselluloosa (lignocellulose)

kasvin soluseinämän biomassa, joka koostuu pääasiassa selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä.

Liukumiskulma (angle of repose)

ks. kitkakulma.

Lyhytkiertoviljelty puubiomassa (3173) (short rotation woody biomass)

puubiomassa, joka on kasvatettu raaka-aineeksi tai energiaksi lyhytkiertometsissä, jonka kiertoaika on tyypillisesti 5–8 vuotta (esim. energiapaju).

Lämpöarvo (Q, MJ/kg) (calorific value)

täydellisessä palamisessa kehittyvän lämmön määrä polttoaineen massaa kohti. Usein ilmoitetaan lämpöarvo myös tilavuutta kohti eli ns. energiatiheys, E (MJ/m³ tai MWh/m³). Katso myös kalorimetrinen lämpöarvo ja tehollinen lämpöarvo.

Maakaasu (1311) (natural gas)

luonnon lähteistä sellaisenaan tai öljyn tuotannon yhteydessä erotettavissa oleva kaasumaisten hiilivetyjen seos. Maakaasu koostuu pääosin metaanista ja se sisältää pieniä määriä etaania, propaania, butaania, hiilidioksidia ja typpeä. Maakaasu voidaan myös nesteyttää ns. LNG (Liquefied Natural Gas) (1312).

Maatumisaste (decomposition rate)

turpeen amorfisen humusaineen määrä verrattuna alkuperäisen rakenteensa säilyttäneisiin kasvisolukkoihin. Yleisin maatumisasteen määrittäminen 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 1–10. Kun H-arvo on 1, turve on käytännöllisesti katsoen maatumaton, ja kun arvo on 10, turvetta muodostava kasviainekasvaines on täysin hajanantunut. Von Postin menetelmä soveltuu kostealle luonnontilaiselle turpeelle. Heikkoutena on menetelmän subjektiivisuus. Muita maatumisasteen määrittämenetelmiä ovat esimerkiksi sentrifugimenetelmä ja ns. Pjvtshenkon menetelmä.

Maisemanhoidon tähteet (landscape management residues, landscape care wood or verge)

puu-, kasvi- ja hedelmäbiomassatähteet, jotka ovat peräisin maiseman, puistojen tai hautausmaiden hoidosta. Nämä tähteet sisältävät mm. puiden oksia, tienvierien viherainesta tai pensaiden puuainesta.

Masuunikaasu (123) ja koksikaasu (124) (blast furnace gas)

koksin valmistuksesta tai masuunista sivutuotteena saatava vetyä, kevyitä hiilivetyjä ja hiilidioksidia sisältävä kaasu. Sisältää myös masuunikaasuun rinnastettavan ferrokromin valmistuksessa syntyvään CO-kaasuun (126).

Mekaaninen kestävyys, DU (mechanical durability)

tiivistettyjen/puristettujen biopolttoainekappaleiden (esim. brikettien, pellettien) kyky säilyä vahingoittumattomana käsittelyn ja kuljetuksen aikana. Ks. Myös rummutuslujuus

Metallurginen hiili (122) (metallurgical coal)

metallurginen eli koksishiili on kaksin valmistukseen käytettävää hiiltä.

Metsähake (forest chips)

metsäpuubiomassasta valmistettu puuhake. Suomessa metsähaketermiä käytetään yleisterminä tarkoittaan ranka- (3112), kokopuu- (3112) ja hakkuutähdehaketta tai -mursketta (3113).

Metsäpolttoaine (311) (forest wood)

puupolttoaine, joka on valmistettu puuraaka-aineesta, jota ei ole aikaisemmin käytetty muuhun tarkoitukseen ja se valmistetaan suoraan puusta mekaanisella prosessilla. Ks. kanto, hakkuutähde, metsähake, harvennuspuu ja latvusmassa.

Metsätähde (forest residues)

ainespuun korjuussa ja nuorta metsää harvennettaessa tähteeksi jääneet oksat, latvukset ja hukkarunkopuu. Metsätähteen kuivumisesta riippuen viheraines on mukana tai puuttuu.

Mineraalit, pääalkuaineet (major elements), vähäisinä määrinä esiintyvät (minor elements)

ovat sitoutuneet pääasiassa polttoaineen epäorgaaniseen osaan. Pääalkuaineita ovat alumiini (Al), kalsium (Ca), rauta (Fe), magnesium (Mg), fosfori (P), kalium (K), tina (Sn), natrium (Na) ja titaani (Ti). Erittäin pieninä pitoisuuksina (minor elements) esiintyvät ovat arseeni (As), kadmium (Cd), koboltti (Co), kromi (Cr), kupari (Cu), elohopea (Hg), mangaani (Mn), molybdeeni (Mo), nikkeli (Ni), lyijy (Pb), antimoni (Sb), vanadiini (V) ja sinkki (Zn). Mineraalikoostumus pohjautuu polttoaineen syntytapaan ja -paikkaan, minkä vuoksi pitoisuudet vaihtelevat suuresti.

Mineraaliöljy (mineral oil)

mineraaliöljyksi kutsutaan nestemäisiä, kallioperästä tavattavia hiilivetyseoksia ja niistä valmistettuja tuotteita. Raakaöljy on maan sisällä miljoonien vuosien kuluessa eloperäisen luonnon jäänteistä syntyntä tuotetta. Raakaöljyn hiilivetyliikettä pilkotaan lämmön ja paineen sekä katalyyttien avulla eli krakataan sekä tislataan useassa vaiheessa erilaisin menetelmien. Lopputuotteena saadaan kaasuja, liuottimia, bensiinejä (112), petroleja (1131, 1132), keskiraskaita öljyjä kuten dieselöljyjä (1133) ja kevytpolttoöljyjä (113), raskaita polttoöljyjä (114), laivapolttoöljyjä sekä bitumeja.

Murske (hog fuel)

puupolttoaine, jolla on vaihteleva palakoko ja -muoto ja joka on valmistettu siten, että puu murskataan tylpällä työkaluilla, kuten teloilla, vasaroilla tai "varstoilla".

Mustalipeä (313) (black liquor)

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.

Nimellisesti suurin palakoko (nominal top size)

kiinteiden biopolttoaineiden palakoon määrittämiseen käytetty pyöreäaukkoisen seulan aukkokoko, jonka läpäisee vähintään 95 p-% kokonaispainosta.

Näennäinen tiheys (solid density)

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.

Näyte (sample)

polttainemäärä, joka edustaa suurempaa määrää, jolle laatu on määritettävä.

Orgaaniset halogenoidut yhdisteet (halogenated organic compounds)

fluoria (F), klooria (Cl), bromia (Br) tai jodia (I) sisältäviä yhdisteitä. Esimerkiksi PVC-yhdisteet (PVC-polyvinyylidikloridi; muoveissa) ja PCB-yhdisteet (PCB-polykloorattu bifenyyl; ennen 1970 mm. PVC-muovin lisäaine). Furaaneja (PCDF-polyklooratut dibentsofuraanit) ja dioksiineja (PCDD-polyklooratut dibentsodioksiinit) voi muodostua, kun poltetaan orgaanisia klooriyhdisteitä huonoissa palamisolosuhteissa.

Orgaaniset yhdisteet (OC, OM) (organic compounds)

ovat hiilyhdisteitä. Kaikki hiilyhdisteet eivät kuitenkaan ole orgaanisia, esim. hiilidioksidi (CO₂), natriumkarbonaatti (Na₂CO₃) ja kaliumsyaniidi (KCN) ovat epäorgaanisia yhdisteitä. Orgaaniset yhdisteet luokitellaan mm. seuraavasti: alkaanit, alkeenit, aromaattiset hiilivedyt, alkoholit, aldehydit, halogenoidut yhdisteet, amidit, amiinit, areenit, karboksyylihapot, esterit, eetterit, ketonit, nitrilit, sulfidit ja tiolit. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ovat yhdisteitä, joiden höyrynpaine on korkea. Orgaaniset yhdisteet muodostavat suuren osan ulkoilman pienhiukkasmassasta.

Osanäyte, näytteen osa, osatoimituserä (sub sample, sub lot)

osa erästä, jolle testitulokset vaaditaan. Sopijapuolet voivat sopia, että toimituserä jaetaan osatoimituseriin, jotta ominaisuuksien määrittystarkkuus paranee tai määrittelyn rutiinit helpottuvat tai nopeutuvat. HUOM. Osatoimituserän koon määrittelyssä on otettava huomioon näytteenkäsittelylaitteet tai sen koko sovitaan erikseen.

Palakoko, raekoko (particle size)

palamaiselle polttoaineelle ominaisen palan koko. Kunkin polttoaineen palakokojakauma (partikkelikokojakauma, raekokojakauma, hiukkaskokojakauma, fraktiojakauma) määritetään seulonnan avulla tai analyysaattoreilla (pienikokoiset hiukkaset). Seula-analyyseissä määritetään eri silmäkokoa oleville seulalevyille jäävä osuus tasapainokostean näytteen (20 p-%) painosta (ks. Luku 2).

Palaturve (212) (sod peat)

energiaturvetta, joka on tuotettu nostamalla turvetta turvesuosta ja muokkaamalla se mekaanisesti paloiksi (esim. sylinterin-, kuutio- tai lainepaloiksi). Palat kuivataan aurinkoenergialla pääasiassa turvesoilla. Turvepalojen halkaisija ja muoto ovat melko tasalaatuisia, mutta palojen pituus voi vaihdella. Palaturve sisältää myös vaihtelevia määriä hienoaainesta, joka on muodostunut tuotanto- ja käsittelyvaiheissa, sekä karkkeita kappaleita ja pieniä määriä epäpuhtauksia.

Peltobiomassat (31) (energy crops)

pelloilla tai soilla kasvatettuja energiakasveja (317) (ruokohelmi, öljykasvit) tai energiametsää (paju 3115) sekä viljakasvien osia (olki) (3172), joita voidaan käyttää polttoaineena tai joista voidaan jalostaa joko kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita. Myös järviruoko kuuluu ominaisuuksien puolesta tähän ryhmään. SFS-EN ISO 17225-1 standardissa paju kuuluu puupolttoaineisiin (3115).

Pilke, klapi, pienhalko, nalikka (3111) (chopped and split log)

koti- ja maatalouden keskuslämmityskattiloissa ja tulisijoissa käytettävä 25–50 cm pitkä katkaistu ja halkaistu polttopuu. Termit tarkoittavat samaa. Pilkkeellä voidaan tarkoittaa myös vain 5–15 cm pituisia rangaista (viistosti tai suoraan) pätkittyjä ja halkaistuja paloja, joita käytettiin mm. sodan aikana puukaasuttimissa.

Polttoainepuru, polttoainepöly (312) (fuel dust)

jauhettu biopolttoaine, jonka tyypillinen palakoko on 1–5 mm. Esimerkiksi sahanpuru (3122) ja hiontapöly (3124).

Polttohake, energiahake (wood chips)

yleisnimitys polttoon tai muuhun energiantuotantoon käytettävälle, eri tekniikoilla tehdylle hakkeelle.

Polttopuu (firewood, fuelwood)

yleisnimitys kaikelle puupolttoaineelle puu-, kuori- ja viheraines mukaan lukien. Polttopuu nimitystä käytetään tilastoissa vain koti- ja maatalouden puupolttoaineille: halot (billets) ja hake (wood chips).

Primäärinen, ensisijainen biomassa

biomassa, joka on tuotettu suoraan fotosynteesin avulla ja korjattu tai kerätty maasta tai metsästä, jossa se on kasvanut. HUOM. Esimerkkejä ovat energiakasvit, monivuotiset ruohot ja puut, kasvitähteet sekä hakkuutähteet.

Primääriliete (primary sludge)

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

Puristuvuus, % (compressibility)

puristuvuus ilmoittaa vapaasti asettuneen ja tiivistetyn massamateriaalin tiheyksien eron suhteessa tiivistettyyn arvoon.

Purkupuu (3232) (demolition wood)

käytöstä poistettu puu tai puutuote, jota syntyy purettaessa rakennuksia tai tie- ja vesirakennustyön rakennelmia. Vastaavien kohteiden uudisrakentamisen puutähte on kierrätyspuuta (315).

Puubiomassa (31) (woody biomass)

puusta ja pensaista peräisin oleva biomassa. Määritelmä kattaa metsä- ja viljelypuun (311), puunjalostusteollisuuden sivutuotteet ja tähteet (312, 314) sekä käytöstä poistetun puun tai puutuotteen (315).

Puubriketti (316) (wood briquette)

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 (326) (charcoal, biochar, biocarbon, biocoke, biocoal)

orgaanista hiiltä, joka valmistetaan kuumentamalla puuta hapettomassa tilassa (hiiltämällä eli pyrolyysin avulla). Puuhiili on haurasta huokoista materiaalia, jolla on puun alkuperäinen muoto ja jonka mikrorakenne säilyttää kasvisolurakenteensa. Hiillossa eli puun hitaassa pyrolyysissä syntyy kaasuja, kondensoituvia nesteitä ja kiinteää hiiltä. Grillihiilen valmistukseen käytetään mm. miiluja ja retortteja. Puuhiiltä voidaan valmistaa myös torrefioinnilla, höyryräjäytyksellä tai märkähiillolla voimalaitoksien polttoaineeksi.

Puujäte, jätetäpuu (wood waste, waste wood)

Rakennus-, purku- ja korjaustoiminnassa syntyvää jätetäpuuta (3232) sekä puunjalostusteollisuudessa syntyvää jätetäpuuta (314, 315), joka sisältää liima-, maali-, kyllästys- tms. aineita. Jätetäpuu kuuluu biopolttoaineisiin, jos se ei sisällä halogenoituja orgaanisia yhdisteitä ja raskasmetalleja puunkyllästysaineilla tai pinnoitteilla tehtyjen käsittelyjen seurauksena enempää kuin luonnonpuu. Poikkeuksena on painekyllästetty puu (3233), joka on vaarallista jätettä.

Puunjalostusteollisuuden sivutuotteet ja tähteet (312) (by-products and residues from wood processing industry)

puubiomassatähteet, jotka ovat peräisin puun käsittelystä sekä sellu- ja paperiteollisuudesta (kuori, korkki-tähteet, tasauspätkät, särmäystähteet, kuitulevytähteet, kuituliete, hiontapöly, vaneritähteet, sahanpuru, sahauspinnat, losot ja puulastut). Tilastokeskus ja Energiavirasto luokittelevat teollisuuden puutähteistä (rimat, tasauspätkät, levyteollisuuden viilut, vanerien syrjät yms.) tehdyn hakkeen tai murskeen sekä saha-teollisuuden sivutuotteena syntyvän kuorellisen tai kuorettoman hakkeen tai murskeen, joka ei sisällä halogenoituja orgaanisia yhdisteitä, raskasmetalleja tai muoveja, luokkaan 3123 ja biopolttoaineeksi.

Puupelletti (316) (wood pellet)

puristamalla sahanpurusta tai kutterinlastusta valmistettuja, sylinterimäisiä rakeita. Pellettien halkaisija on 6–12 mm ja pituus 10–40 mm. Pellettejä voidaan valmistaa myös turpeesta (213) ja jätteistä (3235).

Puupolttoaineet, puuperäiset biopolttoaineet (woody biomass, wood-based biomass)

kaikki biopolttoaineet, jotka ovat suoraan tai epäsuorasti peräisin puubiomassasta.

Puutähde (wood residue)

puutähteellä tarkoitetaan rakennus-, purku- ja korjaustoiminnassa syntyvää puuta (3129 tai 3232) sekä puunjalostusteollisuudessa syntyvää puuta, joka voi sisältää liima-, maali-, kyllästys- tms. aineita. Kemiallisesti käsittelemätön puutähde luokitellaan luokkaan A ja kemiallisesti käsitelty puu luokkaan B (315), jos se ei sisällä halogeenisia orgaanisia yhdisteitä tai raskasmetalleja puunkyllästysaineilla tai pinnoitteilla tehtyjen käsittelyjen seurauksena enempää kuin luonnonpuu.

Puutähdehake (3123) (wood chips from industrial wood residues)

teollisuuden kuorellisista ja kuorettomista puutähteistä (rimat, tasauspätkät, yms.) tehty hake, joka ei sisällä maalattua tai muuten käsiteltyä puuta.

Pyrolyysiöljy (3222) (pyrolysis oil)

puusta tai muusta biomassasta ns. nopealla pyrolyysillä valmistettua tummanruskeaa nestettä, jonka ominaisuudet eroavat öljystä. Nopeassa pyrolyysissä puu (kosteus < 10 %) kummennetaan hapettomissa olosuhteissa hyvin nopeasti 500–600 °C lämpötilaan, jolloin pääosa puuaineesta muuttuu kaasuiksi, jotka nesteytetään kaasujen lauhduttimessa. Muut tuotteet, lauhtumattomat kaasut ja hiiltojäännös käytetään yleensä prosessin energiaksi. Tyypillinen nestefaasisaanto on noin 70 p-% lopputuotteista.

Ranka (3111) (delimbed stem wood)

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

Raskasmetallit (heavy metals)

yleisnimitys aineille, jotka ovat ihmiselle ja luonnolle myrkyllisiä tai haitallisia. Näistä tärkeimpiä ovat: kadmium (Cd), tallium (Tl), elohopea (Hg), antimoni (Sb), arseeni (As), lyijy (Pb), kromi (Cr), koboltti (Co), kupari (Cu), mangaani (Mn), nikkeli (Ni), sinkki (Zn) ja vanadiini (V).

RDF (3231) (refuse derived fuel)

lajittelemattomasta yhdyskuntajätteestä (MSW, municipal solid waste) mekaanisella käsittelyprosessilla valmistettu polttoaine.

Reaktiivisuus (reactivity)

polttoaineen pyrolysoitumisvaiheen jälkeinen hiilen (char) kaasuuntuminen. Reaktiivisuus kertoo, miten paljon vaaditaan aikaa saavuttaa lopullinen polttoainekonversio eli kuinka helposti polttoaine kaasuuntuu. Reaktiivisuus (%/min) ilmoitetaan hetkellisenä reaktionopeutena tuhkatoman polttoaineen konversiona funktiona. Reaktiivisuuteen vaikuttaa useampi tekijä: mm. itse polttoaine, sen kemiallinen koostumus, lämpötila, paine ja kaasukehä.

REF tai SRF (3231) (recovered fuel)

syntypaikalla lajitellusta ja erilliskerätystä kuivajätteestä mekaanisella käsittelyprosessilla valmistettu polttoaine.

Referenssimateriaali (RM) (reference material)

materiaali tai yhdiste, jonka yksi tai useampi ominaisuuden arvo on riittävän homogeeninen ja todennettu käytettäväksi laitteen kalibrointiin, mittausmenetelmän arviointiin tai sovittuihin arvoihin materiaaleille.

Rummutuslujuus, DU, % (mechanical durability, tumbling durability)

palamaisten kiinteiden polttoaineiden kestävyys mekaanisia rasituksia vastaan. Erityisesti brikettien, koksien ja pellettien osalta rummutuslujuudella eli mekaanisella kestävyydellä on suuri merkitys. Eniten käytetään määritysmenetelmää, jossa polttoainetta rasitetaan pyörivässä rummussa ja muuttunut palakokojakuma ja hienoaineksen määrä määritetään seulonnalla.

Runkopuu (3111) (stem wood)

puun rungon osa, josta on poistettu oksat.

Ruskea hake, kuivunut hake (brown chips, seasoned wood chips)

kuivuneesta ja huuhtoutuneesta hakkuutähteestä (3113) tai kokopuusta tehty polttohake (3112). Hakkeen raaka-ainetta on kuivatettu kasassa vähintään 6 viikkoa huhtikuun ja syyskuun välisenä aikana, jolloin neulasten/lehtien määrä on vähentynyt huomattavasti.

Sahanhake (3123) (sawmill chips)

sahateollisuuden sivutuotteena syntyvä kuorellinen tai kuoreton hake (3123).

Sahanpuru (3122) (sawdust)

puuta sahattaessa syntyvät pienet kappaleet. Suurin osa partikkeleista on kaikilta kolmelta mitaltaan muutamia millimetrejä, lukuunottamatta satunnaisia pidempiä kappaleita sahasta ja puun laadusta riippuen.

Sekajäte (3238) (mixed waste)

lajittelematon yhdyskunta-, teollisuus- tai rakennusjäte.

Sekoitus (blend)

tarkoituksellisesti sekoitettuja biopolttoaineita, joiden seossuhde tiedetään joko energia- tai painoperusteisesti. Jos sekoitussuhde määritetään tilavuusperusteisesti, on se muunnettava energiaperusteiksi.

Sekundäärinen biomassa, toissijainen biomassa (secondary biomass)

tähteet ja sivutuotevirrat elintarvikkeista, rehuista, puu- ja materiaalien käsittelylaitoksista (kuten sahanpuru, mustalipeä ja juuston hera) sekä lannat eläinten ruokintatoiminnoista.

Sekundäärituhka (extraneous ash)

polttaineeseen kuulumaton aines, joka joutuu polttaineeseen korjuun, hakkuun, käsittelyyn, kuljetukseen, varastointiin ym. yhteydessä.

Seos (mixture)

tahattomasti sekoitettuja biopolttoaineita, joiden alkuperä tiedetään, mutta ei tarkkaa seossuhdetta.

Siistausliete (3234) (deinking sludge)

syntyy keräyspaperin siistausprosessissa (deinking), jossa jätepaperista poistetaan painomuste, täyteaineet ja päällysteet, jolloin jäljelle jää uusiokuitu.

Särmäystähteet (3123) (edgings)

puubiomassan osat, jotka syntyvät sahatavaran viimeistelyssä ja joissa on jäänteitä puun alkuperäisestä pyöreästä pinnasta (kuorellinen/kuoreton puu).

Tarkkuusvaatimus (precision)

toimituserän jokaiselle merkitykselliselle ominaisuudelle vaadittava kokonaistarkkuus olisi sovitettava asianomaisten kesken. Sopimuksen puuttuessa voidaan käyttää tämän julkaisun arvoja (esim. kosteudelle $\pm 2-4$ %-yksikköä). Kokonaistarkkuus näytteenotossa on saavutettava 95 % luottamustasolla. Lisäksi viranomaiset voivat asettaa tarkkuusvaatimuksia esimerkiksi ympäristö- ja päästöluvassa.

Tasauspötkät (3123) (slabs)

pieniä puubiomassan pötkiä/päätypaloja, jotka syntyvät, kun lautoja tai lankkuja katkotaan määrämittaan.

Tehollinen lämpöarvo, $q_{net, dry}$ (net calorific value, dry basis)

alempi lämpöarvo, joka on lämpömäärä, joka syntyy poltettaessa yksi massayksikkö polttoainetta, kun palamisen yhteydessä kehittyvä vesi – jonka määrä riippuu vetypitoisuudesta – höyrystyy ja jäähtyy takaisin alkulämpötilaan pysyen höyryn muodossa. Tehollinen lämpöarvo ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti (ks. myös kalorimetrinen lämpöarvo).

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, $q_{net, ar}$ tai Q (net calorific value as received)

toimituskostean tai saapumistilassa olevan polttoaineen lämpöarvo lasketaan kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta kosteuden avulla (ks. myös kalorimetrinen lämpöarvo).

Tekninen analyysi (proximate analysis)

analyysissä määritetään polttoaineen kosteus, tuhkapitoisuus ja haihtuvat aineet. Kiinteän hiilen määrä prosentteina kuiva-aineessa saadaan laskemalla tuhka ja haihtuvat aineet yhteen (p-% kuiva-aineessa) ja vähentämällä saatu summa sadasta.

Tertiäärinen biomassa (tertiary biomass)

loppukuluttajan tähteet ja jätteet kuten ihra, rasvat, öljyt, rakennus- ja purkupuut sekä muut kaupunkiympäristöjen jätepuut, kuten myös pakkausjätteet, yhdyskuntajätteet ja kaatopaikkakaasut.

Tiheys (ρ), kg/m³ (density)

polttoaineen massa tilavuusyksikköä kohti. Kotimaisten polttoaineiden tiheys vaihtelee suuresti. Tiheys riippuu sekä tilavuudessa olevasta kuiva-ainemäärästä että kosteudesta. Ks. myös irtotiheys, kiintotiheys ja näennäistiheys.

Kiintokuutiometri, m ³	Kuorellinen kiintokuutiometri
Irtokuutiometri, i-m ³	Hakekuutiometri tai pilkkeiden heittokuutiometri
Irtotiheys, kg/irto-m ³	Massa ja tilavuus mitataan toimitustilassa
Pinokuutiometri, pino-m ³	Kehysmitoitetaan 1 m ³ pinottu pilkkeiden muodostelma.

Tiiviys (density of chips, solid volume/bulk volume)

puun kiintotilavuuden (m³) suhde irtotilavuuteen (i-m³) tai pilkkeen pinotilavuuteen (pino-m³). Esimerkiksi hakemittauksissa kiintotilavuus (m³) määritetään haketiivisy-suuntoluvun avulla kuorman irtotilavuudesta (irto-m³). Hakkeen kuutiometripaino määräytyy puuaineen tiheyden, hakkeen tiivyyden ja puun kosteuden mukaan.

Toimituserä (delivery lot)

polttoaine-erä, johon puupolttoainelajien keskeiset, säännöllisesti valvottavat laatuvaatimukset kohdistetaan. Toimituserän koko sovitaan tapauskohtaisesti. Toimituserä voi olla yksittäinen toimituserä, jossa on sovittu polttoaineen määrä (esim. rekkakuorma) tai jatkuva toimitus, jossa useat kuormat toimitetaan käyttäjälle sovittun ajanjakson sisällä (yleensä 24 tunnin toimitus tai viikkotoimitus). Jos toimituserä on suurempi kuin 1 500–2 000 irto-m³ vuorokaudessa, on suositeltavaa jakaa toimitukset kahteen tai useampaan osatoimituserään.

Tuhka (ash)

epäorgaaninen aines, joka jää jäljelle poltettaessa polttoainenäyte täydellisesti hapettavassa kaasukehässä. Tuhkapitoisuus (A_d) (%) on tuhkan paino-osuus polttoaineen kuiva-aineen painosta. Tuhkan pääkoostumus ilmoitetaan tyypillisesti oksideiksi laskettuna: SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃ ja P₂O₅. Tuhkan määrä 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 (ash melting behaviour)

tuhkan muodonmuutoksia lämpötilaa nostettaessa. Sulamiskäyttäytymisessä erotetaan neljä päävaihetta: muodonmuutoslämpötila (Deformation Temperature, DT), pehmenemislämpötila/pallolämpötila (Sphere Temperature, ST), puolipallolämpötila (Hemisphere Temperature, HT) ja juoksevuuslämpötila/sulalämpötila (Flow Temperature, FT). Biopolttoaineille voidaan määrittää myös kutistumisen alkamisen lämpötila (Shrinkage Starting Temperature, SST).

Turve (21) (peat)

suokasvien hitaan maatumisen seurauksena syntyntä, epätäydellisesti hajonnutta eloperäistä maalajia, joka on varastoitunut kasvupaikalleen erittäin märissä olosuhteissa. Hapen puutteen ja runsaan veden takia kasvin jäänteet eivät hajoa kunnolla, ja näin syntyy jatkuvasti kasvava turvekerrostuma. Pitkälle maatuneen turpeen hiilipitoisuus ja lämpöarvo tekevät siitä energiakäyttöön soveltuvaa. Osittain maatuneen rahkaturpeen solurakenne sekä matala pH ja ravinnepitoisuus tekevät siitä kasvintuotannon kasvualustaksi soveltuvaa.

Turvelaji (peat species)

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 Eriphorum vaginatum C Carex L Lignum, puuaines B Bryales

Näiden pääturvetekijöiden lisäksi turpeessa on monien muiden kasvien jäännöksiä.

Vaarallinen jäte (hazardous waste)

jäte, jolla on palo- tai räjähdysvaarallinen, tartuntavaarallinen, muu terveydelle tai ympäristölle vaarallinen tai muu vastaava ominaisuus (vaaraominaisuus). Aiemmin käytettiin termiä ongelmajäte.

Vaneritähde (3123) (plywood residues)

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

Varanäyte, rinnakkaisnäyte (reserve sample)

laboratorionäytteen osa, joka säilytetään määritysten tarkistamista varten.

Vihreä hake, viherhake, tuore hake (green chips)

tuoreesta hakkuutähhteestä tai kokopuusta tehty polttohake.

Viskositeetti, mm²/s (kinemaattinen viskositeetti) (viscosity)

lämpötilasta riippuva suure, jolla kuvataan nesteen juoksevuutta. 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.

Wobbe-indeksi (wobbe index)

kaasumaisten polttoaineiden soveltuvuus eri poltinlaitteisiin. Wobbe-indeksi saadaan jakamalla polttoaineen lämpöarvo sen suhteellisen tiheyden neliöjuurella.

Yhdyskuntajäte (3238) (municipal solid waste, MSW)

asumisessa syntyvä jäte sekä ominaisuuksiltaan, koostumukseltaan ja määrältään siihen rinnastettavaa teollisuudessa, kaupassa tai muussa vastaavassa toiminnassa syntyvä jäte.

Yhdyskuntaliete (325) (common sludge)

pääasiassa jäteveden puhdistamoiden lietteitä. Etenkin isommilla puhdistamoilla on primääriselkeytin ennen biologista puhdistusta, jolloin jätevedenpuhdistamolla muodostuu sekä primääri- että biolietettä. Lisäksi muodostuu sako- ja umpikaivolietettä, välppäjätettä ja hiekanerotuskaivojen lietettä.

Yksittäisnäyte (increment)

pienin määrä polttoainetta, joka otetaan kerrallaan kokoomanäytteen muodostamiseksi.

Yliuuret kappaleet, karkea fraktio (over-sized particles, coarse fraction)

tietyn raja-arvon ylittävien kappaleiden osuus.

Muut termit ja luokitukset

Euroopan jäteluettelossa (2000/532/EC) metsästä suoraan toimitettavat puupolttoaineet on luokitettu luokkaan 02 01 07. Vastaavasti metsäteollisuuden puutähteet ja sivutuotteet on luokiteltu luokkaan 03 01, jonka alaluokassa 03 01 01 on kuori ja alaluokassa 03 01 05 sahanpuru, kutterinlastut sekä lastulevy- ja vaneritähde. Paperin ja selluntuotannossa syntyvä kuori ja puutähde luokitellaan luokkaan 03 03 01. Puupakkaukset ovat luokassa 15 01 03 sekä purkupuu ja rakennustoiminnan puutähde kuuluvat luokkaan 17 02 01. Standardissa SFS-EN ISO 16559. Kiinteät biopolttoaineet. Terminologia, määritelmät ja kuvaukset on määritetty lisää biopolttoaineisiin liittyviä termejä.

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 = 11,63 MWh

100 ppm = 100 mg/kg = 100 µg/g = 0,01 %

1 MJ/kg vastaa 0,2778 kWh/kg

1 kWh/kg vastaa 1 MWh/t ja 1 MWh/t on 3,6 MJ/kg

1 g/cm³ vastaa 1 kg/dm³

1. Johdanto

Tässä julkaisussa on käsitelty polttoaineiden ominaisuuksia kirjallisuuden, VTT:n ja yritysten analyysien tulosten perusteella. Polttoaineiden tärkeimmät ominaisuudet ovat

- lämpöarvo
- polttoaineen kemiallinen koostumus (elementaarianalyysi, mm. alkalit ja metallit, epämetallit, raskasmetallit 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
- turpeen
- peltobiomassojen (viljat, öljykasvit ja viljan siemenet, olki, ruokohelpi ja järviruoko)
- kierrätyspolttoaineiden (jätepuu, muovit, kuitumaiset pakkaukset, rengasjäte, teollisuuden jätepolttaineet)
- 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, näytteenottomenetelmiä ja laskentakaavoja. Lopussa on analyysi sekä polttoaineiden ominaisuuksien vaikutuksia palamiseen ja kaasutukseen sekä polttoaineiden ominaisuuksien vertailua. Julkaisussa ei käsitellä liikenteen polttoaineita. Teollisuuden prosessikaasuja on käsitelty hyvin lyhyesti. Kotimaisten polttoaineiden osalta on kuvattu myös polttoaineiden tuotantotekniikkaa ja potentiaalit.

Julkaisu perustuu vuonna 2000 julkaistuun VTT Tiedotteita 2045 -julkaisuun (Alakangas 2000), jonka tietoja on päivitetty ja täydennetty uusilla ominaisuustiedoilla. Vuoden 2012 jälkeen kiinteiden biopolttoaineiden analyysimenetelmät on päivitetty EN-standardeiksi tai ISO-standardeiksi. Tässä julkaisussa käsitellään uusien kansainvälisten standardien mukaisia näytteenotto- ja analyysimenetelmiä.

2. Ominaisuuksien määrittäminen ja laskentakaavat

2.1 Ominaisuuksien määrittämiseen ja laatuokitteluun käytetyt menetelmät

Laadun määrittämisessä käytetään liitteissä A–D lueteltuja menetelmiä. Tässä luvussa on kuvattu ne menetelmät, jotka ovat käytössä myös lämpö- ja voimalaitoksilla. Lisäksi määrittämiseen käytetyt laskentakaavat on esitetty tärkeimpien ominaisuuksien osalta. Ennen vuotta 2005 julkaistuissa tiedoissa on käytetty VTT:n julkaisussa (Alakangas 2000) mainittuja analyysimenetelmiä ja vuodesta 2005 tämän julkaisun menetelmiä.

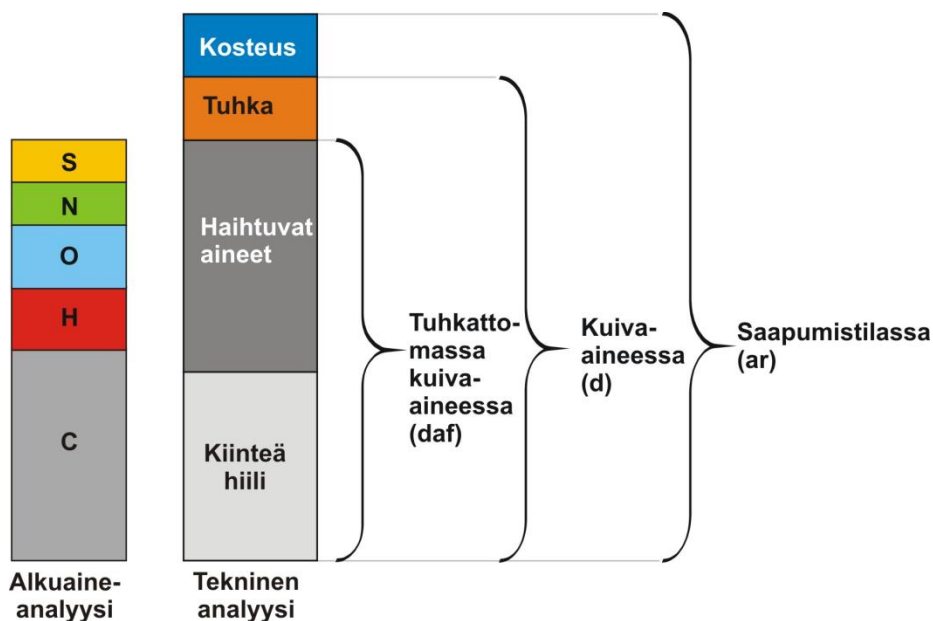
Mineraali- ja bioöljyjen analysointiin käytetyt menetelmät on lueteltu liitteessä D. Bioöljyjen ja nestemäisten polttoaineiden analyysit on kuvattu tarkemmin VTT:n julkaisussa (Oasmaa & Czernik 1999, Oasmaa 2003, Lehto et al. 2013 & 2014).

Julkaistut EN- ja ISO-standardit ovat voimassa viisi vuotta julkaisemisen jälkeen, jonka jälkeen ne tarkistetaan. Tarkista aina standardien voimassaolo internetsivuilta (mm. www.sfs.fi ja www.iso.org).

Tärkeimpiä ominaisuuksia, joita yleensä polttoaineista määritetään, ovat tekninen analyysi, alkuaikoinen kosteus, lämpöarvo ja tuhkan sulamiskäyttäytyminen. Näiden lisäksi tarvitaan usein tietoja myös polttoaineen tiheydestä, palakoosta ja muista käsittelyteknisistä ominaisuuksista. Ympäristö- tai polttoteknisistä syistä selvitetään myös erilaisten metallien tai epämetallien pitoisuuksia joko polttoaineesta tai sen tuhkasta. Hienojakoisista polttoaineista tarvitaan tietoa myös turvallisuuteen liittyvistä ominaisuuksista esim. itsesyttymislämpötilasta ja pölyräjähdysominaisuuksista (Weckman 1986, Wilén et al. 1999, Wilén et al. 2013). Kaikkien näiden lisäksi polttoaineen reaktiivisuus on tärkeä tieto, kun arvioidaan/valitaan kyseiselle polttoaineelle sopivia kaasutusolosuhteita.

Polttoaineiden tekninen analyysi on kosteuden, haihtuvien aineiden, kiinteän hiilen ja tuhkan määrittäminen. Teknistä analyysiä käytetään polttoaineen laatua arvioitaessa ja se antaa lämpöarvomäärittämisen ohella perustan polttoainekaupalle (Ranta & Korhonen 1983).

Polttoaineen kemialliset analyysit ilmoitetaan kuiva-ainelle (k.a., dry, dry basis, kuva 2.1), jonka lisäksi ne voidaan laskea myös kuivalle, tuhkattomalle polttoaineelle (daf, dry ash free). Irtotiheys ja lämpöarvo ilmoitetaan polttoainekauppa varten saapumistilassa (ar, as received). Taulukossa 2.1 on esitetty laskentakaavat, kun halutaan muuttaa tuloksia eri perusteille.



Kuva 2.1. Eri määritysperusteet polttoaineille. Lähde: Alakangas & Selin 2006. Kuva: VTT.

Taulukko 2.1. Analyysimenetelmien muuttaminen eri perusteille (SFS-EN ISO 16993:2015).

Annettu	Haluttu perusta			
	Analysoitu (ilmakuiva, ad)	Saapumistilassa (ar)	Kuiva-aineessa (d)	Tuhkattomassa kuiva-aineessa (daf)
Analysoitu (ilmakuiva, ad)		$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - (M_{ad} + A_{ad})}$
Saapumistilassa (ar)	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$		$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - (M_{ar} + A_{ar})}$
Kuiva-aineessa (d, k.a.)	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$		$\frac{100}{100 - A_d}$
Tuhkattomassa kuiva-aineessa (daf)	$\frac{100 - (M_{ad} + A_{ad})}{100}$	$\frac{100 - (M_{ar} + A_{ar})}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	

M on kosteus ja A on tuhkapitoisuus

2.2 Kosteuden määrittäminen kiinteille biopolttoaineille

2.2.1 Kosteuden määrittäminen uunikuivausmenetelmällä

Kiinteillä biopolttoaineilla kosteuden määrittämisessä käytetään uunikuivausmenetelmää SFS-EN ISO 18134-2:2015, joka on yksinkertaistettu menetelmä. Lisäksi voidaan käyttää myös muita kosteuden mittaamismenetelmiä (esim. pikakosteusmittareita), jos niiden vastaavuus standardimenetelmiin verrattuna voidaan osoittaa.

Biopolttoaineiden näytteenotto tehdään näytteenottostandardin (SFS-EN ISO 18135) mukaisesti. Näytteen pienentämisen peruseriaatteena on, että näytteen koostumus ei saa muuttua alkuperäisestä näyt-

teen käsittelyvaiheiden aikana. Näytteen pienentäminen tehdään näytteenkäsittelystandardin mukaan. Näyte sekoitetaan ennen käsittelyä ja punnitaan vaa'alla, jonka tarkkuus on vähintään 0,1 g. Myös tyhjä kuivausastia (m_1) punnitaan. Kuvassa 2.2 on lämpökaappi, jossa on polttoaineita kuivumassa.



Kuva 2.2. Polttoaineen kosteuden määrittäminen. Kuva: Labtium Oy.

Biopolttoaineiden kosteusmäärittämissä SFS-EN ISO 18134-2:2015 kosteusnäytteen on oltava vähintään 300 g. Hienojakoisilla polttoaineilla (esim. puru) voidaan käyttää 200 g näytettä tai jos punnitus-tarkkuus on vähintään 0,01 g, voidaan käyttää 100 g näytettä. Näytettä ei saa olla liian paksua kerrosta (1 g materiaali cm^2 kohti). Näytteen palakoon on oltava kosteusmäärittämissä korkeintaan 31,5 mm (nimellinen suurin palakoko). Näyte merkitään yksilöivästi.

Seuraavat seikat on otettava erityisesti huomioon:

- *Esikäsittelyvaiheet* (palakoon pienennys ja sekoitus) sekä punnitukset ennen näytteiden kuivausta on tehtävä huolellisesti, mutta nopeasti, ettei kosteushäviötä (kuivumista) pääse tapahtumaan.
- *Palakoon pienentäminen* (murskaus) on tehtävä sellaisilla laitteilla, että vältetään kosteuden haihtuminen laitteen lämpiämisen tai voimakkaan ilmavirran vaikutuksesta (ensisijaisesti hitaasti pyörivät, murskaavat myllyt tai murskaimet).

- Jos näytepussin seinämiin on tiivistynyt kosteutta, se on hierottava näytteeseen ennen pussin avaamista. Ellei tiivistynyttä kosteutta voida hieroa näytteeseen mukaan, on tyhjennetty näytepussi kuivatava ja otettava siinä ollut kosteus huomioon näytteen kosteutta laskettaessa.

Näyte kuivatetaan lämpökaapissa, jonka lämpötila on $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Lämpökaapin tuuletusventtiiliin (poistovenktiili) on oltava auki ja kostean ilman on voitava poistua sen kautta esteettä. Lämpötilaa tarkkaillaan säännöllisesti. Laitettaessa kosteita näytteitä kuivumaan lämpökaappiin on kaapissa mahdollisesti ennestään olevat kuivat näytteet poistettava.

Näyte sijoitetaan lämpökaappiin välittömästi punnituksen jälkeen (m_2). Tässä on oltava tarkkana, jotta ei menetä näytemateriaalia! Näytteitä ei saa laittaa liian tiiviisti, ei seinämiin kiinni eikä lämpökaapin pohjalle. Kun näytteet otetaan lämpökaapista, käytetään patakinnasta palovammojen ehkäisemiseksi. Näytettä kuivatetaan, kunnes on saavutettu paino, joka ei muutu. Vakiopaino on saavutettu, kun massa ei muutu 60 minuutin sisällä enempää kuin 0,2 p-%. Näytettä ei saa kuivattaa yli 24 tuntia. Useimmiten 16 h kuivausaika on riittävä, kun näytteen palakoko on enintään 31,5 mm eikä näytettä ole liian paksu kerros. Varmistetaan, että kuivatuslämpötila on oikea ja kuivausaika on riittävä vakiopainon saavuttamiseksi kullakin polttoainetyypillä.

Näyte punnitaan välittömästi lämpökaapista ottamisen jälkeen (m_3). Punnitusvaihe kuivauksen jälkeen on tehtävä nopeasti (10–15 s), jotta vältetään laboratorioilman kosteuden imeytyminen näytteisiin. Lämpökaappi sammutetaan sen jälkeen.

Kosteus (M_{ar}) lasketaan märkäpainosta kaavalla 2.1:

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (2.1)$$

jossa

M_{ar}	kosteus saapumistilassa, p-%
m_1	tyhjän kuivausastian paino, g
m_2	kuivausastian ja näytteen yhteispaino ennen kuivausta, g
m_3	kuivausastian ja näytteen yhteispaino kuivauksen jälkeen, g

Tulos ilmoitetaan 0,1 %-yksikön tarkkuudella.

Esimerkki 2.1:

$$M_{ar} = \frac{582,47 - 456,96}{582,47 - 281,13} \times 100 = 41,7 \%$$

Saha- ja puunjalostusteollisuus tarvitsee myös kosteussuhdetta (kosteus/kuivapaino). Kosteussuhde (U_d) lasketaan kaavalla 2.2. Vastaavasti, jos U_d tiedetään, voidaan kosteus märkäpainosta laskea kaavalla 2.3.

$$U_d = \frac{M_{ar}}{100 - M_{ar}} \times 100 \quad (2.2)$$

$$M_{ar} = \frac{U_d}{100 + U_d} \times 100 \quad (2.3)$$

Kalvoa muodostavat nestemäiset biopolttoaineet kuten mustalipeä, kuiva-aine voidaan määrittää sekoittamalla näyte sopivaan määrään inerttiä pienirakeista ainetta esim. hiekkaa.

2.2.2 Polttopuun kosteuden määrittäminen pilkeyksien avulla

Polttopuun kosteus voidaan määrittää pilkeyksien avulla. Kosteusnäytettä kerätään yhden päivän pilkeyksien sahauspurusta niin, että näyte on samaa puulajia ja samasta raaka-aineen toimituserästä. Näytteeksi kerätään 30 minuutin välein pilkeyksien sahauspurusta. Purut kerätään kannelliseen muoviastiaan, josta kosteus ei pääse haihtumaan. Näytteiden oton välissä keräysastia suljetaan ja pidetään auringolta suojassa (Erkkilä et al. 2012).

Yhden päivän aikana tasalaatuisesta raaka-aineesta kerätyistä pilkeyksien sahauspurusta sekoitetaan kokoomanäyte, josta määritetään kosteus. Samasta kokoomanäytteestä otetaan kolme rinnakkaisnäytettä ja kosteus analysoidaan. Kosteus määritetään kosteusanalysointilaitteella pilkeyksien sahauspurusta (kuva 2.3). Kolmen rinnakkaisnäytteen kosteustuloksesta lasketaan keskiarvo.



Kuva 2.3. Kosteuden määrittäminen pilkeyksien sahauspurusta.

Puru kerätään kannelliseen muoviastiaan, säilytetään suljettuna ja auringolta suojattuna. Kosteus analysoidaan kosteusmittausvaakalla. Kunkin käsittely-yksikön massa punnitaan tyhjänä ja pilkeyksiä täynnä. Punnitusmenetelmä valitaan käsittely-yksikön mukaan. Punnitukseen on käytettävissä erilaisia vaakoja mm. palkki-, koukku- ja pumppukärryvaaka. Punnituksen yhteydessä käsittely-yksikkö numeroidaan, jotta se on myöhemmin tunnistettavissa. Punnitus- ja kosteustulokset merkitään seurantaan. Kun alkukosteus ja märkäpaino tiedetään, voidaan myös käsittely-yksikön toimituskosteus ja energiasisältö laskea. Toimitettavat käsittely-yksiköt punnitaan toimituksen yhteydessä. Punnitukseen voidaan käyttää samoja vaakoja kuin alkupunnituksessakin tai kuljetuskaluston vaakaa.

Esimerkki 2.2:

Kostean polttopuuerän bruttopaino (sisältää häkin) on 439 kg. Häkin paino on 20 kg, joten puiden paino on 419 kg ja tilavuus 1 irto-m³. Katkaisupurujen kosteus oli kolmen näytteen keskiarvona 44,5 p-%. Toimitusvaiheessa yksikön bruttomassa on 310 kg ja puiden massa 290 kg. Kuiva-aineen lämpöarvona käytetään keskimääräistä arvoa 19,00 MJ/kg (5,28 kWh/kg).

Pilkeyksien kuiva-aineen massa on

$$419 \text{ kg} \times \left(\frac{100 - 44,5}{100} \right) = 232,5 \text{ kg}$$

Toimituserän loppukosteus (p-%) on

$$\frac{290 - 232,5}{290} \times 100 = 19,8 \%$$

2.3 Lämpöarvojen, energiatihedysten ja energiamäärän laskenta

2.3.1 Yleistä

Kiinteiden biopolttoaineiden, kierrätyspolttoaineiden, turpeen ja kivihiilen sekä polttoöljyjen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo määritetään noudattaen liitteiden A–D standardeja. Pakkauksille lämpöarvo voidaan määrittää standardin SFS-EN 13431:2005 mukaan (Alakangas & Impola 2014, www.sfs.fi, Lehto et al. 2013).

Kalorimetrinen eli ns. ylempi lämpöarvo on se lämpöenergian määrä poltettavan aineen massayksikköä kohti, joka vapautuu, kun aine palaa täydellisesti ja palamistuotteet jäähtyvät 25 °C:en lämpötilaan. Kalorimetrisessä lämpöarvossa sekä aineen sisältämän vedyn palamistuotteena syntyvä vesi että aineen sisältämä vesi (eli kosteus) oletetaan palamisen jälkeen nesteeksi. Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan yleensä kuitenkin *tehollisena lämpöarvona* (ns. alempi lämpöarvo), joka saadaan muunnoskaavan 2.4 avulla kalorimetrisestä lämpöarvosta. Tehollisessa lämpöarvossa on otettu huomioon palamisen yhteydessä höyrystyvän veden höyrystymisenergia.

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).

2.3.2 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 ilmakeivän näytteen lämpöarvo muunnetaan vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Tuloksena ilmoitetaan kahden rinnakkaismäärittäksen keskiarvona saatu kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo absoluuttisen kuivalle näytteelle. Rinnakkaismäärittäysten välinen ero saa olla korkeintaan 0,120 MJ/kg sahanpurulle ja 0,140 MJ/kg muille biopolttoaineille. Lämpöarvomäärittäysten ilmoitustarkkuus on 0,01 MJ/kg.

2.3.3 Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo

Kun kalorimetrinen lämpöarvo on määritetty, voidaan tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa laskea kaavan 2.4 mukaan:

$$q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d] \quad (2.4)$$

jossa

$q_{p,net,d}$	kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakio paineessa, J/g tai kJ/kg
$q_{V,gr,d}$	kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo vakio tilavuudessa, J/g tai kJ/kg
$w(H)_d$	vetyttöisyys kuivassa biopolttoaineessa (sisältäen vedyn mineraaliaineksen hydraatioveden sekä polttoaineen sisältämän vedyn), p-%
$w(O)_d$	happipitoisuus kuivassa polttoaineessa, p-%
$w(N)_d$	typpipitoisuus kuivassa polttoaineessa, p-%

Huomaa $[w(O)_d + w(N)_d]$ voidaan laskea vähentämällä 100 p-%:sta polttoaineen tuhka-, hiili-, vety- ja rikkipitoisuus kuiva-aineessa (p-%).

Kun polttoaineen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineelle lasketaan kaavan 2.4 mukaan, tulos ilmoitetaan J/g tai kJ/kg. Jos tulos halutaan ilmoittaa yksikössä MJ/kg, on tulos jaettava tuhannella.

Jos polttoaineesta ei määritetä vety-, typpi-, hiili- tai rikki- tai rikkipitoisuutta, voidaan laskennassa käyttää vakioarvoja. Tyypilliset vakioarvot vedylle $w(H)_d$ ovat turpeella 5,6 %, kokopuulla 6,2 %, hakkuutähteillä 6,0 %, kuorella 5,9 % ja kasvibiomassalla 6,0 %. Tyypillinen vakioarvo summalle $w(O)_d + w(N)_d$ on turpeelle 35 % kokopuulle 41 %, hakkuutähteille 41 %, kuorelle 41 % ja kasvibiomassalle 41 %. Standardin SFS-EN ISO 18125:2016 vakioarvot ilmoitetaan liitteessä H tuhkatomille biopolttoaineille. Vakioarvot vedylle $w(H)_d$ ovat 6,1–6,3 %, puupohjaisille polttoaineille, 6,2–6,3 % kasvibiomassoille ja 6,6 % jyville ja siemenille. Summan $w(O)_d + w(N)_d$ arvot ovat 40,4–44,5 % puupohjaisille polttoaineille, 43,5–45,0 % kasvibiomassoille ja 46,0 % jyville ja siemenille.

2.3.4 Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa

a) Laskenta kuivasta polttoaineesta

Tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) saapumistilassa (kosteaa polttoainetta) voidaan laskea kuiva-aineen tehollisen lämpöarvon perusteella seuraavan yhtälön mukaisesti (2.5).

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} \times \left(\frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,02443 \times M_{ar} \quad (2.5)$$

jossa

$q_{p,net,ar}$	tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) saapumistilassa, MJ/kg
$q_{p,net,d}$	tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) kuiva-aineessa, MJ/kg
M_{ar}	kosteus saapumistilassa, p-%
0,02443 on	höyrystymisen entalpian korjauskerroin (vakiopaineessa) vedelle (kosteus) 25 °C lämpötilassa, MJ/kg per 1 p-% kosteutta.

Kiinteiden biopolttoaineiden laatuluokittelustandardeissa (SFS-EN ISO 17225-sarja) käytetään symbolia Q teholliselle lämpöarvolle saapumistilassa. Jos lämpöarvo muutetaan muotoon kWh/kg, muunnos tehdään vasta laskennan jälkeen.

Esimerkki 2.3:

Puupolttoaineiden tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 19,00 MJ/kg. Polttoaineen kosteus on 19,8 p-%.

Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (Q)

$$Q = 19,00 \times \left(\frac{100 - 19,8}{100} \right) \frac{MJ}{kg} - 0,02443 \times 19,8 \frac{MJ}{kg} = 14,75 \frac{MJ}{kg}$$

Jos tehollinen lämpöarvo saapumistilassa halutaan muuttaa yksikköön kWh/kg, se lasketaan jakamalla tulos 14,75 MJ/kg 3,6:lla, jolloin saadaan 4,10 kWh/kg. Esimerkin 2.2 toimituserän energiamäärä on 290 kg x 4,10 kWh/kg eli 1 189 kWh. Toimituserä oli yksi irto-m³ eli energiana 1,2 MWh/irto-m³.

Puupolttoaineen lämpöarvo tilavuusyksikköä kohti voidaan laskea myös kuiva-tuoretiheyden avulla kaavalla 2.6.

$$q_{ar,v} = \frac{\rho}{1 - \frac{M_{ar}}{100}} \times q_{net,ar} \quad (2.6)$$

jossa

$q_{ar,v}$	kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo, MJ/m ³
ρ	kuiva-aineen kuiva-tuoretiheys, kg/m ³
M_{ar}	polttoaineen kosteus, p-%
$q_{net,ar}$	polttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg (kaava 2.5)

b) Laskenta kuivasta tuhkatommasta polttoaineesta

Tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) saapumistilassa (kosteaa biopolttoainetta) lasketaan kuivan ja tuhkatoman polttoaineen tehollisen lämpöarvon perusteella seuraavan yhtälön mukaisesti (2.7).

$$q_{p,net,ar} = [q_{p,net,daf} \times \left(\frac{100 - A_d}{100}\right) \times \left(\frac{100 - M_{ar}}{100}\right)] - 0,02443 \times M_{ar} \quad (2.7)$$

jossa

$q_{p,net,ar}$	tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa) saapumistilassa, MJ/kg
$q_{p,net,daf}$	tehollinen lämpöarvo (vakiopaineessa kuivassa, tuhkatommassa polttoaineessa), MJ/kg
M_{ar}	kosteus saapumistilassa, p-%
A_d	tuhkapitoisuus kuiva-aineessa, p-%

0,02443 höyrystymisen entalpian korjauskertoimen (vakiopaineessa) vedelle (kosteus) 25 °C lämpötilassa, MJ/kg per 1 p-% kosteutta.

Lämpöarvo voidaan määrittää tietyille erälle tai voidaan käyttää tyypillistä arvoa:

- 1) Jos polttoaineen tuhkapitoisuus on alhainen ja melko muuttumaton (esim. sahanpuru), laskenta voidaan tehdä käyttämällä kuivan polttoaineen yhtälöä ja tyypillistä arvoa teholliselle lämpöarvolle kuiva-aineessa $q_{p,net,d}$.
- 2) Jos polttoaineen tuhkapitoisuus vaihtelee melkoisesti (tai on korkea) tietyille polttoaineelle (esim. kanto), käytetään mieluummin kuivan tuhkatoman polttoaineen yhtälöä ja tyypillistä arvoa teholliselle lämpöarvolle kuivalle ja tuhkatommalle polttoaineelle $q_{p,net,daf}$.

Tulos annetaan pyöristettynä lähimpään 0,01 MJ/kg.

2.3.5 Energiatiheys saapumistilassa

Kiinteän biopolttoaineen toimituserän energiatiheys saapumistilassa (E_{ar}) lasketaan saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon ja irtotiheyden perusteella kaavalla 2.8.

$$E_{ar} = \frac{1}{3600} \times q_{p,net,ar} \times BD_{ar} \quad (2.8)$$

jossa

E_{ar}	biopolttoaineen energiatiheys saapumistilassa, MWh/irto-m ³
$q_{p,net,ar}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg
BD_{ar}	irtotiheys eli puupolttoaineen tilavuuspaino saapumistilassa, kg/irto-m ³
$\frac{1}{3600}$	muuntokerroin energiayksiköille MJ:sta MWh:iin

2.3.6 Toimitettu energiamäärä

Toimitettu energiamäärä W (MWh) lasketaan kaavan 2.9 mukaisesti:

$$W = \frac{Q}{3,6} \times m \quad (2.9)$$

jossa

$\frac{Q}{3,6}$	saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon (MJ/kg) muunto yksiköihin MWh/t
m	toimitetun polttoaineen massa, tonnia

Pienten erien ja satunnaisen käytön kohdalla edellä esitetty menettely voi olla liian raskas, koska mm. ajoneuvoaakoja ei aina ole käytössä pienemmillä laitoksilla. Näissä tapauksissa polttoainetoimituserän energiamäärä voidaan määrittää seuraavasti:

- mitataan toimitettavan polttoaine-erän tilavuus puutavaran mittauslain (Laki puutavaran mittauksesta 141/2013) mukaan
- määritetään polttoaineen irtotiheys (BD)
- määritetään näytteenottoon perustuen polttoaineen kosteus (M) ja tehollinen lämpöarvo (Q) tai määritetään kosteus, mutta käytetään yhdessä sovittua, tyyppillistä puupolttoainelajikohtaista kuiva-aineen tehollista lämpöarvoa.

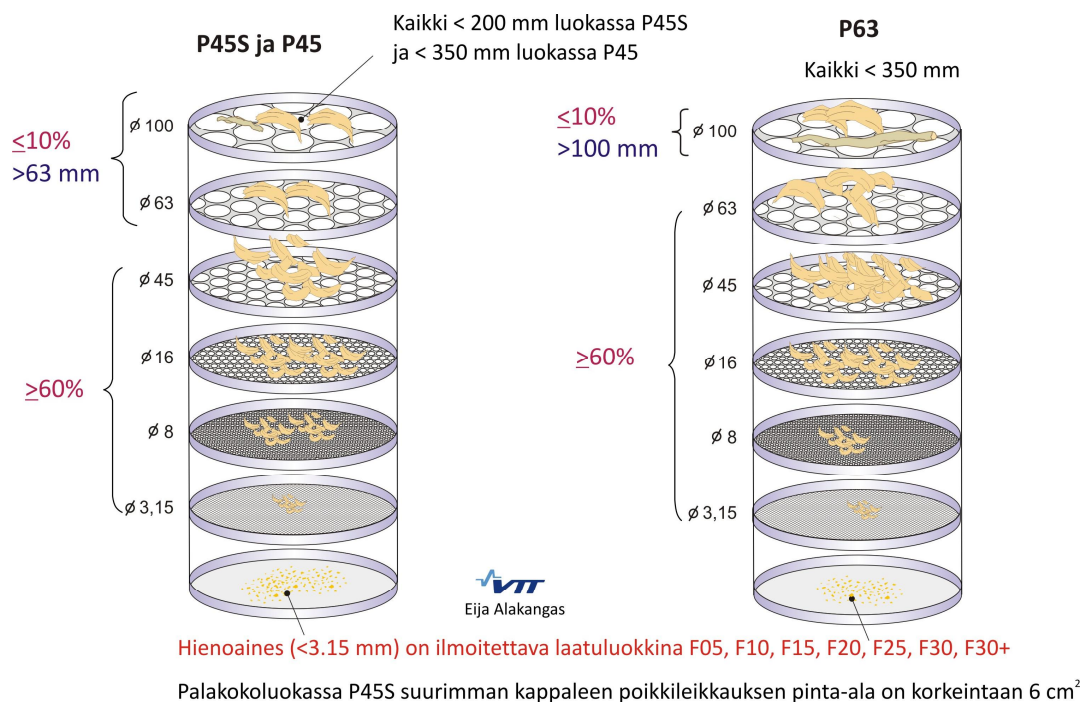
Toimitetun polttoaine-erän energiamäärä on mahdollista määrittää pienillä laitoksilla tuotetun energian ja kattilan hyötysuhteen avulla (SFS-EN 12952-15:2003 Water-tube boilers and auxiliary installations. Part 15: Acceptance tests).

2.4 Palakoon määrittäminen

Näytteenotto seula-analyysiä varten tehdään kiinteiden biopolttoaineiden näytteenottostandardin mukaisesti. Vaadittava näytemäärä on vähintään 8 litraa. Seulonta tapahtuu seulalla, missä on pyöreillä rei'illä varustelut seulakoot. Käytettävät seulat ovat 3,15 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 45 mm ja 63 mm standardin ISO 3310-2:2013 mukaan. Palakokojakauma määritetään standardilla SFS-EN ISO 17827-1:2015.

Näyte seulotaan vaakasuorasti täryttävien seulojen läpi, joilla palat lajitellaan aleneviin kokoluokkiin mekaanisesti (kuva 2.4) eli suurin reikä on ylinnä ja pienin alinna. Näyte seulotaan alle 20 % kosteudessa ja seulonta-aika on 15 minuuttia. Seulontasuuntaa vaihdetaan välillä. Tarvittaessa näyte kuivataan näytteenottostandardin ohjeiden mukaan. Kullekin seulalle ja pohja-astiaan jäänyt aines punnitaan 0,1 g tarkkuudella. Kaikki yli 100 mm palat poimitaan käsin. Palakokoanalyysi kannattaa teettää siihen erikoistuneessa laboratorioissa.

Laatuluokittelustandardin SFS-EN ISO 17225-1 ja SFS-EN ISO 17225-4 palakokoluokkien nimet viittaavat pääfraktioon (60 % seuloilla olevasta painosta). Esimerkiksi P31:ssä 60 p-% pääfraktioon lasketaan seuloille 3,15 mm, 8 mm, 16 mm ja 31,5 mm jäävän aineksen yhteenlaskettu paino. Yli 45 mm suuria kappaleita saa olla korkeintaan 10 p-%, jolloin hienoaineuksen määrä on korkeintaan 30 p-% (F30). Jos hienoaineuksen määrä on pienempi, silloin pääfraktio on yli 60 p-%, kuten kuvan 2.4 esimerkissä käy ilmi. Hakkeen palakokoluokat on kuvattu "Puupolttoaineiden laatuohjeessa" (Alakangas & Impola 2014).



Kuva 2.4. Palakoon määrittäminen ja laatuvaatimukset luokille P45S, P45 ja P63.

Lähde: Alakangas & Impola 2014. Kuva: VTT.

Kuvassa 2.4 palakokoluokan perässä oleva S viittaa englanninkieliseen termiin "small" ja tämä palakokoluokka on tarkoitettu pienille laitoksille. S-luokan hakkeelle määritetään myös poikkileikkauksen pinta-ala Puupolttoaineiden laatuohjeen (Alakangas & Impola 2014) mukaisesti.

Palakoonmäärittämissä standardin (SFS-EN ISO 17827-1) opastavassa liitteessä on kuvattu palakokoja-kauman mediaaniarvon määrittäminen (d50). Tämä on arvo, joka erottaa jakauman kahteen yhtä suureen osaan ja on graafisesti kumulatiivisen kokojakaumakäyrän leikkauspiste 50 %-vaakaviivalla.

Esimerkki 2.4:

ISO 3310-2:2013 -standardin mukaisilta seuloilta on mitattu seuraavat rankahakkeen massat:

Fraktio	Seulan koko, mm	Määrä, p-%	Mitattu fraktio (standardin SFS-EN ISO 17225-1:2014 vaatimus)	Luokka ¹	Kumulatiivinen kertymä
Hienoaines	< 3,15	1,8	1,8 % (F05)	F05	3,7
Pääfraktio	3,15–8	7,7	89,5 % (≥ 60 %)	P31	9,5
	8–16	5,0			14,5
	16–31,5	78,7			93,2
	31,5–45	4,2	kuuluu pääfraktioon	P31	97,4
Karkea fraktio	45–63	2,1	3,6 % (≤ 6 % yli 45 mm) kaikki alle 150 mm	P31	99,5
	63–100	0,5			100
	< 100	0		P31	100

¹ Valitaan pienin palakokoluokka, joka täyttää laatuvaatimukset. Kun 60 % yhteenlaskettu massa täyttyy seuloilla 3,15–31,5 mm, niin seulan 31,5–45 mm aines kuuluu pääfraktioon, koska karkeaan fraktioon lasketaan vain yli 45 mm aines (2,1 % + 0,5 % = 3,6 %). Esimerkki 2.4 täyttää P31 ja F05 palakokovaatimukset sekä P31S-vaatimuksen.

2.5 Irtotiheyden määrittäminen

Irtotiheys saapumistilassa (BD_{ar}) saadaan jakamalla kuorman punnittu massa sen tilavuudella (kaava 2.10). Punnitus ja tilavuuden mittaaminen tehdään toimittajan ja käyttäjän toimitussopimuksessa sopimalla tavalla.

Polttoaineen irtotiheys voidaan määrittää hakkeelle ja murskeelle myös 50 litran astialla sekä pelleteille 5 litran astialla irtotiheyden määrittämissä standardin SFS-EN 15103:2012/SFS-EN ISO 17828 mukaan. Irtotiheyden määrittäminen hakkeelle on kuvattu tässä ja kuvassa 2.5 tarkemmin.

Hakkeelle ja murskeelle säiliön korkeuden ja halkaisijan välisen suhteen oltava 1,25–1,50 välillä. Puuhakkeelle ja -murskeelle käytetään ns. suurta astiaa, jonka tilavuus on 50 litraa (0,05 m³). Näyte punnitaan vaa'alla, jonka tarkkuus on vähintään 10 g. Myös tyhjä säiliö punnitaan. Näytteenotto ja näytteenkäsittely tehdään vastaavien standardien mukaisesti. Näytteen kosteuspitoisuus saapumistilassa määritetään standardin SFS-EN ISO 18134-2:2016 mukaisesti välittömästi irtotiheyden määrittämisen jälkeen. Voit näin yhdistää irtotiheys- ja kosteusmäärittämisen.

Irtotiheys (BD) lasketaan seuraavilla kaavoilla (2.10):

$$BD_{ar} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2.10)$$

$$BD_d = BD_{ar} \times \frac{100 - M_{ar}}{100}$$

jossa

BD_{ar}	irtotiheys saapumistilassa, kg/m ³
BD_d	kuiva-aineen irtotiheys, kg/m ³
m_1	tyhjän säiliön paino, kg
m_2	täytetyn säiliön paino, kg
V	mittaussäiliön nettotilavuus, m ³
M_{ar}	kosteus saapumistilassa (märkäpainosta), p-%

Yksittäisten määritysten tulos ilmoitetaan $0,1 \text{ kg/m}^3$ tarkkuudella ja kahden yksittäisen tuloksen keskiarvon laskennassa tulos pyöristetään lähimpään 10 kg/m^3 .



Näyte sekoitetaan (näytemäärä vajaa 70 litraa). Astia täyteen kaatamalla 20–30 cm korkeudesta säiliön yläreunan yläpuolelta, kunnes on muodostunut korkein mahdollinen keko.

Täytetty säiliö täräytetään 3 kertaa pudottamalla se vapaasti 15 cm korkeudesta puulevyille. Varmistetaan, että säiliö osuu puulevyyn pystysuoraan. Säiliöön syntynyt tyhjä tila täytetään uudelleen.



Liika aines poistetaan soiron avulla, joka kulkee astian yli heiluvilla liikkeillä. Jos näyte sisältää karkeaa ainesta, kaikki kappaleet, jotka estävät soiron vapaan liikkeen, on poistettava käsin. Jos isojen kappaleiden poistaminen aiheuttaa tasoitettuun pintaan isohkoja kuoppia, ne täytetään ja poistomenettely toistetaan.

Täytetty säiliö punnitaan. Käytetty näyte yhdistetään käyttämättömään näyteainekseen ja menettely toistetaan ainakin kerran.

Kuva 2.5. Irtotiheyden määrittäminen hakkeelle. Kuvat: Eija Alakangas, VTT.

Esimerkki 2.5:

Lasketaan hakkeen irtotiheys, kun 50 litran säiliön paino on tyhjänä 3,160 kg ja täytetyn säiliön paino on 18,845 kg. Aiemmin on mitattu hakkeen kosteus 41,7 p-% (ks. esimerkki 2.1)

$$BD_{ar} = \frac{18,845 - 3,160}{0,05} = 313,7 \text{ kg/m}^3$$

$$BD_d = 313,7 \times \frac{100 - 41,7}{100} = 182,9 \text{ kg/m}^3$$

2.6 Pellettien ja brikettien mekaanisen kestävyuden määrittäminen

Mekaanisella kestävyydellä tarkoitetaan pellettien ja brikettien isku- ja/tai hankautumiskestävyyttä käsittely- ja kuljetusprosessien aikana. Mekaanisen kestävyuden määrittäminen ja tarvittava laitteisto kuvataan pelleteille standardissa SFS-EN ISO 17831-1:2016 ja briketeille standardissa SFS-EN ISO 17831-2:2016.

Testattava pellettinäyte altistetaan iskuille hallitusti siten, että testauslaitteen pyöriessä pelletit törmäilevät sekä toisiinsa että laitteen seinämiin. Kestävyys lasketaan näytemassalle, joka jää jäljelle jauhautuneiden ja pieniksi hajooneiden partikkelien poiston (ns. hienoaineksen) jälkeen. Pellettien testauslaitteen on oltava pölytiivis kotelo. Kotelo valmistetaan jäykästä materiaalista (esim. ruostumattomasta teräslevystä), jonka pinnat ovat sileitä ja tasaisia. Kotelon mitat ovat 300x300x125 mm, ja 230 mm pituinen metallilevy kiinnitetään symmetrisesti lävistäjän suuntaisesti yhdelle laatikon 300x300 mm sivulle. Kuvassa 2.6 on kahdella laatikolla varustettu testauslaite.

Murskautunut hienoaines määritetään 3,15 mm ISO 3310-2:2013 -standardin mukaisella seulalla. Suositeltava seulan halkaisija on korkeintaan 400 mm, ja seulaan laitetaan näytettä 0,8 g/cm². Ennen määrittämistä hienoaines seulotaan käsin (5–10 pyörivää liikettä). Näytettä tarvitaan 1 kg, joka jaetaan kahteen osanäytteeseen (500 ± 10) g. Näyte punnitaan 0,1 g tarkkuudella. Näytettä punnitaan nopeudella (50 ± 2) kierrosta minuutissa yhteensä 500 kierrosta. Näyte poistetaan ja seulotaan käsin kuten ennen koetta. Seulalle jäävä näyte punnitaan. Seulalle jääneiden kokonaisten pellettien (3,15 mm seulalle jääneet partikkelit) osuus lasketaan painoprosenteina. Pellettien mekaaninen kestävyys määritetään kaavalla 2.11.

$$DU = \frac{m_a}{m_e} \times 100 \tag{2.11}$$

jossa

DU	pellettien mekaaninen kestävyys, p-%
m _e	esiseulottujen pellettien massa ennen testauslaitekäsittelyä, g
m _a	seulottujen pellettien massa testauslaitekäsittelyn jälkeen, g



Kuva 2.6. Pellettien mekaanisen kestävyuden määrittäminen. Laitteessa on kaksi rumpua.
Kuva: Labtium Oy.

Koe pitää toistaa tai käyttää tai käyttää laitetta, jossa voidaan analysoida molemmat osaerät yhtä aikaa (kuva 2.6). Tulos lasketaan kahden desimaalin tarkkuudella ja kahden näytteen keskitulos pyöristetään lähimpään 0,1 prosenttiin raportointia varten.

Briketeille käytettävä testauslaitteisto on pyörivä sylinterinmuotoinen teräsrumpu, jonka nimellistilavuus on 160 litraa. Seulonnassa käytetään ISO 3310-1:2000 -standardin mukaista metallilankaverkkoseulaa, jonka reikäkoko valitaan siten, että se on noin 2/3 brikettien läpimitasta tai lävistäjästä, mutta ei kuitenkaan yli 45 mm. Tarvittava näytemäärä on yhteensä 25 kg, mikä jaetaan neljään vähintään 5 kg osanäytteeseen. Kaksi osanäytettä (kooltaan vähintään 2 kg ± 0,1 kg) käytetään kosteuden määrittämiseen ja kaksi osanäytettä rummutuskokeeseen. Näytteessä ei saa olla rikkoutuneita partikkeleita. Näytettä pyöritetään nopeudella (21 ± 0,1) rpm 5 minuutin ajan tai (105 ± 0,5) kierrosta. Rummutuksen jälkeen näyte seulotaan ja seulalle jäävä näyte punnitaan. Mekaaninen kestävyys lasketaan kaavalla 2.11 kuten pelleteillä.

2.7 Kivihien jauhautuvuus ja leipoutuvuusindeksi

Hardgrove-testin (ISO 5074:2015) avulla tutkitaan hiilen kovuutta ja jauhautuvuutta erityisellä Hardgrove-laitteella käyttäen vertailuna standardihiiltä. Hardgrove-laitteessa on teräspallot, joiden halkaisija on 25,4 mm. Teräspallot pyörivät murskaimessa 20 ± 1 kierrosta minuutissa. Hiili ilmakuivataan 30–70 % ilmankosteudessa ennen testausta. Näytteen koko on (50 ± 0,01) g. Tulokset lasketaan punnitsemalla 70 µm seulalle jäänyt massa, joka vähennetään luvusta 50. Tulokset ilmoitetaan ns. Hardgrove-indeksinä.

Paisumisluvun (FSI-indeksi, free swelling index, crucible swelling index, leipoutuvuusindeksi) kuvaava kivihiilen paisumis- ja koksautumiskäyttäytymistä nopeassa kuumennuksessa hapettomassa tilassa. Osa kivihiilestä käyttäytyy termoplastisesti eli ne muodostavat kuumennettaessa lähes nestemäisen olomuodon, mutta koksautuessaan muuttuvat kuitenkin jälleen kiinteiksi. Termoplastisessa vaiheessa ne voivat paisua moninkertaiseksi alkuperäiseen tilavuuteensa verrattuna ja koksautuessaan ne myös säilyttävät tämän tilan. Määrittäminen tehdään ISO 501:2012 -standardin mukaan siten, että näyte kuumennetaan nopeasti korkeaan lämpötilaan (820 °C) suljetussa upokkaassa, jolloin koksautuva hiili sulaa ja paisuu. Paisumisluvun arvo (0–9) määritetään vertaamalla syntyneen koksautumisen profiilia standardiprofiileihin, jotka on esitetty ISO 501:2012 -menetelmän kuvauksessa.

2.8 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen

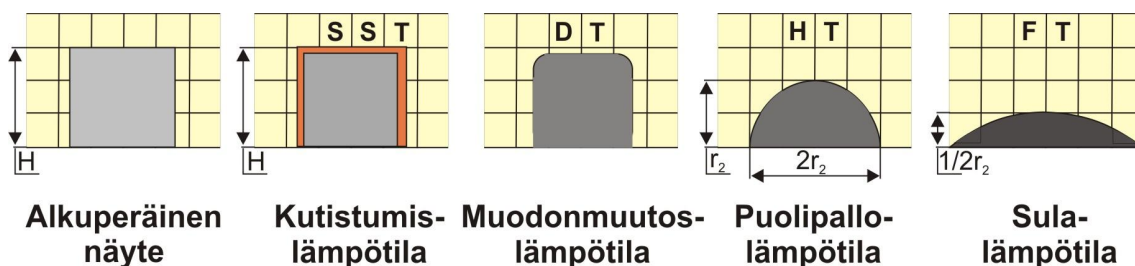
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen riippuu tuhkan koostumuksesta, joka vaihtelee polttoaineittain. Poltossa tuhkan sulaminen aiheuttaa monia ei-toivottuja ilmiöitä, kuten lämpöpintojen kuonaantumista ja likaantumista.

Tuhkan sulamiskäyttäytyminen määritetään kiinteille biopolttoaineille standardin CEN/TS 15370-1:2006 mukaan. Kivihiilelle ja turpeelle määrittäminen on ISO 540:2008. Biopolttoaineiden tuhka- λ mpötila on 550 °C ja kivihiilelle ja turpeelle 815 °C. Syynä eroon on pääasiassa karbonaattien hajoaminen hiilidioksidiksi korkeammassa lämpötilassa. Tuhka jauhetaan 0,075 mm palakokoon. Ennen vuotta 2005 biopolttoaineiden tuhka- λ mpötila oli 815 °C, joten tuhkapitoisuudet voivat olla pienempiä kuin uudella menetelmällä analysoidut.

Kiinteiden biopolttoaineiden tuhka valmistetaan synterinmuotoinen näyte, jonka korkeus ja halkaisija on 3–5 mm. Vastaavasti kivihiilelle kuutionmuotoinen näytteen korkeus ja halkaisija on 3–7 mm. Kivihiilelle voidaan valmistaa myös kartionmuotoinen näyte.

Sulamiskäyttäytymisessä erotetaan yleensä neljä päävaihetta: muodonmuutoslämpötila (Deformation Temperature, DT), pehmenemislämpötila/pallolämpötila (Sphere Temperature, ST), puolipallolämpötila (Hemisphere Temperature, HT) ja juoksevuuslämpötila/sulalämpötila (Flow Temperature, FT). Biopolttoaineille voidaan määrittää myös kutistumisen alkamisen lämpötila (Shrinkage Starting Temperature, SST), mutta pehmenemislämpötilaa ei määritetä. Kuvassa 2.7 on tuhkan sulamiskäyttäytyminen biopolttoaineilla.

Kiinteiden biopolttoaineiden laatuvaatimusstandardeissa (SFS-EN ISO 17225 -sarja) tuhkan sulamiskäyttäytyminen määritetään hapettavissa olosuhteissa (oxidizing atmosphere), jolloin käytetään ilma/hiilidioksidiseosta. Tuhkan sulaminen voidaan määrittää myös pelkistävissä olosuhteissa (reducing atmosphere). Näytteen lämpötilaa nostetaan tietyllä nopeudella ja seurataan valokuvaten testikappaleen muodonmuutoksia lämpötilan funktiona. Biopolttoaineilla näyte kuumennetaan 550 °C:een 3–10 °C/min. Näyte kuvataan 10 °C välein ja kuvan 2.7 lämpötilat (SST, DT, HT ja FT) ilmoitetaan 10 °C tarkkuudella.



Kuva 2.7. Tuhkan sulamiskäyttäytyminen biopolttoaineilla. Kuva: VTT.

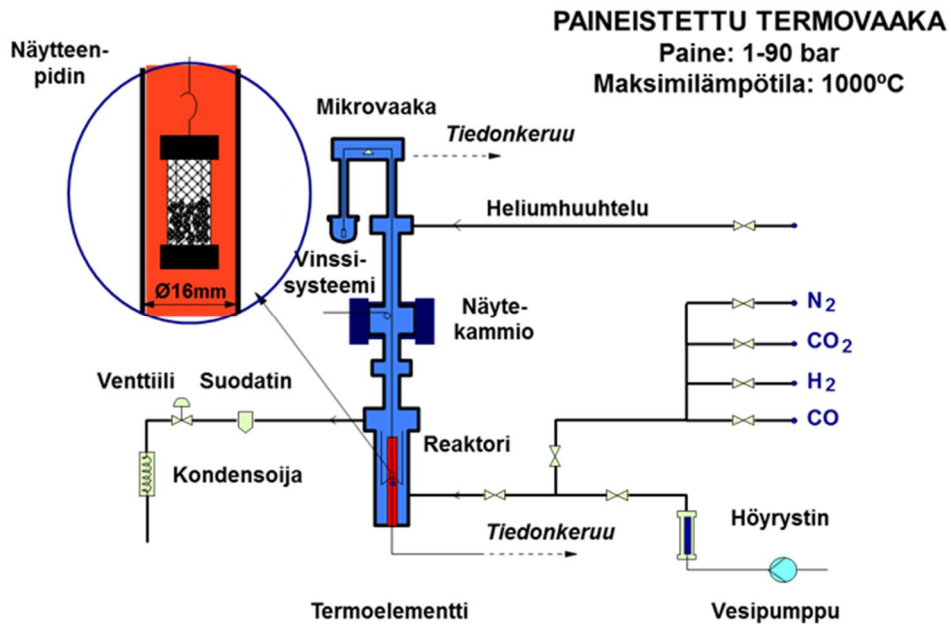
2.9 Polttoaineen reaktiivisuus kaasutuksessa

Tavallisten polttoaineominaisuuksien (kemiallinen koostumus) lisäksi polttoaineelle sopivien kaasutusolosuhteiden arvioimista varten tarvitaan tietoa myös polttoaineen reaktiivisuudesta ja tuhkan sintraantumista ja sulamiskäyttäytymisestä.

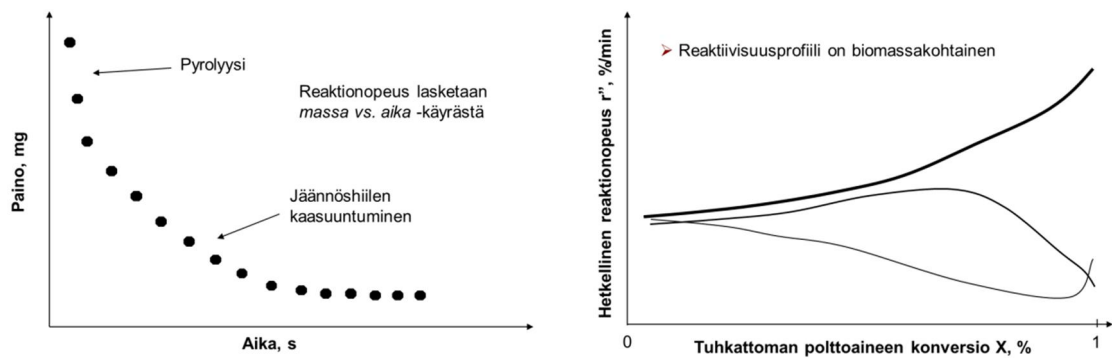
Reaktiivisuudella kuvataan pyrolysoitumisvaiheen jälkeistä hiilen (char) kaasuuntumista. Reaktiivisuus kertoo, miten paljon vaaditaan aikaa saavuttaa lopullinen polttoainekonversio eli kuinka helposti polttoaine kaasuuntuu. Reaktiivisuus (%/min) ilmoitetaan hetkellisenä reaktionopeutena tuhkatottoman polttoaineen konversiona funktiona. Reaktiivisuuteen vaikuttaa useampi tekijä: mm. itse polttoaine, sen kemiallinen koostumus, lämpötila, paine ja kaasukehä (Moilanen 2006).

Reaktiivisuus määritetään mittaamalla polttoainenäytteen painoa ajan funktiona paineistetussa termovaa'assa. Menetelmä on kehitetty simuloimaan oikeita kaasutusoloja ja erityisesti leijukerroskaasutusta. Kuvassa 2.8 on VTT:n termovaa'an kaaviokuva (PTGA = Pressurized Thermogravimetric Analyzer). Näyte lasketaan nopeasti kuumaan reaktoriin, jossa on vakiintuneet olosuhteet (lämpötila, paine, kaasukehä).

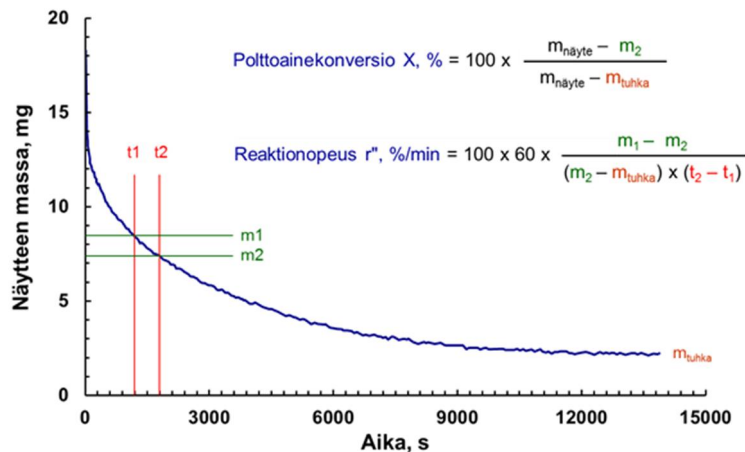
Näytteestä poistuu ensin kosteus, sitten tapahtuu pyrolysoituminen, jäljelle jäänyt hiili kaasuuntuu ja jäljelle jää tuhkaa. Näytteen massanmuutos määritetään mikrovaaka'alla vakio­lämpötilassa ajan funktiona. Massanmuutoksesta voidaan laskea näytteen (char) reaktiivisuus kaasutuksessa ja jäljelle jääneestä tuhkasta tutkitaan sen sintraantumisas­te. Reaktiivisuusprofiili (reaktionopeus vs. polttoainekonversio) on biomassakohtainen: reaktiivisuus kasvaa tai alenee konversio­n kasvaessa. Kuvissa 2.9 ja 2.10 on havainnollistettu reaktiivisuusmäärittystä tarkemmin.



Kuva 2.8. Paineistetun termovaaka'an kaaviokuva. Kuva: VTT.



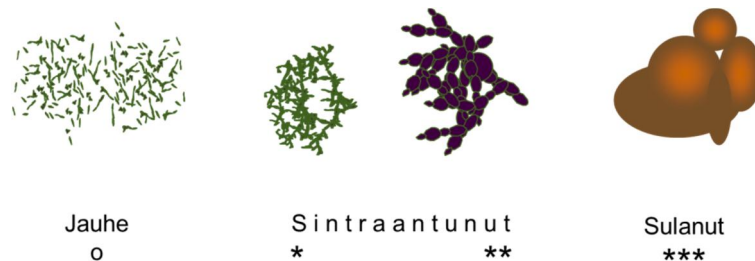
Kuva 2.9. Tyypillinen massanmuutos ajan funktiona (vasemmalla) ja esimerkkejä biomassan reaktiivisuusprofileista (oikealla). Kuva: VTT.



Kuva 2.10. Polttoaineen reaktiivisuuden laskeminen termovaakatuloksista. Kuva: VTT.

Reaktiivisuusmittausten jälkeen polttoainenäytteen tuhkaäännöksen rakennetta tarkastellaan mikroskooppilla, jotta nähdään, onko tuhka sintraantunut. Sintraantumisaste ilmoitetaan tähtinä (VTT:n menetelmä, Moilanen 2006) seuraavien kriteerien perusteella (kuva 2.11):

1. Jos tuhka ei sintraannu, käytetään merkkiä o.
2. Jos tuhka sintraantuu osittain ja/tai tuhkasta löytyy selvästi sulamisen merkkejä, tämä ilmaistaan yhdellä tähdellä tai kahdella tähdellä (* tai **).
3. Jos tuhka sintraantuu täysin tai lähes täysin tai tuhka on sulanut, käytetään kolmea tähteä (***)



Kuva 2.11. Tuhkan sintraantumisasteet. Kuva: VTT.

Polttoaineen reaktiivisuudesta ja tuhkan käyttäytymisestä voidaan päätellä seuraavaa:

- Reaktiivinen biomassa eikä tuhkan sulamista (tuhkalla korkea sulamispiste) → helppo kaasutettava
- Reaktiivinen biomassa ja tuhka sulaa (tuhkalla alhainen sulamispiste) → kaasutuslämpötila alemmaksi
- Ei kovin reaktiivinen biomassa ja tuhkassa sulamisen merkkejä → haastava polttoaine kaasuttaa

2.10 Päästökertoimen laskeminen

Päästökertoimella tarkoitetaan tietyn polttoainemäärän, energiamäärän tai raaka-ainemäärän sisältämän hiilen hapettuessa tai tietyn raaka-ainemäärän käytössä tai tuotemäärän tuotannossa syntyvän hiilidioksidin määrää. Seospolttaineille päästökertoimen määrittämissä hyödynnetään standardia SFS-EN 15440:2011. Standardi sisältää myös ¹⁴C-määrittämenetelmän kuvauksen.

Liitteessä I on Tilastokeskuksen julkaisemat eri polttoaineiden päästö- ja hapetuskertoimet sekä oletuslämpöarvot.

Polttoaineen hiilidioksidipäästökertoimen laskenta (Energia Suomessa 2004):

$$CO_2 \left[\frac{g}{MJ_{pa}} \right] = F \times \frac{m_c}{m_{pa}} \times \frac{M_{CO_2}}{M_c} \times 10^3 \times (1 - M_{ar}) \times \frac{1}{q_{net,ar}} \quad (2.12)$$

jossa

m_c/m_{pa}	polttoaineen hiilipitoisuus
M_{CO_2}	44,01 kg/kmol
M_c	12,01 kg/kmol
M_{ar}	kosteus, p-%
$q_{net,ar}$	lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg
F	hapettumiskerroin

Esimerkki turpeen CO₂-kertoimen laskemisesta jyrshinturpeen keskimääräisillä ominaisuusarvoilla:

- Turpeen hiilipitoisuus on 54,5 p-% kuiva-aineessa
- Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 21,00 MJ/kg
- Kosteus saapumistilassa on 46,5 p-%
- Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa ($q_{net,ar}$) on 10,10 MJ/kg

Yksi kilogramma käyttökosteudessa olevaa jyrshinturvetta sisältää $(100,0 - 46,5) / 100 \times 1\,000\text{ g} = 535\text{ g}$ kuivaa turvetta, jossa on hiiltä 54,5 % $\times 535\text{ g} = 292\text{ g}$

Tämä tuottaa hiilidioksidia

$$\frac{292\text{ g}}{12,01\text{ g/mol}} \times 44,01 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{mol}} = 1\,070\text{ g}_{CO_2}$$

$$CO_2\text{-päästökerroin: } \frac{1\,070\text{ g/kg}}{10,10\text{ MJ/kg}} = 105,9\text{ g}_{CO_2}/MJ$$

3. Näytteenotto ja näytteen käsittely

3.1 Yleistä näytteenotosta

Tässä luvussa käsitellään näytteenoton yleisperiaatteita, jotka sopivat monille kiinteille polttoaineille. Tarkemmin käydään läpi biopolttoaineiden ja erityisesti puupolttoaineiden näytteenottoa lämpö- ja voimalaitoksilla (Järvinen & Impola 2012, Järvinen 2012). Kiinteiden biopolttoaineiden näytteenotolle ja näytteiden käsittelylle annetaan standardien SFS-EN 14778:2012 ja SFS-EN 14780:2012 mukaiset yleisohjeet, joiden pohjalta tapauskohtaisia suunnitelmia ja ohjeita on mahdollisuus laatia. Ohjeet perustuvat puupolttoaineiden laatuohjeeseen (Alakangas & Impola 2014). Tuhkien näytteenotto on kuvattu VTT Tiedotteita 2141 -julkaisussa (Laine-Ylijoki et al. 2002). Eri polttoaineiden näytteenottostandardit on lueteltu liitteissä A ja B.

Näytteenotolla tarkoitetaan tietyn, analysoitavaksi soveltuvan erän irrottamista ja erottamista suuremmasta kokonaisuudesta siten, että sekä näyte että alkuperäinen materiaalierä ovat halutuilta ominaisuuksiltaan samanlaisia. Edustava näytteenotto tarkoittaa itse asiassa sekä systemaattisen että satunnaisen virheen pienentämistä. On arvioitu, että noin 80 % analyysitulosten virheistä on peräisin näytteenotosta, 15 % näytteenkäsittelystä ja 5 % itse analyysistä.

Hyvän näytteenoton ja käsittelyn yksinkertaistetut periaatteet ovat seuraavat:

- näytteenottopaikka mahdollisimman lähellä polttoaineen luovutusta
- näytteenotto vapaasta liikkeestä esim. putoavasta virrasta
- näytteenoton kohdistuttava koko polttoainevirtaan tai valtaosaan sitä
- polttoainevirrasta useampia pienempiä yksittäisnäytteitä
- vältettävä jatkuvaa osavirrasta tapahtuvaa näytteenottoa
- näyttekäsittely ja jakaminen eivät saa muuttaa tutkittavia ominaisuuksia

Hyvän näytteenoton peruseriaate on saada edustava näyte koko kohteena olevasta polttoaine-erästä. Jokaisella erän tai osaerän partikkelilla, jota näyte edustaa, tulisi olla yhtäläinen todennäköisyys päätyä mukaan näytteeseen. Näytteen käsittelyn tarkoituksena on pienentää näytettä sen edustavuus säilyttäen. Tämän varmistamiseksi tarvitaan näytteenottosuunnitelma, johon on suositeltavaa liittää näytteenotto- ja käsittelykaavio.

Jokaiselle laitokselle on hyvä laatia yksityiskohtainen näytteenottosuunnitelma, jonka sekä polttoaineiden toimittaja että lämpö- tai voimalaitos (polttoaineen ostaja) hyväksyvät kauppaa tehdessään ja joka jatkossa voi olla osa polttoainekaupan toimitussopimusta. Myös päästökauppa edellyttää laitospohjaista näytteenottosuunnitelmaa. Suunnitelmaa laadittaessa on otettava huomioon laitospohjaisesti polttoaineiden toimituslogistiikka, ajoneuvojen purkumenetelmät, laitoksen vastaanotto- ja käsittelyjärjestelmän asettamat vaatimukset ja rajoitteet parhaalle mahdolliselle ja luotettavalle näytteenotto- ja käsittelymenetelmälle. Lisäksi on otettava huomioon myös turvallisuusnäkökohdat. Suunnitelman pohjalta laaditaan myös tiivistetty, yksinkertainen näytteenotto-ohje, jonka mukaan näytteenottajat, useimmiten ajoneuvojen kuljettajat, toimivat kuormaa purettaessa.

Suunnitelmassa sovitaan kunkin lämpö- tai voimalaitoksen (polttoaineen ostajan) kanssa

- vastaanottoon parhaiten soveltuva näytteenottoaika ja -menetelmä
- käytettävät näytteenottolaitteet ja -välineet
- yksittäisnäytteiden lukumäärät ja tilavuudet
- näytteiden käsittely, säilytys ja merkintä sekä näytteenoton dokumentointi
- poikkeustilanteiden hallinta

3.2 Näytteenottoaika ja -tapa

Polttoainetoimituksissa ensisijainen näytteenottoaika on polttoaineen luovutuspaikka eli käytännössä usein vastaanottoasema, jossa yksittäisnäytteet kerätään kuorman purkamisen yhteydessä kuormasta putoavasta polttoainevirrasta tai heti sen jälkeen vastaanottotaskusta tai vastaanotosta lähtevältä kuljettimelta tai kuljettimelta putoavasta polttoainevirrasta. Näytteenottoaikaksi on syytä valita paikka, jossa varmimmin ja myös kohtuukustannuksin polttoaine-erästä saadaan edustava näyte. Luotettavimmin edustava näyte on mahdollisuus saada liikkuvasta, putoavasta polttoainevirrasta.

Nykyisen kokemuksen mukaan suositeltava järjestys polttoaineiden yksittäisnäytteenotolle on seuraava:

- liikkuva, jatkuva polttoainevirta, ensisijaisesti vastaanottoasemalla, mutta myös kuorma- tai siirto-kuormausvaiheessa esim. terminaaleilla
- suoraan kuormasta koneellisesti, läpi kuorman poraavalla näytteenottimilla
- vastaanottoasemalla kuormaa purettaessa tai heti kuorman purkamisen jälkeen joko vastaanottotaskusta tai polttoainekentältä
- kuormausvaiheessa kuormaajan kauhasta tai kasan rintauksesta
- suurista puupolttoainevirroista tai -aumoista ei suositella näytteiden ottamista kaupalliseen tarkoitukseen, koska edustavan näytteen saaminen on epävarmaa ja vaatii kohtuuttomasti työtä

Näytteenotto on se vaihe, joka aiheuttaa eniten epätarkkuutta määritysten tuloksiin. Tämän vuoksi näytteenottoon on kiinnitettävä erityistä huomiota ja se on tehtävä järjestelmällisesti ja huolellisesti. Tarkimpaan tulokseen päästään, jos näytteenotto saadaan koneelliseksi, mikä on mahdollista jatkuvasta polttoainevirrasta näytteitä otettaessa.

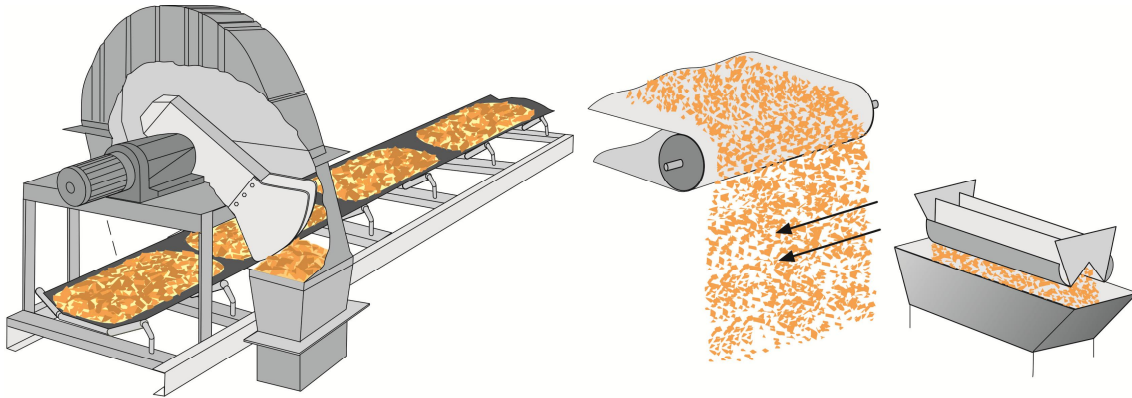
Biopolttoaineiden epähomogeenisuudesta johtuen on usein vaikea ottaa yksittäisnäytteitä tavalla, joka täyttää hyvän näytteenoton periaatteen, jonka mukaan jokaisella yksittäisellä osalla on yhtäläinen todennäköisyys tulla mukaan lopulliseen näytteeseen. Tällainen tilanne on varsinkin otettaessa näytteitä paikallaan olevasta, usein partikkelikoon mukaan lajittuneesta polttoaineesta, esim. varastokasoista, silloista, vastaanottotaskusta tai kuormasta. Yksittäisnäytteiden ottaminen on helpompaa ja luotettavampaa, kun polttoaine on liikkeessä, esim. suoraan kuljettimelta tai kuljettimelta putoavasta polttoainevirrasta sekä kuormaa purettaessa tai lastattaessa.

Näytteenotto on parempi tehdä liikkeellä olevasta, usein putoavasta polttoainevirrasta, jos se on suinkin mahdollista järjestää.

3.3 Koneellinen näytteenotto

Koneellisen näytteenoton peruseräyksien mukaan yksittäisnäytteet otetaan siten, että polttoainevirran koko poikkileikkaus on näytteessä keskiarvoperiaatteen mukaan edustettuna. Helpoiten tämä voidaan toteuttaa ottamalla näytteet joko suoraan kuljetinhihnalta leikkaamalla näytteeseen osa koko polttoainevirrasta tai kuljettimen päästä putoavasta polttoainevirrasta (kuva 3.1). Yleensä se tapahtuu siten, että näytteenottolaatikko liikkuu vakionopeudella koko polttoainevirran poikki, jolloin näyte leikkautuu koko polttoainevirrasta. Vaihtoehtoisia menetelmiä näytteenottimen liikeratkaisuiksi on useita. Molemmissa tapauksissa näytteenottimen suuaukon on oltava vähintään 2,5 kertaa materiaalin nimellisesti suurin palakoko (sen pyöreäaukkoisen seulan aukkojen läpimitta, jonka vähintään 95 % polttoaineen painosta läpäisee). Näyt-

teenottolaatikon on oltava riittävän suuri. Näytteenottolaatikon täyttöasteeksi mitoitetaan standardin mukaisesti 2/3 (noin 67 %) koko laatikon tilavuudesta.



Esimerkki kuljettimen yli tapahtuvasta näytteenotosta

Esimerkki putoavasta virrasta tapahtuvasta näytteenotosta

Kuva 3.1. Vasemmalla kuljettimen yli tapahtuva näytteenotto ja oikealla putoavasta virrasta ottava näytteenotin. Kuva: VTT.

Koneellinen näytteenotto voidaan toteuttaa myös kola- ja ruvikuljettimilta. Tällaisista epäjatkuvista polttoainevirroista yksittäisnäyte voidaan ottaa avaamalla kuljettimen pohja koko leveydeltään siten, että näytteeseen saadaan koko epäjatkuuserä polttoainetta, esim. kolien väliin jäävä polttoaine-erä.

Näytteenottopaikkaa kuljetinlinjassa valittaessa täytyy varmistaa, että eri kuormien ja toimittajien polttoaineet pysyvät erillään näytteenottopaikassa. Samoin näytteenottoväli on mitoitettava kuormien purku- ja kuljetinkapasiteetin mukaan siten, että saadaan suunniteltu määrä yksittäisnäytteitä kuormaa kohti ja että ne levittyvät edustavasti yli koko kuorman pituudelta.

Yksittäisnäytteet voidaan ottaa myös vastaanottoasemalla ruuvinäytteenottimilla suoraan kuormasta putoavasta polttoainevirrasta. Koneellisessa näytteenotossa yksittäisnäytteen tilavuudet kasvavat suuriksi, joten automaattijärjestelmiin on yleensä suunniteltu näytteiden murskaus-, sekoitus- ja jakolaitteet. Niistä saadaan kuormakohtainen suhteellisen pieni näyte toimittajakohtaiseen keräilyastiaan. Näistä kokoomanäytteistä saadaan sekoituksen ja jakamisen jälkeen vuorokausikohtainen laboratorionäyte analysoitavaksi.

Koska kuormia tulee laitokselle sekä eri toimittajilta että sisältäen eri polttoainelaatuja, on varmistettava, että käytetty näytteenotin ja näytteenkäsittelylaitteet puhdistuvat aina kuormakohtaisen näytteenottojakson jälkeen. Samoin on taattava, että koko kerätty näyte-erä (myös hienoaines ja suurimmat kappaleet) siirtyy näytteeseen.

Käytettäessä koneellisia näytteenotto- ja käsittelylaitteita, on niiden luotettavuus testattava lähinnä mahdollisen systemaattisen virheen havaitsemiseksi ja sen poistamiseksi. Lisäksi eri osapuolten on hyväksyttävä niiden käyttöönotto polttoaineen hinnoittelun perustana olevalle näytteenotolle.

3.4 Manuaalinen näytteenotto

Useimmilla laitoksilla polttoaineen laatu ja hinnoittelu perustuvat vielä manuaaliseen eli käsin tapahtuvaan näytteenottoon. Yleisimmin yksittäisnäytteet otetaan kuorman purkamisen yhteydessä joko peräpurkuautosta putoavasta polttoainevirrasta tai heti kuorman purkamisen jälkeen, esimerkiksi kuormakohtaisesta polttoainekasasta, vastaanottotaskusta tai polttoainekentältä.

Manuaalinen näytteenotto on mahdollista toteuttaa kuljetinjärjestelmistä samoilla periaatteilla kuin edellä kuvatuilla koneellisilla näytteenottomenetelmillä. Oikein toteutettuina ne ovat kuitenkin työläitä jatkuvaan

käyttöön, koska esimerkiksi otettaessa näytteitä suoraan hihnakuljettimelta on kuljetin pysäytettävä näytteenoton ajaksi.

Manuaalisessa näytteenotossa on käytettävä pitkävartista näytteenottokauhaa (kuva 3.2), jonka suukaukon läpimitta molemmissa suunnissa on vähintään 2,5 kertaa nimellisesti suurin palakoko.



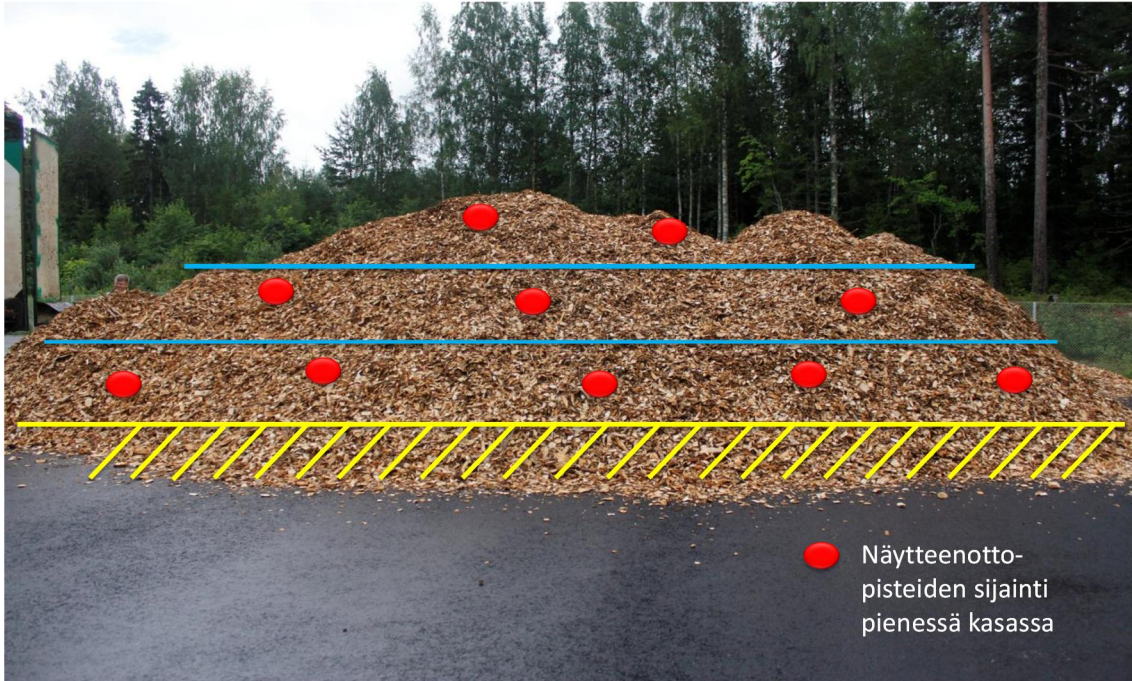
Kuva 3.2. Pitkävartinen kolmen litran näytteenottokauha, joka sopii metsähakkeen näytteenottoon.
Kuva: Ismo Tiihonen.

Otettaessa näytteitä suoraan kuormasta putoavasta polttoainevirrasta, näytteenottoväli määrätty siten, että riittävä määrä yksittäisnäytteitä kuormaa kohti saadaan tasaisesti kuorman eri osista. Näytteitä on pyrittävä ottamaan polttoainevirran eri osista myös kuorman leveyssuunnassa. Näytteenottoa on vältettävä esimerkiksi peräpurkuautosta aivan ensimmäisenä tulevista osista sekä viimeisistä ”rippeistä”. Myös turvallisuus on huomioitava autosta putoavan polttoainevirran näytteenotossa. Näytteenotto suositellaan järjestettävän ”lasin takaa” mahdollisimman puhtaasta tilasta pitkävartisella näytteenottokauhalla. Tämä onkin toteutettu jo onnistuneesti monella laitoksella.

Otettaessa näytteitä vastaanottotaskusta esim. sivukippiauton kuorman purkamisen jälkeen näytteenottajan on kierrettävä koko tasku ja otettava näytteet taskun eri osista turvallisuustekijät kuitenkin huomioon ottaen, jotta näytteenotto kohdistuu tasaisesti koko kuorman eri osiin.

Usein polttoainekuorma joudutaan purkamaan polttoainekentälle. Tällöin näytteet on mahdollista kerätä peräpurkuauton putoavasta polttoainevirrasta edellä kuvatulla tavalla. Aina ei kuitenkaan ole mahdollista ottaa yksittäisnäytteitä putoavasta virrasta, vaan näytteenotto joudutaan tekemään vasta kuorman purkamisen jälkeen kuormakohtaisesta kasasta. Tällöinkin on käytettävä näytteenottokauhaa ja näytteet on kerättävä kasan eri osista siten, että näytteet kohdistuvat mahdollisimman tasaisesti puretun kuorman eri

osiin. Polttoaine on lajittunut lähes poikkeuksetta kuormaa purettaessa, jolloin karkeimmat partikkelit ovat valuneet kasan alareunoille ja hienoin aines on jäänyt kasan keskelle ja yläosaan. Tästä syystä näytteitä pitää ottaa tasaisin välein myös kasan korkeussuunnassa. Näytteiden ottoa aivan kasan pinnalta ja pohja- ja reunaosista on vältettävä (kuva 3.3). Näytteet kaivetaan näytekauhalla pintakerroksen alta.



Kuva 3.3. Näytteenottpisteiden sijainti pienessä polttoainekasassa. Keltaisella merkityltä alueelta ei oteta näytteitä. Kuva: Haklog Ky.

Manuaalisessa näytteenotossa pitää pyrkiä mahdollisimman suureen systemaattisuuteen kuormakohtaisia yksittäisnäytteitä otettaessa. Pääperiaate on, että näytteet edustavat tasaisesti koko kuormaa eikä min-käänlaista lajittumista tai valikoitumista saa tapahtua näytteenoton aikana. Näytteenottaja ei saa tehdä valintaa esimerkiksi palakoon suhteen, vaan suurimmatkin näytteeseen tulevat kappaleet ja mahdolliset epäpuhtaudet on otettava mukaan kuormakohtaiseen kokoomanäytteeseen.

3.5 Yksittäisnäytteiden lukumäärä ja näytteiden koko

Yksittäisnäytteiden lukumäärään vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat tietyn ominaisuuden esim. kosteuden todellinen hajonta siinä erässä (kuormassa), johon näytteenotto kohdistuu, tarkkuusvaatimus ja toimittuserään kuuluvien kuormien lukumäärä. Kosteushajonnan kasvaessa tarkkuusvaatimus lisää yksittäisnäytteiden lukumäärää helposti kohtuuttomiksi. Kosteuden hajonta kuormissa riippuu polttoainelajista, mutta myös kuormien täyttötavasta. Esimerkiksi suoraan hakkurilla kuormaan haketettaessa tapahtuu lajittumista kuorman eri osiin. Suomessa epähomogeenisten hakkuutähde- ja kokopuuhakkeiden kosteushajonnat ovat suurempia kuin rankahakkeella ja kantomurskeella.

Jos näytteenotto tapahtuu polttoainekuormittain, jatkuvassa polttoainetoimituksessa otetaan yksittäisnäytteitä vähintään 2 yksittäisnäytettä/50 irtom³ polttoainetta.

Erikokoisten kuormatilojen yksittäisnäytteiden vähimmäismäärät ovat puulle ja turpeelle seuraavat:

- kuorma-auto (nuppi) vähintään 2 näytettä
- puoliperävaunu (< 100 m³) vähintään 4 näytettä
- yhdistelmä (100–160 m³) vähintään 6 näytettä (2 nupista + 4 perävaunusta)
- konttilyhdistelmät vähintään 2 näytettä/kontti

Näillä näytemäärillä on mahdollisuus saavuttaa 3–5 kuorman toimituserillä noin ± 3 %-yksikön tarkkuusvaatimus kosteudessa ja yli kuuden kuorman toimituksissa tarkkuus paranee noin ± 2 %-yksikköön.

Koska varsinkin osalla metsäpolttoaineista on suuri kuorman sisäinen kosteushajonta, pienillä toimituserillä (alle 200 irto-m³) ja määritettäessä kuormakohtaisia ominaisuuksia on yksittäisnäytteiden lukumäärä vähintään kaksinkertaistettava. Tällöin on mahdollisuus saavuttaa Suomen oloissa pääosalla puupolttoaineita noin ± 4 %-yksikön tarkkuus kosteusmäärittämisessä. Jos keskimääräinen toimitettu määrä turvetta on alle 250 tonnia (noin 700 m³ tai 6 rekkakuormaa) kuukaudessa, yksittäisnäytteiden vähimmäismäärä on kaksinkertainen.

Biopolttoaineiden yksittäisnäytteen tilavuus perustuu näytteenottostandardissa SFS-EN 14778:2012 kyseisen polttoaineen palakokoon. Yksittäisnäytteen vähimmäistilavuus lasketaan kaavan 3.1 mukaisesti:

$$\begin{aligned} Vol_{incr} &= 0,5 && \text{kun } d_{95} < 10 && (3.1) \\ Vol_{incr} &= 0,05 * d_{95} && \text{kun } d_{95} \geq 10 \end{aligned}$$

jossa

Vol_{incr} yksittäisnäytteen vähimmäistilavuus, litraa
 d_{95} nimellisesti suurin palakoko, mm (sen pyöreäaukkoisen seulan aukkojen läpimitta, jonka vähintään 95 % polttoaineen massasta läpäisee)

Jos hakkeen partikkelien nimelliskoko (d_{95}) on 100 mm, yksittäisnäytettä otetaan vähintään 5 litraa, ja jos nimelliskoko on 63 mm, näytettä otetaan vähintään 3 litraa. Käytännössä Suomessa jälkimmäinen palakoko on hakkeilla tyyppillisin.

Huom! Vaikka laskenta antaa palakoolle 45 mm yksittäisnäytteen vähimmäiskooksi 2,25 litraa, on sillekin syytä käyttää 3 litran näytekoko. Kantomurskeilla nimelliskoko on suurempi kuin hakkeella, jolloin yksittäisnäytteen tilavuus on 5 litraa.

Taulukko 3.1. Yksittäisnäytteen koko eri palakoon polttoaineille (Alakangas & Impola 2014, NT ENVIR 009:fi 2006).

Polttoaine	Yksittäisnäytteen koko, litra
Sahanpuru	0,5
Metsähake	3
Murske (kanto) ja palaturve	5
Kuori	5
Jyrsinturve ja pelletit	1 (2)

Koneellisessa näytteenotossa useissa tapauksissa näytettä otetaan jopa kymmeniä litroja kuormaa kohti. Ylijäämänäyte palautetaan näytteen jakamisen jälkeen uudelleen syöttölinjalle. Lopullisen näytteen koko on lähellä manuaalisen näytteenoton yksittäisnäytekoko. Näytteen asianmukaisella jakamisella on varmistettava edustavan näytteen saanti kustakin kuormasta. Suositeltavaa on, että koneellisen näytteenoton luotettava toiminta ja näytteenoton kannalta edustavan näytteen saanti varmistetaan erillisellä testauksella, jonka sekä polttoaineen toimittaja ja käyttäjä/ostaja hyväksyvät.

3.6 Näytteiden muodostaminen ja käsittely

Näytteenottostandardissa kuvataan menetelmiä, joilla kokoomanäytteet voidaan pienentää laboratorio- ja analyysinäytteiksi sekä kuvataan näytteiden sekoittamiseen ja jakamiseen soveltuvia laitteita ja menetelmiä.

Näytteiden luotettavassa käsittelyssä on noudatettava tiettyjä peruseriaatteita

- jakamisen peruseriaate on, että näytteen koostumus ei saa muuttua alkuperäisestä eri käsittelyvaiheiden aikana
- näytteiden huolellinen sekoitus parantaa jakamisen luotettavuutta
- puupolttoaineiden partikkelikokoa pienennettäessä (murskaus, jauhaminen) ei kosteuden muutoksia eikä hienoaineksen häviöitä saa tapahtua
- näytteen lämpenemistä ja kuivumista on vältettävä näytekäsittelyn ja varastoinnin aikana
- kaupalliseen laadunmääritykseen käytettävät näytteenotto- ja käsittelylaitteet sekä -menetelmät on aina testattava yhteisesti sovitavalla tavalla.

Kokoomanäytteitä muodostetaan toimitetuista polttoaineista niiden ominaisuuksien määrittämistä, etupäässä hinnan määrittelyä, mutta myös päästökauppaa ja muuta erikseen määritettyä tarkoitusta varten. Kokoomanäytteistä analysoidaan yleensä polttoaineen kosteus sekä kuiva-aineen ominaisuuksia (tuhka, lämpöarvo, yms.). Kokoomanäytteet muodostetaan toimittaja- ja tarvittaessa polttoainelaji- tai toimituspaikkakohtaisesti ja aina tietyltä ajanjaksolta.

Useimmiten tällaisen jakson pituus on

- kosteuden osalta yksi vuorokausi eli toimituserä. Suurissa esim. yli 2 000 irto-m³ toimituksissa on suositeltavaa muodostaa osatoimituseräkohtaisia kokoomanäytteitä
- kuiva-aineen ominaisuuksien (esimerkiksi lämpöarvo ja tuhkapitoisuus) osalta enintään yksi kuukausi

Kokooma- ja laboratorionäytteitä muodostettaessa voidaan valita jokin seuraavista menetelmistä:

- Kaikki toimituseräkohtaiset yksittäisnäytteet laitetaan suoraan yhteen astiaan muodostaen kokoomanäytteen, joka lähetetään laboratorioon, jossa siitä valmistetaan laboratorionäyte.
- Yksittäisnäytteet sekoitetaan keskenään muodostaen kokoomanäytteen, josta sekoituksen ja jakamisen jälkeen muodostetaan laboratorionäyte.
- Kukin yksittäisnäyte pannaan erilliseen astiaan tai pussiin ja lähetetään laboratorioon. Laboratorio yhdistää näytteet muodostaen laboratorionäytteen.

Kokoomanäyte kuiva-aineen ominaisuuksien määrittämiseksi muodostetaan yleensä kunkin kosteusmäärittäysnäytteen kuivatusta osasta. Kyseisen näytteen edustama kuiva-ainetonnimäärä suhteutetaan kokoomanäytteeseen toimitetun polttoaine-erän kuiva-ainemäärän mukaan (esimerkki 3.1). Vastaava näyte voidaan erottaa myös kosteista polttoaine-eristä suhteutettuna näytteen edustamaan toimitusmäärään. Esimerkissä 3.1 kahden viikon kosteusnäytteistä on tehty kokoomanäyte lämpöarvoanalyysiä varten.

Esimerkki 3.1: Kokoomanäytteen valmistus painottamalla toimituserän koolla. Lähde: Labtium Oy.

Päivä- määrä	Toimitus- määrä, tonnia	Kosteus, p-%	Kuiva- ainemäärä, tonnia	Osuus kokonaiskuiva- ainemäärästä, p-%	Kokooma- näytteeseen punnittava määrä, g
1.8.2015	40,20	48,34	20,77	6,402	38,41
2.8.2015	40,60	44,49	22,54	6,947	41,68
3.8.2015	40,00	47,49	21,00	6,475	38,85
4.8.2015	40,50	51,20	19,76	6,093	36,56
5.8.2015	40,40	47,83	21,08	6,497	38,98
6.8.2015	41,20	55,15	18,48	5,696	34,18
7.8.2015	39,30	51,68	18,99	5,854	35,12
8.8.2015	81,70	49,87	40,96	12,625	75,75
9.8.2015	41,30	50,18	20,58	6,343	38,06
10.8.2015	38,90	48,01	20,22	6,234	37,41
11.8.2015	39,80	48,86	20,35	6,274	37,65
12.8.2015	41,50	49,62	20,91	6,445	38,67
13.8.2015	39,90	49,40	20,19	6,224	37,34
14.8.2015	39,00	54,45	17,76	5,476	32,86
15.8.2015	40,90	49,13	20,81	6,414	38,48
Yhteensä	645,20		324,39	100,000	600,00

Suurissa toimituksissa toimittajakohtaiset ja tarvittaessa polttoainelajikohtaiset näytteet kerätään toimituseräkohtaisesti isoon kokoomanäyteastiaan, josta kerran vuorokaudessa sekoituksen ja jakamisen jälkeen saadaan näyte kosteusmääritykseen. Pienemmissä toimituksissa kuormakohtaiset näytteet voidaan ottaa omiin muovipusseihin tai astioihin, jotka toimitetaan kosteusmääritykseen. Puupolttaineilla ongelmana ovat suuret yksittäisnäytteiden tilavuudet, joten kuormakohtainen kokoomanäyte joudutaan jakamaan pienemmäksi ennen laboratorioon toimittamista.

Kokoomanäytteitä on säilytettävä huolellisesti koko keräysjakson ajan kannellisissa, ilmatiiviissä astioissa mahdollisimman viileässä tilassa. On myös huolehdittava, ettei kosteusmääritykseen kerättävän kokoomanäytteen kosteus muutu säilytyksen aikana.

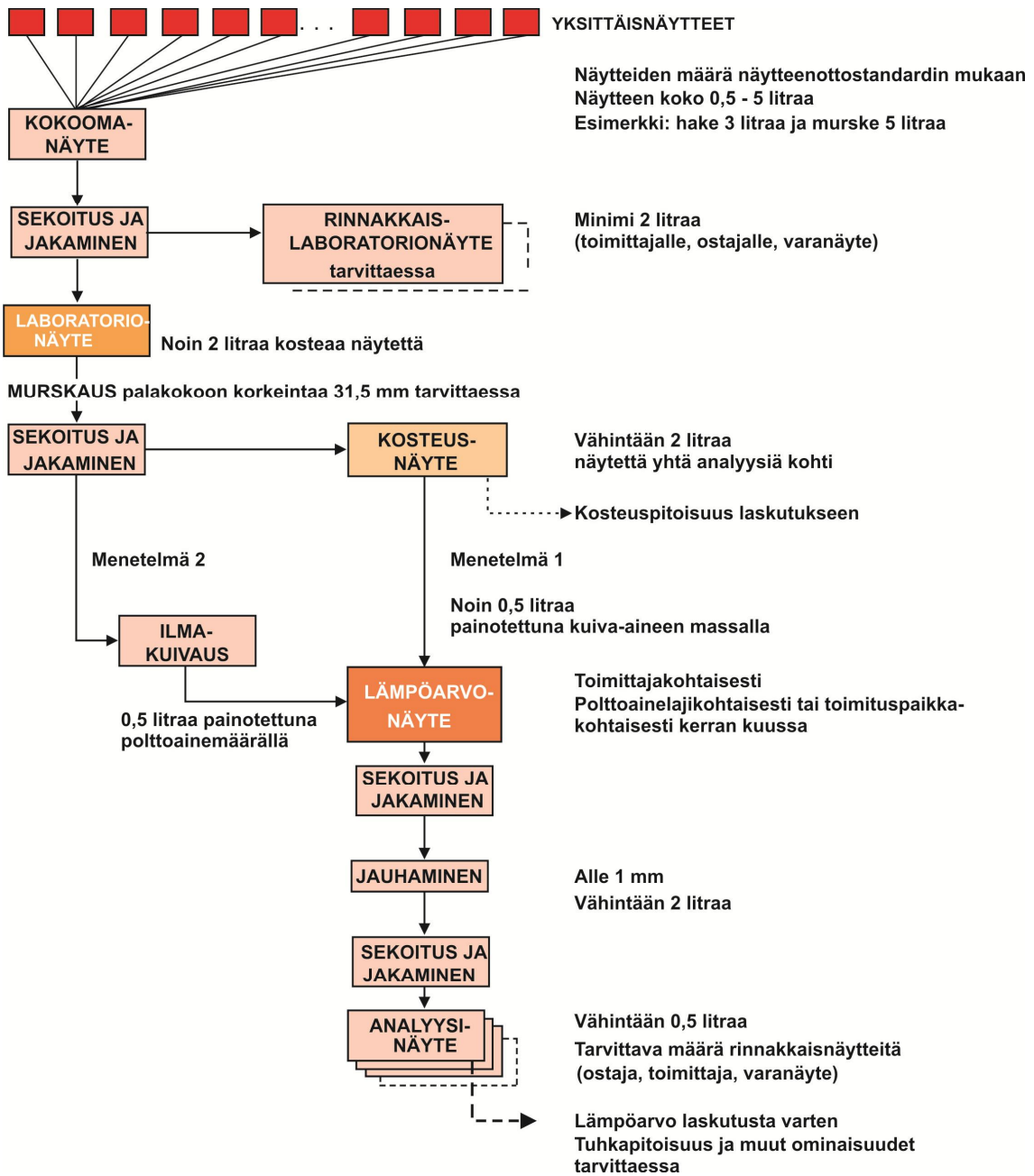
Kuvassa 3.4 on esitetty näytteenostostandardien SFS-EN 14778:2012 ja SFS-EN 14780:2012 mukaiset näytekoon eri pienentämisvaiheet sekä näytemäärien koot eri prosessin vaiheissa.

Yksittäisnäytteen lukumäärä biopolttaineille lasketaan kaavalla 3.2:

$$n = \frac{4V_l}{NP_L^2 - 4V_{PT}} \quad (3.2)$$

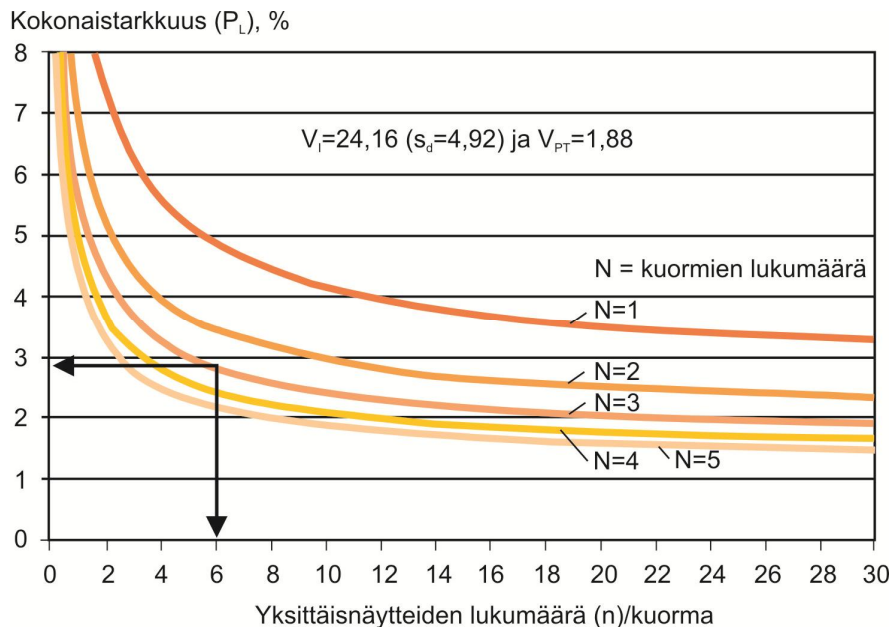
jossa

- n yksittäisnäytteiden pienin lukumäärä
- P_L haluttu kokonaistarkkuus sisältäen näytteenoton, esikäsittelyn ja määrittelyn (analyysin) 95 % tilastollisella luottamustasolla
- V_l primäärinen yksittäisnäytteiden välinen varianssi (= sisäisen hajonnan neliö, s_d^2)
- N toimituserän osien (sublot) lukumäärä eli kuormien lukumäärä
- V_{PT} esikäsittelyn ja määrittelyn varianssi



Kuva 3.4. Näytteenkäsittelykaavio. Kuva: VTT (Alakangas & Impola 2014).

Kuvassa 3.5 on esitetty kokonaistarkkuuden (P_L) riippuvuus yksittäisnäytteiden lukumäärästä (n) hakkuutähteellä.



Kuva 3.5. Hakkuutähdihakkeen yksittäisnäytteiden lukumäärän (n) riippuvuus halutusta kokonaistarkkuudesta (P_L) kuormien lukumäärän (N) ollessa parametreina vuodenaikojen keskimääräisellä hajonnalla. Kuva: VTT (Alakangas & Impola 2014).

Kun otetaan kuusi yksittäisnäytettä hakkuutähdekuormasta, kokonaistarkkuus on vajaa ± 3 %-yksikköä toimituserän ollessa kolme kuormaa, tarkkuus lähenee ± 2 %-yksikköä toimituserän kasvaessa viiteen kuormaan. Kokonaistarkkuuden muutokset ovat suuria pienillä toimituserillä (1–2 kuormaa), jolloin yksittäisnäytteiden lukumäärää on kaksinkertaistettava, jotta kokonaistarkkuus pysyy siedettävänä. Sisäisen hajonnan vaihtelut eivät vaikuta kuvaajien muotoon, suuremmilla hajonnoilla kuvan käyräparvi siirtyy ylöspäin eli näytteenoton tarkkuus heikkenee.

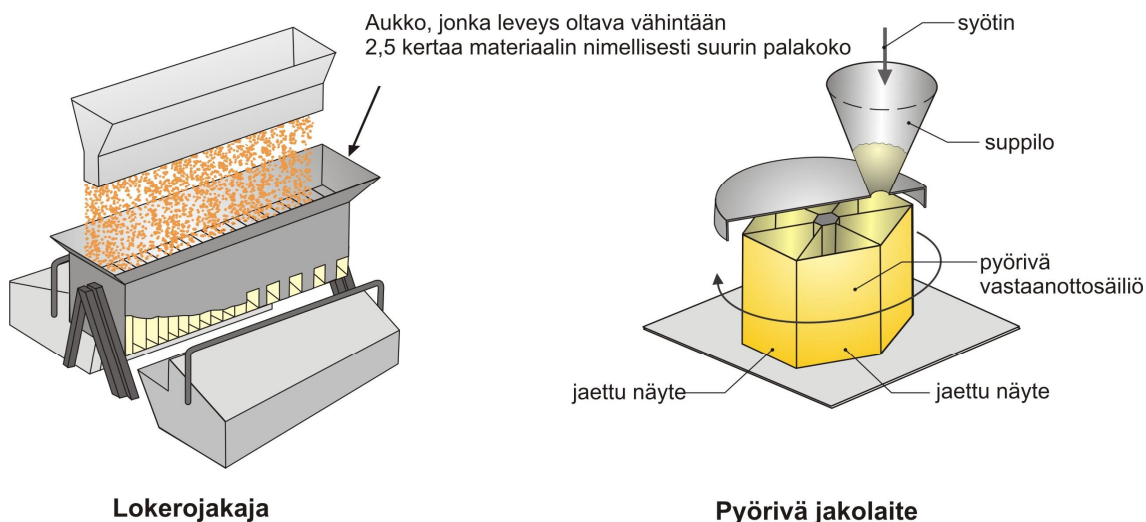
Kokoomanäyte jaetaan tarvittavan tai halutun kokoiseksi laboratorionäytteeksi, jonka tilavuus kiinteillä polttoaineilla on vähintään kaksi litraa. Vähimmäistilavuuden määrää yleensä kosteusstandardin SFS-EN ISO 18134-2:2015 mukainen kosteusmäärittäminen, jonka edellyttämä näytemäärä on vähintään 300 g kosteaa näytettä (ks. luku 2.2.1). Mikäli halutaan määrittää myös muita polttoaineomaisuuksia, näytemäärän on oltava edellä mainittua suurempi. Taulukossa 3.2 on tarvittavia näytemääriä erilaisille analyyseille.

Taulukko 3.2. Näytemäärät tyyppisille analyyseille (Alakangas & Impola 2014).

Analyysit	Näytemäärä
Perusanalyysit (lämpöarvo Q, tuhka A, rikki S, hiili C, vety H ja typpi N)	Noin 2 litraa analyysiä kohti (voidaan tehdä myös kosteusanalyysinäytteestä)
Kosteus, M	Vähintään 300 g kosteaa näytettä eli noin 2 litraa analyysiä kohti
Irtotiheys, BD	Noin 70 litraa analyysiä kohti, kun irtotiheys määritetään 50 litran astialla (esim. hake) tai 7 litraa analyysiä kohti, kun irtotiheys määritetään 5 litran astialla (esim. pelletit)
Palakoko	Noin 8 litraa analyysiä kohti 20 % kosteudessa

3.7 Näytteen jakaminen

Suuret kokoomanäytteet voidaan sekoittaa ja jakaa erilaisilla neliöinti- ja kasamenetelmillä, joiden kuvaukset löytyvät näytteenotostandardista. Ennen kokoomanäytteen jakamista olennaista on sen hyvä sekoittaminen. Sekoituksen jälkeen kokoomanäyte voidaan jakaa siihen soveltuvilla laitteilla, josta esimerkkinä ovat kuvan 3.6 standardin SFS-EN 14780:2012 mukaiset jakolaitteet. Kuvassa 3.7 on esimerkki hakenäytteen jakamisesta lokerojakajalla. Puupolttoaineiden partikkelikoon kasvaessa lokerojakajan mitoituksessa on otettava huomioon, että luotettavasti toimivan jakajan lokeron aukon on oltava riittävän suuri eli 2,5 kertaa nimellisesti suurin palakoko. Erityisesti kosteiden polttoaineiden jakamisessa tällaisten mekaanisten jakajien käyttö vaatii merkittävän työpanoksen ja suurta huolellisuutta laitteen puhdistamisessa ja kuivamisessa ennen seuraavan näytteen käsittelyä.



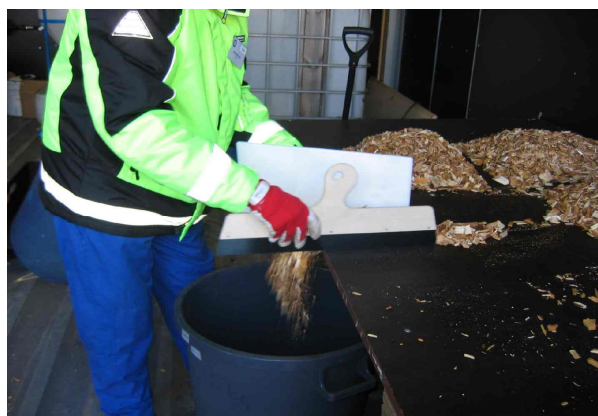
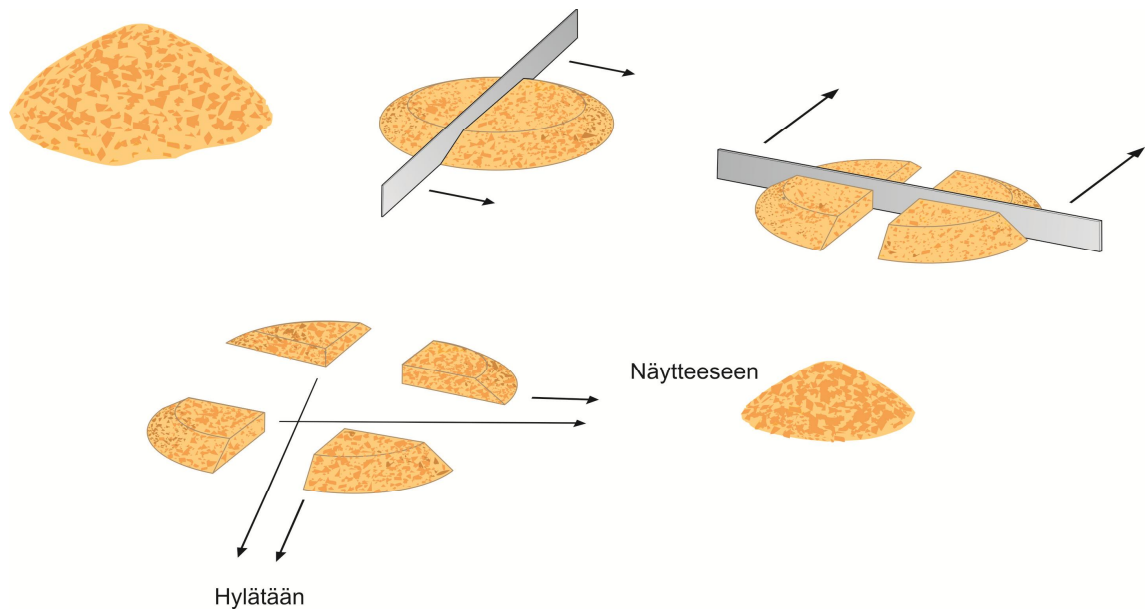
Lokerojakaja

Pyörivä jakolaite

Kuva 3.6. Esimerkki lokeroidusta laatikkojakajasta sekä pyörivästä jakolaitteesta. Kuva: VTT.



Kuva 3.7. Hakenäytteen jakaminen lokerojakajalla. Kuva: Eija Alakangas, VTT.



Kuva 3.8. Näytteen jakaminen neliointimenetelmällä. Kuvat: Eija Alakangas, VTT.

Mikäli näytteenjakajaa ei ole käytettävissä, näyte voidaan jakaa myös käsin kuvassa 3.8 esitetyllä neliöimismenetelmällä. Näyte sekoitetaan huolellisesti pohjaa myöten ja koko näyte kaadetaan kasaksi nopeahkolla liikkeellä pöydälle tai sopivan levyn päälle. Kasa tasoitetaan. Tämän jälkeen näyte jaetaan sopiva apuvälinettä käyttäen neljään yhtä suureen osaan. Osista valitaan käytettäväksi näytteeseen kaksi osaa kuvan 3.8 mukaisesti (vastakkaiset osat) ja kaksi osaa hylätään. Neliöinti voidaan tehdä jäljelle jääville osille myös uudestaan, mikäli näytettä on vielä yhden neliöinnin jälkeen liian suuri määrä. Tällöin näyte on sekoitettava huolellisesti ennen toista neliöintiä.

Kuvassa 3.8 on ensin määritetty irtotiheys ja irtotiheysnäytteestä on jakamalla saatu kosteusnäyte. Menetelmien yhdistäminen sopii pienille laiteyksiköille, jotka käyvät kauppa tilavuusyksiköinä ja joilla ei ole automaattista. Irtotiheyden, kosteuden ja kuiva-aineen tehollisen lämpöarvon avulla voidaan määrittää toimittimen energiasisältö (luku 2.3.4).

4. Puupolttoaineet

4.1 Puun ja puunosien ominaisuuksia

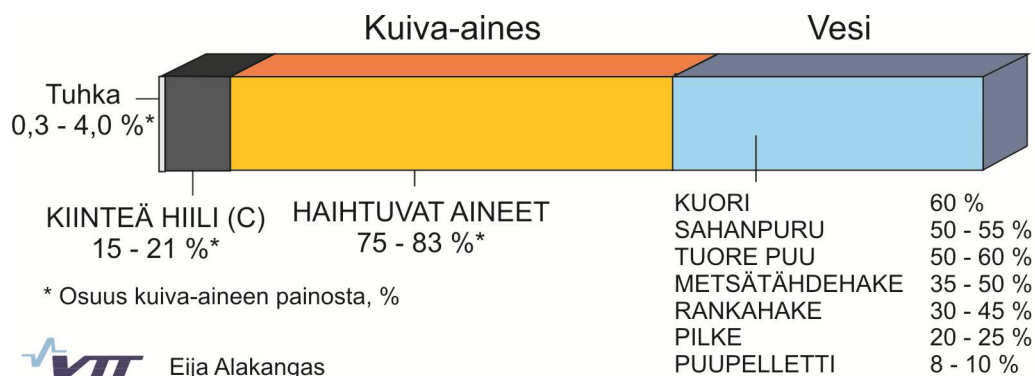
Biomassa syntyy kasvien yhteyttämisprosessissa. Vihreät lehdet valmistavat ilmakehän hiilidioksidista ja maaperän vedestä auringon energian avulla yksinkertaisia sokereita. Kasvin elävät solut muokkaavat niistä edelleen monimutkaisempia yhdisteitä, jotka koostuvat hiilestä (C), hapesta (O) ja vedystä (H). Lisäksi biomassassa on pieniä määriä typpeä (N) ja erilaisia mineraaliaineita.

Yhteyttämisprosessissa metsät sieppaavat siis ilmakehästä hiiltä ja sitovat samalla auringon energiaa kemialliseksi energiaksi. Kun puu tai sen osa kuolee, biomassa hajoaa hapetusreaktiossa, jossa hiilen ja vedyn sidokset murtuvat ja energia vapautuu. Luonnossa hajoaminen tapahtuu joko puun lahoamisen kautta hitaasti tai metsäpalossa äkkinäisesti. Jos palaminen siirretään suljettuun tilaan, vapautuva energia voidaan ottaa talteen lämmön, höyryn tai sähkön tuottamiseksi.

Biomassan rakennusaineista määrällisesti tärkein on selluloosa, joka on kaikista maapallolla tavattavista orgaanisista yhdisteistä runsain. Puuvartisilla kasveilla sen osuus kuivamassasta on 40–50 %, lehtipuilla korkeampi kuin havupuilla. Selluloosa koostuu glukoosimolekyyleistä ($C_6H_{12}O_5$), jotka happiatomien yhdistäminä muodostavat pitkiä ketjumolekyylejä ($C_6H_{12}O_5$)_n. Selluloosan rinnalla puitten biomassassa on hemisellulooseja, joitten ketjumolekyylit koostuvat useista erilaisista sokereista. Taulukossa 4.1 on eri puulajien selluloosan, hemiselluloosan, ligniinin sekä uuteaineiden pitoisuuksia. Havupuiden ligniinipitoisuus on suurempi kuin lehtipuiden. 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) eli sellaisia yhdisteitä, jotka voidaan uutaa puusta neutraaleilla orgaanisilla liuottimilla. Lehtipuilla uuteaineiden määrä on suurempi kuin havupuulla. Esimerkiksi puun pihka koostuu näistä aineista. (Jensen 1977, Hakkila & Heiskanen 1978, Kärkkäinen 1971 & 2007, Sjöström 1978, Verkasalo 1988, Hakkila & Verkasalo 2009)

Haihtuvia aineita puussa on paljon. Tästä syystä se on pitkäliekkinen polttoaine ja vaatii suuren palotilan (Kytö et al. 1983). Kuvassa 4.1 on havainnollistettu puun koostumus.

Puun biomassan jakautuminen runkopuuhun, kuoreen, oksiin ja lehtiin (neulasiin) vaihtelee suuresti puulajin ja puun iän mukaan. Borealisella metsällä eli pohjoisella havumetsällä kannon ja juurien osuus on 30 % kuiva-aineena runkopuun osuudesta, 25 % kokopuusta ja 20 % kokopuusta mukaan lukien juuriston ja kannon. Korjattava kantopuun osuus on 20–24 % runkopuun massasta (Hakkila & Verkasalo 2009). Taulukossa 4.2 on kuvattu latvuksen osuus runkopuusta männyllä ja kuusella.



Kuva 4.1. Puun koostumus (Alakangas 2000).

Taulukko 4.1. Eri puulajien kemiallinen koostumus (Hakkila & Verkasalo 2009, Nurmi & Brännström 2014).

Puulaji	Kuiva-aineessa, p-%				
	Selluloosa	Hemiselluloosa	Ligniini	Uuteaineet	Muut aineet
Siperian lehtikuusi (<i>Larix sibirica</i>)	41,4	29,6	26,8	1,8	0,4
Kuusi (<i>Picea abies</i>)	41,7	28,3	27,4	1,7	0,9
Runkopuu	42,0 (1,2)	27,3 (1,6)	27,4 (0,7)	2,0 (0,6)	ei ilmoitettu
Kuori	26,6 (1,3)	9,2 (1,1)	11,8 (0,9)	32,1 (3,8)	
Oksat	29,0	30,0	22,8 (1,7)	16,4 (2,6)	
Neulaset	28,2	25,4	8,4 (2,1)	43,3 (2,3)	
Kanto	42,9	27,9	29,4 (1,8)	3,8 (0,2)	
Juuret	29,5	19,2	25,5	15,7	
Mänty (<i>Pinus sylvestris</i>)	40,0	28,5	27,7	3,5	0,3
Runkopuu	40,7 (0,7)	26,9 (0,6)	27,0 (0,0)	5,0 (1,0)	ei ilmoitettu
Kuori	22,2 (3,2)	8,1 (0,4)	13,1 (5,4)	25,2 (5,2)	
Oksat	32,0	32,0	21,5 (5,9)	6,9 (0,8)	
Neulaset	29,1	24,9	6,9 (0,8)	39,6 (1,3)	
Kanto	36,4	28,2	19,5	18,7	
Juuret	28,6	18,9	29,8	13,3	
Rauduskoivu (<i>Betula pendula</i>)	41,0	32,4	22,0	3,2	1,4
Hieskoivu (<i>Betula pubescens</i>)	43,9 (2,7)	28,9 (3,7)	20,2 (0,8)	3,8 (1,3)	ei ilmoitettu
Runkopuu	43,9 (2,7)	28,9 (3,7)	20,2 (0,8)	3,8 (1,3)	
Kuori	10,7 (0,3)	11,2 (0,5)	14,7 (3,9)	25,6 (1,1)	
Oksat	33,3	23,4	20,8 (3,9)	13,5 (3,0)	
Neulaset	ei ilm.	ei ilm.	11,1 (0,0)	33,0 (0,0)	
Kanto	29,5	19,4	13,4	4,7	
Juuret	26,0	17,1	27,1	13,5	

Suluissa on hajonnat.

Taulukko 4.2. Latvusmassan määrä suhteessa runkokuun määrään männylle ja kuuselle eri kehitysvaiheissa (Hakkila & Verkasalo 2009).

Puun kehitysvaihe	Mänty	Kuusi
	Latvuksen osuus, %	
Ensiharvennukset	57	78
Myöhempi harvennus	43	67
Päättehakkuu	45	75
Puu keskimäärin	54	79

Puun alkuaineostoitus muodostuu pääasiassa hiilestä, vedystä ja hapesta (taulukko 4.3). Näiden osuus puun kuiva-aineen massasta on noin 99 %. Typpipitoisuus on 0,5–2,3 % ja suurin typpipitoisuus on lepällä. Männyn ja kuusen typpipitoisuus on noin 0,05 %, koivun 0,08–0,1 %, haavan 0,06 % ja harmaalepän 0,19 %. Rikkiä puu sisältää yleensä alle 0,05 % (taulukko 4.3 ja 4.4). Eri puulajit poikkeavat alkuaineostumukseltaan vain vähän toisistaan (Moilanen et al. 1996, Laine & Sahrman 1985, Wilén et al. 1996, Nurmi 1993).

Energiasisältö riippuu polttoaineen kemiallisesta koostumuksesta eli sen hiili- ja vety-yhdisteisiin sitoutuneesta auringon energiasta. Mitä suurempi hiili- ja vetypitoisuus on, sitä suurempi on polttoaineen energiasisältö.

Taulukko 4.3. Eri puupolttoainelajien alkuainepitoisuuksia (Moilanen et al. 1996, Taipale 1996, Wilén et al. 1996, Tahvanainen 1995, Pesonen et al. 2014).

Puupolttoainelaji	Alkuaineostoitus, p-% kuiva-aineessa					
	C	H	N	O	S	Cl
Puu, yleensä	48–50	6,0–6,5	0,5–2,3	38–42	0,05	< 0,01
Kokopuuhiake, mänty	51,8	6,1	0,3	41,2**	0,01	0,0042
Metsätähdehiake	51,3	6,1	0,4	40,8**	0,02	0,0076
Havupuuhiake					0,02–0,045	0,011–0,031
Lehtipuuhiake					0,02–0,09	
Sahanpuru, mänty, kuoreton	51,0	6,0	0,08	42,8**	0	< 0,0050
Paju, kuorellinen (Salix mysinifolia)	47,8	5,7	0,2		0,03	0,005–0,022
Paju, kuoreton (Salix mysinifolia)	47,6	6,2	0,1		0,015	< 0,0005
Rusko-paju, kuorellinen (Salix schwerinii)	47,7	6,1	0,2		0,025	0,005–0,022
Rusko-paju, kuoreton (Salix schwerinii)	47,6	6,1	0,1		0,013	< 0,0005
Paju, kuorellinen (Klara)	47,5	6,0	0,1		0,027	
Paju, kuoreton (Klara)	47,4	6,0	0,2		0,016	
Paju	49,7	6,1	0,4	42,6**	0,03–0,05	0,0037
Männyn kuori*	52,5	5,7	0,4	39,7**	0,03	0,0085
	54,5	5,9	0,3	37,7		
Kuusen kuori*	49,9	5,9	0,4	41,4**	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. **Happi on laskettu erotuksena.

Taulukko 4.4. Havu- ja lehtipuiden eri osien kuiva-aineen rikkipitoisuuksia (Hakkila & Kalaja 1983).

HAVUPUU	Rikkipitoisuus, p-%	LEHTIPUU	Rikkipitoisuus, p-%
Runkopuu	0,0116	Runkopuu	0,0090
Runkopuun kuori	0,0343	Runkopuun kuori	0,0341
Oksat	0,0203	Oksat	0,0218
Neulaset	0,0673	Lehdet	0,0965
KOKO PUU	0,0236	KOKO PUU	0,0212

Taulukoissa 4.5 ja 4.6 käsitellään puupolttoaineen mineraali- ja raskasmetallipitoisuuksia.

Taulukko 4.5. Havu- ja lehtipuiden eri osien mineraalipitoisuuksia kuiva-aineessa (Hakkila & Kalaja 1983).

Puulaji/osa	Päämineraali, p-%				Hivenainepitoisuus, ppm (mg/kg)				
	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
Lehdet	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

1 ppm = 0,0001 %

Pajun raskasmetallipitoisuudet kuiva-aineessa (mg/kg) ovat seuraavat: As < 4, Cd 0,7–2,9, Cr < 2,5, Cu 2,5–3,8, Pb < 4, Zn 11–64 ja Ni < 1,5 (Pesonen et al. 2014).

Åbo Akademiassa on tutkittu eri puulajien ja puun osien tuhkaa muodostavien aineiden määrää (Werkelin 2008). Tutkimuksessa neljästä eri puulajista (kuusi, mänty, koivu ja haapa) sekä niiden osista (runko, kuori, oksa, latvat, verso, lehdet ja neulaset) analysoitiin tuhkaa muodostavien aineiden pitoisuuksia. Puut kaadettiin kesällä (140 näytettä) ja talvella (70 näytettä). Taulukossa 4.6 on tulokset 18 näytteestä.

Taulukko 4.6. Tuhkaa muodostavien aineiden pitoisuuksia kuiva-aineessa, mg/kg (Werkelin 2008).

Alkuaine/puulaji	Puuaines	Kuori	Oksat	Neulas	Versot	Lehdet	
Si	kuusi	59	171	982	6 640	300	
	mänty	123	60	312	549	747	
	koivu	77	114	69			318
	haapa	63	94	188			133
Al	kuusi	2	98	221	83	27	
	mänty	4	908	332	374	331	
	koivu	2	19	23			40
	haapa	6	20	35			20
Fe	kuusi	4	39	167	45	43	
	mänty	8	52	73	40	113	
	koivu	6	24	40			83
	haapa	5	27	35			56
Ca	kuusi	724	8 350	4 320	8 030	1 670	
	mänty	641	6 350	5 300	4 140	2 370	
	koivu	636	7 860	4 730			9 120
	haapa	998	11 700	10 400			9 800
Mg	kuusi	95	865	909	1 050	907	
	mänty	189	874	715	804	1 020	
	koivu	92	323	448			2 030
	haapa	286	1 370	644			2 940
Mn	kuusi	98	714	496	1 390	245	
	mänty	81	343	244	839	193	
	koivu	102	534	354			1 600
	haapa	49	256	183			667
Na	kuusi	6	26	97	48	13	
	mänty	15	22	40	28	36	
	koivu	4	14	43			32
	haapa	15	12	19			9
K	kuusi	215	2 030	3 560	4 270	14 600	
	mänty	407	3 180	3 040	4 770	8 790	
	koivu	315	1 710	3 020			9 420
	haapa	1 370	4 730	5 870			24 000
P	kuusi	4	452	1 080	1 540	3 830	
	mänty	41	1 260	848	1 270	2 590	
	koivu	49	428	820			3 140
	haapa	191	663	708			5 140
S	kuusi	50	367	776	704	1 320	
	mänty	94	311	587	845	1 250	
	koivu	82	329	493			1 690
	haapa	125	520	479			2 560
Cl	kuusi	51	260	317	504	1 090	
	mänty	85	147	200	407	538	
	koivu	40	149	120			181
	haapa	35	40	87			511

Puun tuhkapitoisuuksia on esitetty taulukossa 4.7. Kuorettoman runkopuun tuhkapitoisuus on tavallisesti 0,3–0,7 p-%. Puun epäorgaaninen aines esiintyy uuteaineina. Nuorten puiden tuhkapitoisuus on korkeampi kuin varttuneiden puiden. Lehtipuussa on enemmän tuhkaa kuin havupuussa. Puun tuhkan koostumuksia on taulukossa 4.8. Boreaalisen metsän eli pohjoisen havupuiden tuhkapitoisuus on pieni. Suomen neljän puulajin (koivu, mänty, kuusi, haapa) keskimääräinen tuhkapitoisuus on 0,46 % runkopuulle, 2,97 % kuorelle ja 1,52 % kuorellisille oksille ja 4,97 % lehdille. Puun tuhka ei sisällä klooria eikä typpeä, koska nämä ovat haihtuvissa aineissa ja poistuvat poltossa savukaasujen mukana. Tuhkan magnesiumium ja kalsium ovat hyviä neutralisointiaineita happamalle maaperälle. Puun tuhkan pääkomponentti on kalsium ja erityisesti kuoren tuhkassa on runsaasti kalsiumia. Puun tuhkapitoisuus on tavallisesti pienempi kuin muiden kiinteiden polttoaineiden, mikä helpottaa tuhkan käsittelyä ja pienentää tuhkan käsittelykustannuksia. (Kytö et al. 1983, Wilén et al. 1996.)

Taulukko 4.7. Puun tuhkapitoisuus kuiva-aineessa (Taipale 1996, Wilén et al. 1996, Tahvanainen 1995, Pesonen et al. 2014).

Puupolttoainelaji	Tuhkapitoisuus, p-%
Halko ja klapi/pilke	0,5 / 1,2
Kokopuuhake, mänty/Kokopuuhake, sekapuu	0,6 / 0,5
Koivuhake	0,4–0,6
Hakkuutähdehake	1,33
Hakkuutähdehake, kuusi	2,0–6,0
Kantohake	0,50
Pajuhake	0,44–1,39
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 4.8. Eräiden puupolttoaineiden tuhkan koostumus (p-%) pääkomponenttien oksideina (Taipale 1996, Kytö et al. 1983, Moilanen et al. 1996).

Puulaji	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Koivu*	57,8	11,5	7,7	7,7		3,8	3,8	7,7		
	46,0	15,0	14,9	11,6	1,3	2,6	0,9	8,6		
Mänty	42,0	15,2	1,0	16,0	5,5	4,5	4,6	3,0		
Kuusi	36,7	29,6	1,0	10,0	8,5	4,2	1,0	3,2		
Paju	30,8	26,5	4,8	5,1	0,2	2,1	0,4	0,3	0,3	0,02
Männyn kuori*	40,0	3,3	2,6	2,6	5,0	3,7	14,5	2,0		
	40,6	7,6	4,8	4,5	0,3	2,0	1,3	0,5	5,3	0,10
Kuusen kuori	50,5	3,5	2,6	4,2	1,8	1,6	21,7	2,8		
Koivun kuori	60,3	4,1	3,5	5,9	1,0	4,8	3,0	0,7		
Sahanpuru, mänty	41,8	12,3	5,2	11,8	1,9	1,9	8,3	0,2	2,0	0,10

* Lähteessä Kytö et al. 1983 on kahdet arvot.

Taulukko 4.9. Puun tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Wilén et al. 1996).

Polttoaine	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen, °C							
	Hapettava ilmakehä				Pelkistävä ilmakehä			
	DT	ST	HT	FT	DT	ST	HT	FT
Kokopuuhake, mänty	1 210	1 250	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

DT = Deformation Temperature = Muodonmuutospiste

ST = Sphere Temperature = Pehmenemispiste

HT = Hemisphere Temperature = Puolipallopiste

FT = Flow Temperature = Juoksevuuspiste

Puun tuhkan sintraantuminen alkaa 900–1 000 °C lämpötilassa (Solantausta & Asplund 1979). Muodonmuutospiste (DT) on eri lähteiden mukaan 1 150–1 490 °C, pehmenemispiste (ST) 1 180–1 550 °C, puolipallopiste (HT) 1 200–1 650 °C ja juoksevuuspiste (FT) 1 225–1 650 °C (Kytö et al. 1983, Wilén et al. 1996) (taulukko 4.9).

Taulukossa 4.10 on esimerkkejä puun ja pajun polton raskasmetalleista arina- ja lentotuhkassa.

Taulukko 4.10. Puun ja pajun poltossa syntyneiden tuhkien raskasmetallipitoisuudet (Taipale 1996, Pesonen et al. 2014).

Alkuaine	Puun polton tuhkassa, mg/kg		Pajun (2–4 vuotta vanha) polton tuhkassa, mg/kg
	Arinatuhka	Lentotuhka	
As, arseeni	0,2–3,0	1–60	< 20–40
Cd, kadmium	0,4–0,7	6–40	< 0,4
Co, koboltti	0–7	3–200	
Cr, kromi	60,0	40–250	< 2,5–8,9
Cu, kupari	15–300	200	< 2,5–14
Hg, elohopea	0–0,4	0–1	
Mn, mangaani	2 500–5 500	6 000–9 000	45–5 000
Ni, nikkeli	40–250	20–100	< 20–49
Pb, lyijy	15–60	40–1 000	< 20–40
Se, seleeni		5–15	
V, vanadiini	10–120	20–30	
Zn, sinkki	15–1 000	40–700	25–4 797

Tuoreen puun kosteus on yleensä 40–60 % (taulukot 4.11 ja 4.12). Kosteuteen vaikuttavat kasvupaikka, puulaji sekä puun ikä. Lisäksi kosteus vaihtelee puun eri osissa. Kasvavan lehtipuun kosteus vaihtelee vuodenajoin. Koivun kosteus on talvella 45 %, kun puu on lehdetön ja lepotilassa. Keväällä kosteus on 48 %, kun puu on lehdetön, mutta juuristo on aktiivisessa tilassa siirtämään vettä runkoon. Kosteus laskee kesällä 38 %:iin, kun lehtien haihdunta on suurimmillaan ja nousee jälleen syksyllä 45 %:iin, kun puu menettää lehdet. Havupuilla vaihtelu on vähäisempää (taulukko 4.11).

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. Huoneen lämmössä tämä kyllästymispiste on 24–32 % kosteudessa. Puun kosteus vaihtelee ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan. Kun puu saavuttaa vakaan kosteuden tietyissä olosuhteissa, puhutaan tasapainokosteudesta. Tasapainokosteus on ulkona katettuna 11–13 %, mutta sisällä lämmitetyssä rakennuksessa vain 4–8 %. Puuta kuivattaessa sen tilavuus kutistuu. Kutistuminen tilavuudesta laskettuna on 8–13 % havupuille ja 11–17 % lehtipuille, kun puu kuivuu tuoreesta uunikuivaksi. (Hakkila & Verkasalo 2009.)

Taulukko 4.11. 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 ns. rasikuivatus, jossa puut kaadetaan levälleen palstalle alkukesästä ja käytetään hyväksi lehtien ja neulasten haihdutuskykyä. Puut voidaan myös kerätä karsimattomina tai karsittuina kasoihin kuivumaan. Halot ja pilkkeet kuivuvat myös pinoissa. Tulisijoissa käytettävän polttoaineen kosteuden tulisi olla 15–20 %. Keskuslämmityskattiloissa hakkeen varastointikosteus ei saisi ylittää 25 % hakkeen säilyvyyden kannalta. Mikäli haketta käytetään alle 1 MW tehoisessa laitoksessa, ei polttoaineen kosteus saisi ylittää 40 % (Laine & Sahrman 1985, Linna et al. 1983, Linna & Järvinen 1983, Siltanen & Rantasalo 1984, Simola & Mäkelä 1976).

Kosteaa polttoainetta (kosteus jopa 50 %) voivat käyttää ne laitokset, joilla on savukaasunlauhdutin, jolloin savukaasujen sisältämä kosteus lauhdutetaan ja lämpöenergia otetaan talteen.

Kostean puun varastointi lisää kuiva-ainetappioita. INFRES projektin kokeissa (Routa et al. 2015, Erber et al. 2014) tutkittiin hakkuutähteiden ja rankojen kuiva-ainetappioita varastoinnin aikana. Kokeissa hakkuutähteiden kuiva-ainetappiot olivat 9–18 %, kun varastointiaika oli 9–12 kuukautta. Aikaisemmat ruotsalaiset tutkimukset osoittivat hakkuutähteille kuiva-ainetappioita 1–3 % kuukaudessa. Mäntyrangalle kuiva-ainetappiot olivat 5 %, kun varastointiaika oli 14 kuukautta. Keskimäärin kuiva-ainetappiot olivat alle 2,9 % kuukaudessa.

Taulukko 4.12. Puupolttoaineiden kosteuspitoisuuksia (Pellikka & Saviharju 1983, Immonen & Seppälä 1984, Taipale 1996, Tahvanainen 1995).

Puupolttoainelaji	Kosteus, p-%
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, tuore	60
Metsätähdehake, kuusi, tuore	50–57
Metsätähde, oksahake, tuore	50
Kantohake	35
Pajuhake	35–40
Hakkeen seulontajäte	50–55
Sahaustähde	5–10
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
Vaneritähde	35–50
Vanerin tasausreunat	5–10
KUITUPUUN KUORI	
Havupuu, kuiva kuljetus	
• kuiva kuorinta	40–50
• märkä kuorinta, puristamaton	60–70
• märkäkuorinta, puristettu	55–62
Havupuun märkäkuljetus tai varastointi vedessä	
• puristamaton	70–85
• puristettu	55–62
Koivupuu	
• märkä kuorinta, puristamaton	65–70
• märkä kuorinta, puristettu	55–62
• kuiva kuorinta	40–50
TUKKIPUUN KUORI, havupuu, kuivakäsittely	40–50
märkäkäsittely	60–80
TUKKIPUUN KUORI, 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 mänyllä oksien lämpöarvo on 19,99 MJ/kg ja rungon 19,55 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 4.13–4.15 havainnollistavat puun tehollisen lämpöarvon vaihteluja.

Taulukko 4.13. Puun eri osien teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa (MJ/kg) puulajeittain (Nurmi 1993 ja 2000).

Puulaji	Rungon puuaine	Kuori	Koko runko	Latvus	Lehdet/ neulas	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 4.14. Oksien ja latvusten eri osien tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg (Nurmi 1997).

Puulaji	Puuaines			Kuori				Lehdet/ neulas	Latvus ilman lehtiä/ neulasia	Latvus neulasineen
	> 5 mm	< 5 mm	Koko oksa	Sisäkuori	Ulko-kuori	< 5 mm	Koko kuori			
Mänty	20,01	19,96	19,99	19,28	20,36	31,39	20,30	21,04	20,09	20,33
Kuusi	19,36	19,23	19,30	17,87	20,77	20,27	19,60	19,19	19,41	19,33
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	
Harmaaleppä	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 4.15. Eri puupolttoainelajien tehollisia lämpöarvoja kuiva-aineessa (Pellikka & Saviharju 1993, Hakkila 1978, Laine & Sahrman 1985, Tahvanainen 1995, Taipale 1996, Wilén 1996, Pesonen et al. 2014).

Puupolttoainelaji	Puulaji	Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
Kuorellinen kuitupuu	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	16,2–18,9

Puun tiheys (kuiva-tuoretiheys) voi vaihdella kasvupaikan, geneettisen perimän ja iän mukaan, ja saman-kin lajin samalla paikalla kasvavien runkojen tiheyksissä saattaa olla eroja (taulukko 4.16). Haavan kuiva-tuoretiheys on 400 kg/m³ ja vastaavasti pihlajan 540, tammen 600, saarnin 590, vaahteran 550, katajan 510 kg/m³ (Kytö et al. 1983, Björklund 1984, Björklund & Ferm 1982, Hakkila et al. 1978, Tahvanainen 1995, Pesonen et al. 2014). Lisää kuiva-tuoretiheyksiä on esitetty taulukoissa 4.17 ja 4.18.

Taulukko 4.16. Kuiva-tuoretiheyksien vaihteluita eri puulajien eri osissa (Kytö et al. 1983).

Puulaji	Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³				
	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 4.17. Eri puutavaralajien keskimääräisiä kuiva-tuoretiheyksiä (Hakkila et al. 1978).

Puutavaralaji	Puulaji	Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³
Kuorellinen kuitupuu	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 4.18. Pajun kuiva-tuoretiheys, kosteusprosentti ja kuoriprosentti eri-ikäisillä vesoilla talvella (Hytönen & Ferm 1984, Pesonen et al. 2014).

Ikä vuosia	Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	Kosteus, %	Kuori, %
1	284	64	34
2	356	57	22
4	360	57	13
5	382	56	11
2-3	295–408 kokopuu 299–437 puuaines		

Puupolttoaineet voidaan luokitella eri luokkiin niiden laadun tai kauppanimikkeiden (hake, kuori, pilke, jalostetut puupolttoaineet, kuten pelletit, briketit ja puuhiili) tai niiden alkuperän mukaan, kuten esim. FAO:n metsäosasto luokittelee biopolttoaineet (FAO 2004).

- ”Ensiasteisia”: 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 putähteinä saatavia puupolttoaineita.
- ”Kierrätyspuupolttoaineet” (recovered wood fuels) ovat käytetyistä puutuotteista valmistettuja puupolttoaineita.

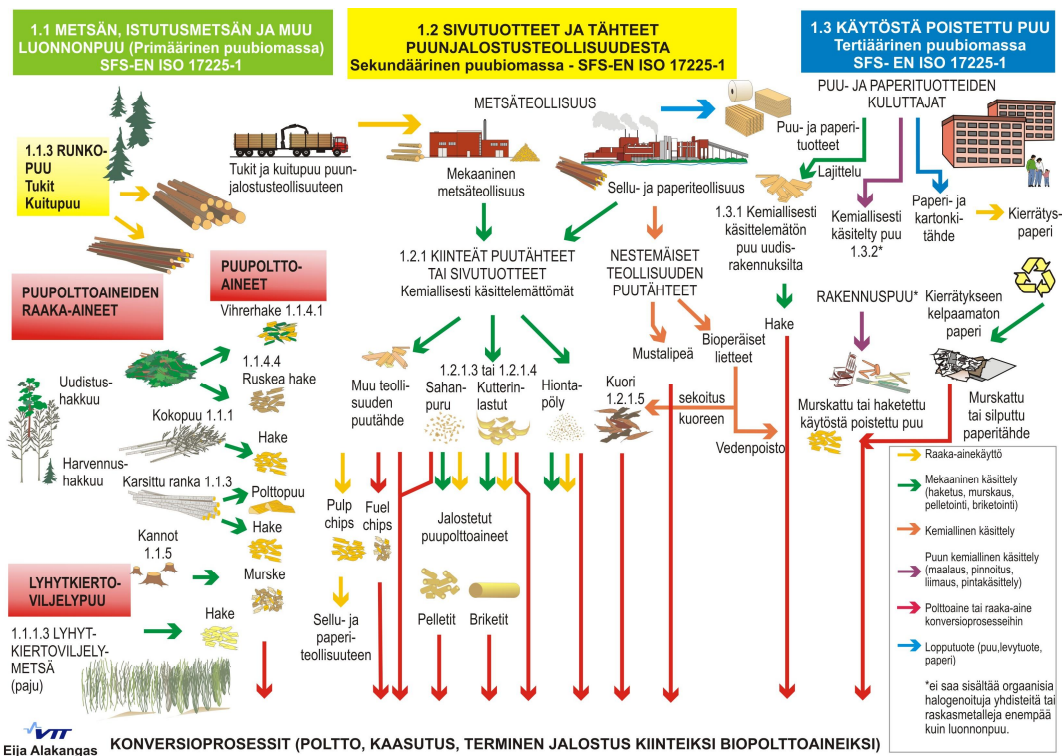
Kiinteiden biopolttoaineiden standardissa (SFS-EN ISO 17225-1:2014) puupolttoaineet (1 Woody biomass) luokitellaan seuraaviin alaluokkiin:

- 1.1 Luonnon- ja istutusmetsän puubiomassa sekä muu luonnonpuu
- 1.2 Puunjalostusteollisuuden sivutuotteet ja tähteet
- 1.3 Käytöstä poistettu puu tai puutuote.

Tässä julkaisussa puupolttoaineita käsitellään sekä raaka-aineen että laadun mukaan.

Kuvassa 4.2 on puupolttoaineiden luokittelu SFS-EN ISO 17225-1 -standardin mukaan ja alla on esimerkkejä tarkemmasta luokittelusta:

- Tuore hakkuutähde, kuusi – 1.1.4.2
- Kanto, kuusi – 1.1.5.2
- Ranka, lehti- ja havupuuseos (suurin osa lehtipuuta) – 1.1.3.1 & 1.1.3.2
- Sahanpuru, kuusi – 1.2.1.4
- Kutterinlastu, mänty – 1.2.1.4
- Kuori, kuusi – 1.2.1.5
- Kutterinlastu-, sahanpuru- ja kuorisekoitus – 50 til-% 1.2.1.4 (kutterinlastua) ja 50 til-% 1.2.1.5 (kuorta)



Kuva 4.2. Puupolttoaineiden luokittelu SFS-EN ISO 17225-1:n raaka-aineluokituksen mukaan. Kuva: VTT.

4.2 Hake ja murske

4.2.1 Yleistä hakkeesta ja murskeesta

Polttohake on hakkurilla kokopuusta, rangoista, metsätähteestä tai muusta puuaineksestä tehtyä polttoainetta. Murske valmistetaan joko siirrettävällä murskaimella tai voimalaitoksen murskaimella. Kokopuuhake valmistetaan karsimattomasta puusta ja rankahake karsituista rangoista. Hakkuutähde eli latvoista, oksista ja raivauspuusta tehdään hakkuutähdehakea ja kannoista kantohakea tai -mursketta. Sahan hake on sahauspuun sivutuotteena valmistettua hakea (Hakkila 1992).

Kannot, kierrätyspuu sekä vaneritähdeet murskataan. Kuvassa 4.3 on hakkeen ja murskeen palakoon eroja.

Suurin kestävä ainespuun hakkuumahdollisuus on lähes 73 miljoonaa m³ vuodessa ja energiapuun hakkuumahdollisuus 21 miljoonaa m³ vuodessa. Energiapuusta 7,8 miljoonaa m³ olisi oksia ja lehtiä, 6

miljoonaa m³ kantoja ja juuria sekä 7,2 miljoonaa m³ runkopuuta. Energiapuuhun lasketetusta runkopuusta 5,8 miljoonaa m³ on mitoiltaan ainespuun kokoista (Härkönen 2014).

Pöyryn ja Metsätehon selvityksessä arviot vuoden 2020 metsähakepotentiaalista kotimaan markkina-hakkuupotentiaaliksi tasoksi oletettiin 56,6 miljoonaa m³ ja maksimiskenaariossa 67,9 miljoonaa m³. Peruskenaariossa metsähakkeen teoreettinen korjuupotentiaali oli 105 TWh, teknis-ekologinen 43 TWh ja teknis-taloudellinen 27 TWh. Maksimiskenaariossa vastaavat potentiaalit olivat 115 TWh, 48 TWh ja 29 TWh. Pienpuun teknis-taloudellinen potentiaali oli 6,4–7,4 TWh, latvusmassalle 10,3–12,8 TWh ja kannoille 9,2–10,1 TWh (Kärhä et al. 2010).

Anttilan et al. 2014 arvioissa latvusmassan tekninen korjuupotentiaali on 6,6 miljoonaa m³ (13,2 TWh), jos ainespuun kertymä on puulajeittain ja uudistushakkuuala säilyvät vuosien 2008–2012 keskimääräisellä tasolla. Vastaava potentiaali kannoille on 7,1 miljoonaa m³ (14,2 TWh). Jos taas ainespuun hakkuut nousisivat suurimmalle kestäväälle tasolle, olisi latvusmassan potentiaali peräti 11,6 miljoonaa m³ (23,2 TWh) ja kantojen 12,0 miljoonaa m³ (24 TWh). Pienpuun korjuupotentiaali on 6,2–8,3 miljoonaa m³ (12,4–16,6 TWh) (Anttila et al. 2014).



Kuva 4.3. Hake ja murske. Kuva: VTT.

Haketta käytetään rakennusten lämmityskattiloissa, lämpölaitoksilla ja teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksilla. Kosteus onkin polttohakkeen tärkein laatuominaisuus ja hakepalan keskimääräinen tavoitepituus on tavallisesti 30–40 mm (palakoluokka P31 tai P45). Mursketta käytetään yleensä lämpölaitoksilla ja teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksilla.

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

Hakkeen palakoko on epäyhtenäinen, pienet palaset täyttävät suurten palojen välisiä tiloja kuormauksen ja kuljetuksen aikana. Kokopuuraaka-aineesta ja hakkuutähteestä tehdyssä hakkeessa on enemmän hienoainesta kuin esimerkiksi palakooltaan tasajakeisemmassa kuitupuuhakkeessa, joten polttohakkeen

tiiviyys on yleensä hieman suurempi. Jos hakkeeseen sekoitetaan sahanpurua, tiiviyys kasvaa merkittävästi. Mitä suurempi on hakepalasen pinnan lävistäjän suhde palan paksuuteen, sitä alhaisempi on hakkeen tiiviyys (Hakkila 2000).

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

Hakkurin torven läpi puhallettu hake tuottaa tiiviimmän kuorman kuin kuljettimelta, kippilavalta, etukuormaajan kauhasta tai sillosta 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 tilatiloja täyttyy pienemmillä paloilla, minkä seurauksena kuorma tiivistyy ja painuu. Painuminen riippuu lähtötiiviydestä, kuljetusmatkasta, tien tasaisuudesta sekä hakkeen mahdollisesta jäätymisestä kuormassa (Hakkila 2000).

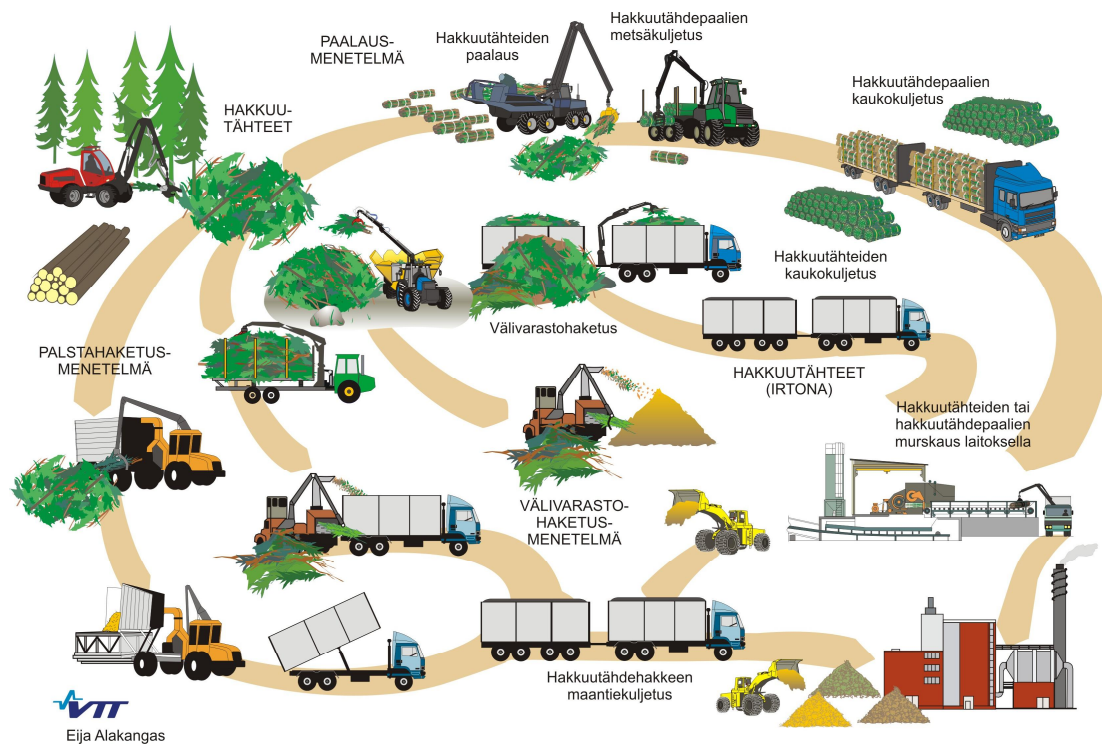
Painuminen on tuntuva heti matkan alussa, mutta tasaantuu jo 0–20 km matkan aikana. Milloin kuorman koon rajoitteena on pikemminkin hakkeen tilavuus kuin massa, lähtötiiviyden merkitys on kuljetustalouden kannalta tärkeämpi kuin lopputiiviyden. Lopputiiviyys kuitenkin ratkaisee mittaustuloksen, jos kuorma mitataan vastaanottopäässä kehysmitan mukaan. Eri tekijöiden vaikutus hakkeen tiiviyteen 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 (Alakangas & Impola 2014), joka perustuu eurooppalaisiin tai kansainvälisiin kiinteiden biopolttoaineiden standardeihin (liite A). Laatuohje määrittelee menettelyn, jota käyttäen puupolttoaineiden – polttihakkeen, purun ja kuoren – laatu ja energiamäärä voidaan ilmoittaa ja todeta yksikäsitteisesti ja tarkoituksenmukaisesti. Laatuohjetta ja puupolttoaineiden laatuluokitusta hyödynnetään ensisijaisesti puupolttoainekaupassa toimitussopimusten liitteenä. Muita laatuohjeen hyödyntäjiä ovat mm. laitos- ja laitesuunnittelijat sekä polttoaineen tuottajat. Laatuvarmuus tarkoittaa, että hake on palakooltaan ja kosteuspitoisuudeltaan haluttua laitospaikoista tuotetta: hakkeen joukossa ei saa olla kuintta (sammalta, humusainesta), kiviä tai metallia tai pitkiä tikkuja tai oksakeppejä (Impola 1995, Alakangas & Impola 2014).

4.2.2 Hakkuutähteet

Hakkuutähteet muodostavat käyttökelpoisen ja määrällisesti merkittävän raaka-ainelähteen puupolttoaineiden tuotannossa. Ainespuun hakkuuvaiheessa muodostuvan hakkuutähteen määrä ja koostumus vaihtelee hakkuukohteittain. Koivikoiden ensiharvennuksilla metsään jää hakkuutähteeksi lähinnä alle ainespuukokoisia latvoja ja niihin sitoutuneet oksat, ja kertymä on varsin pieni. Uudistushakkuukuusikoilla sen sijaan hakkuutähdekertymä on huomattavasti suurempi ja koostuu lähinnä oksista ja niihin sitoutuneista neulasista sekä jopa huomattavasta määrästä hylkypölkkyjä, mikäli hakkuukohteella on tyvilahoja runkoja. Päätehakkuukuusikoista saatavalla hakkuutähdehakkeella onkin metsähakkeista parhaat mahdollisuudet tuottaa lämpöenergiaa kilpailukykyiseen hintaan (Alakangas et al. 1999, Hakkila 2000, Hakkila & Alakangas 2000).

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 mutta ravinteet jäävät metsään (Alakangas et al. 1999, Hakkila 2000, Hakkila & Alakangas 2000). Suomessa hakkuutähteitä kuivatetaan yleensä palstalla ensin 2–6 viikkoa, jolloin suurin osa neulasista varisee palstalle (Routa et al. 2013).

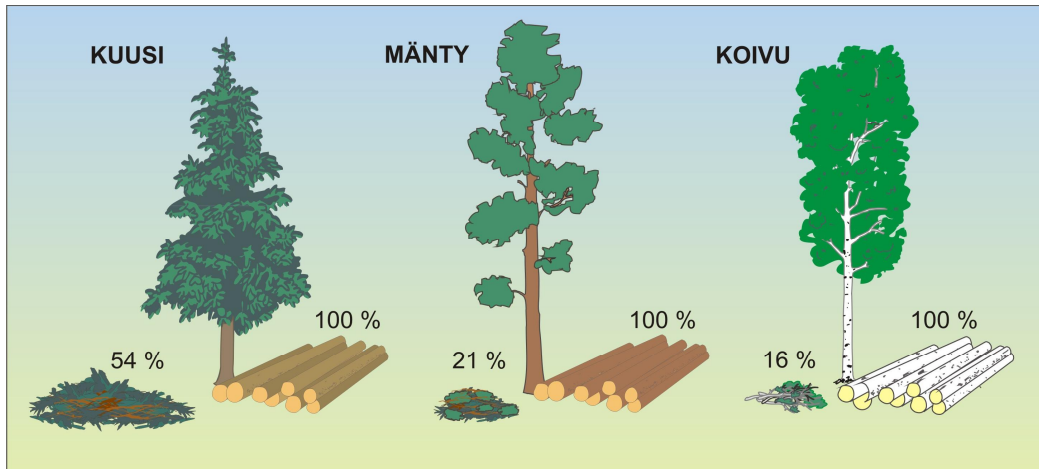


Kuva 4.4. Hakkuutähteen korjuumenetelmät. Kuva: VTT.

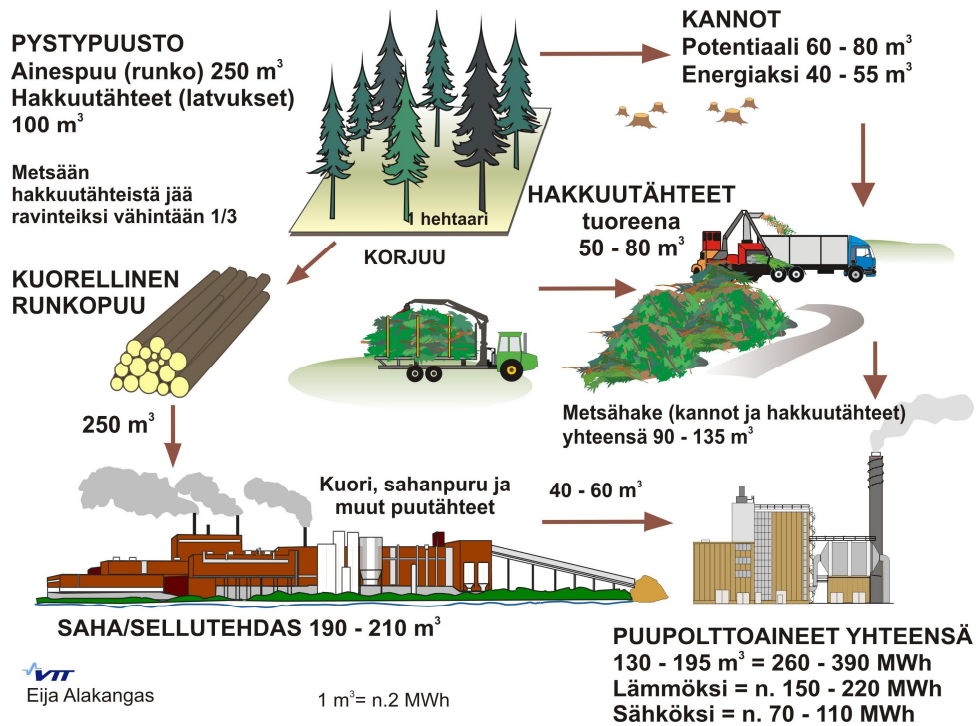
Suomessa yleisimmin käytetty hakkuutähteen korjuumenetelmä (lähes 76 %) on tienvarsihaketuksen perustuva tuotantomenetelmä (kuva 4.4). Menetelmässä hakkuutähteet kasataan palstalle ainespuun korjuun yhteydessä. Hakkuutähdekasat kuljetaan tienvarsi-varastoon, josta ne haketetaan suoraan hakeauton, joka vie ne laitokselle. Lisäksi hakkuutähteet voidaan hakettaa palstahakurilla tai monitoimihakurilla jo palstalla tai hakettaa käyttöpaikalle joko hakurilla tai murskaimella. Hakkuutähteet voidaan myös paalata ja muuten käytetään ainespuun korjuukalustoa. Hakkuutähteet paalataan noin 450–550 kg nippuihin, jolloin ne tiivistyvät. Niput kuljetetaan laitokselle ja murskataan. Paalauksen osuus hakkuutähteen korjuussa on pieni (Alakangas et al. 1999, Hakkila 2000).

Hakkuutähdettä korjataan 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 koiviköihin verrattuna (kuva 4.5). Järeämmästä puustosta muodostuvassa hakkuutähteessä on enemmän oksamateriaalia kuin pienemmistä puista muodostuvassa. Mikäli puusto on lahoa, kasvaa hakkuutähteeksi jäävien hylkypölkkyjen määrä merkittäväksi. Tyypilliselle kuusikon uudistushakkuualalle jää hakkuutähdettä Etelä-Suomessa noin 100 m³/ha, kun ainespuuta on korjattu 200–250 m³/ha. Talteen saatavan hakkuutähteen määrät vastaavat kuusikoissa yleensä 25–30 % hakkuualalta korjattavan runkopuun määrästä. Jokainen kiintokuutiometri runkopuuta päätehakkuilta tuottaa energiapotentialin latvusmassana 0,4 MWh männyllä ja 1,0 MWh kuusella (kuva 4.6). Kuvassa 4.6 hakkuutähteen määrä on suhteutettu runkopuun määrään.



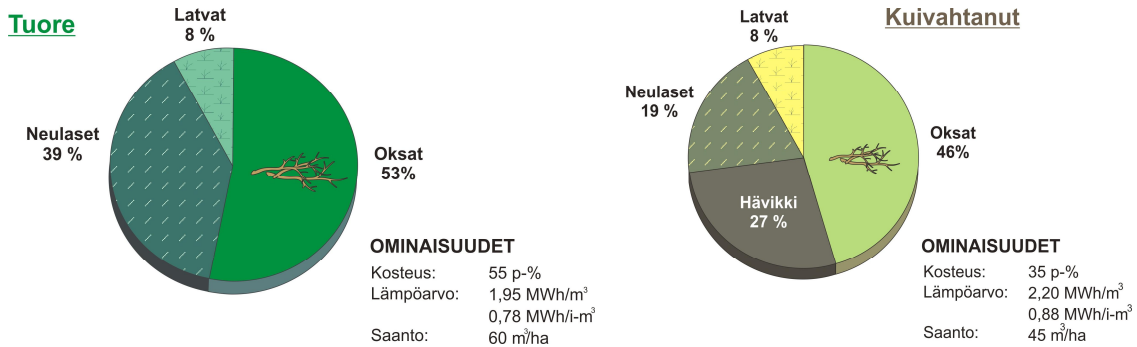
Kuva 4.5 Uudistuskypsen puuston biomassakertymät (latvusmassa/runkomassa, %) (Hakkila 1992).



Kuva 4.6. Kuusen päätehakkualalta keskimäärin hehtaarilta saatava ainespuun ja energiapuun määrä. Kuva: VTT.

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

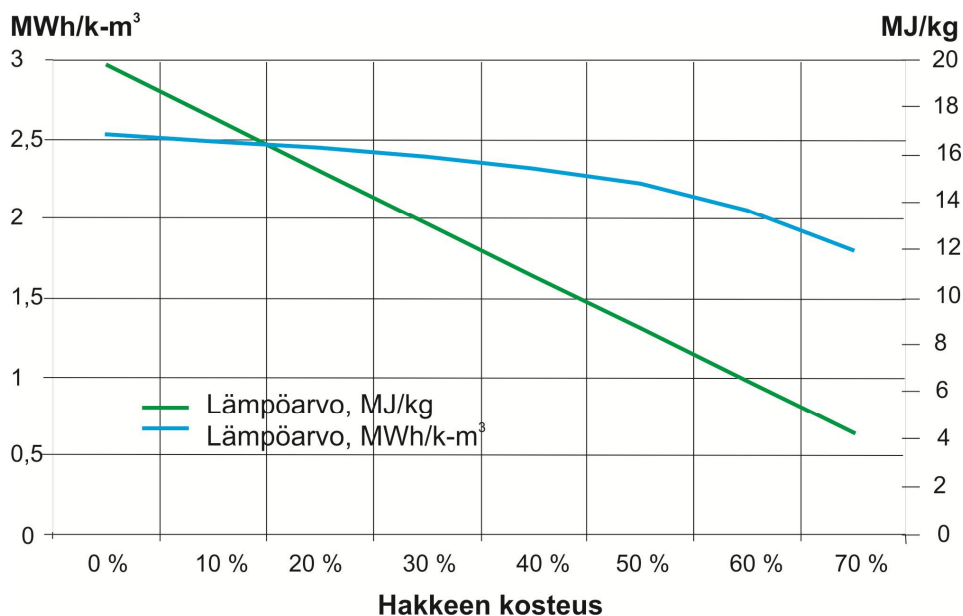
Kuvassa 4.7 on kuusihakkuutähteen koostumus tuoreena ja kuivahtaneena (Alakangas et al. 1999).



Kuva 4.7. Kuusihakkuutähteen koostumus tuoreena (vasen) ja kuivahtaneena (oikea). Kuva: VTT.

Hakkuutähtehakkeen 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 pienentyessä (kuva 4.7).

Lehdet tai neulaset ovat latvuksen pääkomponentti. Neulasten osuus on Etelä-Suomen pähakkumännnyissä 26 % ja kuusissa 39 %. Männyn neulasettoman oksamassan tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 20,09 MJ/kg ja kuusen 19,41 MJ/kg (ks. taulukot 4.13–4.14). 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. Lieneekin niin, että vaikka hakkuutähteen nettolämpöarvo alenee neulasten varisemisen, lahoamisen ja uuteaineiden vapautumisen kautta, pysyy kuiva-aineen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo samana, koska myös hiilen ja vedyn suhde pysyessä lähes samana varastoinnin aikana. Näin ollen vain kosteus on merkittävä tehollista lämpöarvoa säätelevä tekijä (Hakkila et al. 1995, Nurmi 1993 ja 1999).



Kuva 4.8. Hakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus hakkeen kosteudesta (MWh/k-m³ tai MJ/kg). Kuva: VTT.

Hakkeen irtokuutiometrin kuiva-ainesisältö vaihtelee huomattavasti. Siihen vaikuttavat puun kuiva-tuoretiheys sekä hakkeen tiiviys. Viheraineettoman kuusihakkuutähde hakkeen keskimääräinen kuiva-tuoretiheys on 465 kg/m³ ja viheraineen sisältävän kuusihakkuutähdehakkeen 425 kg/m³ (Hakkila 1985).

Hakkeen tiiviyteen vaikuttavat eniten hakkurin tekniset ominaisuudet: palakokojakauman tasaisuus, hakkurin puhallusvoima ja kuormaustapa. Myös hakkuutähteen kuivatusajalla ja kaukokuljetuksen aikana tapahtuvalla painumalla on merkitystä tiiviyslukuihin. Tiiviyttä (kiintotilavuusosuutta) tarvitaan muutettaessa irtomitat kiintomitoiksi esimerkiksi haketus- ja kuljetusmaksuja määritettäessä. Tiiviyslukuna on yleisesti käytetty arvoa 0,40, joka on käyttökelpoinen keskiarvoluku. Taulukossa 4.19 on hakkuutähdehakkeen tiiviyslukuja (Uusvaara & Verkasalo 1987, Hakkila 2000).

Taulukko 4.19. Hakkuutähdehakkeen tiiviyslukuja (m³/i-m³) eri vuodenaikoina (Verkasalo 1988).

Hakkurityyppi ja kuor-mausmenetelmä	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

Neulas- ja kuoriaineksesta puukapuloihin ja oksanpätkiin (taulukko 4.20). Palakokoon vaikuttavat hake-tettava raaka-aine, hakkuri tai murskain, hakkurin terien kunto sekä käytettävän seulan reikäkoko. Mitä enemmän runkopuuta haketettava raaka-aine sisältää, sitä tasaisempi hakkeen palakokojakauma on. Murskaimilla tehtävä hake on palakooltaan karkeampaa kuin hakkureilla tehtävä hake (Alakangas et al. 1999, Alakangas 2012). Taulukoissa 4.20 on merkitty palakoon laatuluokka (P) ja hienoaineksen (< 3,15 mm, F) laatuluokat.

Hakkuutähdehake on palakooltaan ja kosteudeltaan epähomogeenista. Palakoko vaihtelee purumaises-ta neulas- ja kuoriaineksesta puukapuloihin ja oksanpätkiin (taulukko 4.20). Palakokoon vaikuttavat hake-tettava raaka-aine, hakkuri tai murskain, hakkurin terien kunto sekä käytettävän seulan reikäkoko. Mitä enemmän runkopuuta haketettava raaka-aine sisältää, sitä tasaisempi hakkeen palakokojakauma on. Murskaimilla tehtävä hake on palakooltaan karkeampaa kuin hakkureilla tehtävä hake (Alakangas et al. 1999, Alakangas 2012). Taulukoissa 4.20 on merkitty palakoon laatuluokka (P) ja hienoaineksen (< 3,15 mm, F) laatuluokat.

Taulukko 4.20a. Hakkuutähdehakkeen palakokoanalyysistä, seulalle jäänyt massa, p-% (Alakangas 2012).

Seula, mm	Tuore hakkuutähde, seulalle jäänyt massa, p-%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
< 3,15	19,5	25,6	33,7	28,3	32,8	24,2	25,1	6,9	6,0
3,15-8	11,2	21,4	18	21,6	24,4	34,2	27,9	22,8	19,6
8-16	12,0	18,8	22	26	21,8	29,8	24,4	8,9	19,2
16-31,5	13,4	25,7	17,2	17,2	12,8	8,3	16,8	7,5	39,6
31,5-45	10,5	4,8	2,9	1,7	4,7	0,7	3,4	4	8,6
45-63	6,3	3,7	1,7	5,2	0	2,8	2,3	1,2	5,1
63-100	1,9	0,1	4,6	0,0	4,1	0	0,1	48,7	2,8
> 100	25,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Laatu	Ei	F30 P31	F30+ P63	F30 P31	F30+ P31	F25 P31	F30 P31	F10 P63	F10 P31

Ei = Ei voitu antaa laatuluokkaa, koska hake ei täytä minkään P-luokan vaatimusta. Laatuvaatimukset julkaisussa Alakangas & Impola 2014.

Taulukko 4.20b. Hakkuutähdehakkeen palakokoanalyysistä, seulalle jäänyt massa, p-% (Alakangas 2012).

Seula, mm	Kuivunut hakkuutähde				Paalit	
	1	2	3	4	1	2
< 3,15	30,5	41,9	20,4	22,2	20,7	30,0
3,15–8	18,1	30,9	31,4	32,6	11,8	17,6
8–16	23,1	17,8	31,3	29,7	12	12,3
16–31,5	0	0	0	0	21,3	10,5
31,5–45	26,4	7,8	16,1	15	8,4	7,4
45–63	0	0,2	0,4	0,4	15,2	0,0
63–100	1,8	1,5	0,5	0	1,7	0,1
> 100	0,0	0,0	0,0	0,0	8,8	22,2
Laatu	F30,5; P45	Ei	F25, P16	F25, P16	F25, P63	Ei

Ei = Ei voitu antaa laatuluokkaa, koska hake ei täytä minkään P-luokan vaatimusta. Laatuvaatimukset julkaisussa Alakangas & Impola 2014.

Tuoreen hakkuutähdehakeen kosteus on 50–60 p-% koko hakemäärän massasta. Hakkuutähdehakeesta tuotettavan hakeen kosteus on kuitenkin 25–65 %. Kosteuteen vaikuttaa mm. vuodenaika ja varastointi. Kesäaikana voidaan päästä alle 30 % kosteuksiin, kun hakeen raaka-aine kuivuu palstalla, mutta vastaavasti talvella kosteudet saattavat nousta jopa 65 %, kun hakeen joukkoon joutuu lunta ja jäätä (kuvat 4.9 ja 4.10). Kosteus vaikuttaa merkittävästi hakeen energiatihyyteen. Käytännössä hakkuutähdehakeen energiatihyys on 0,6–1,0 MWh/i-m³ (Alakangas et al. 1999, Hakmila et al. 1998, Uusvaara 1984).

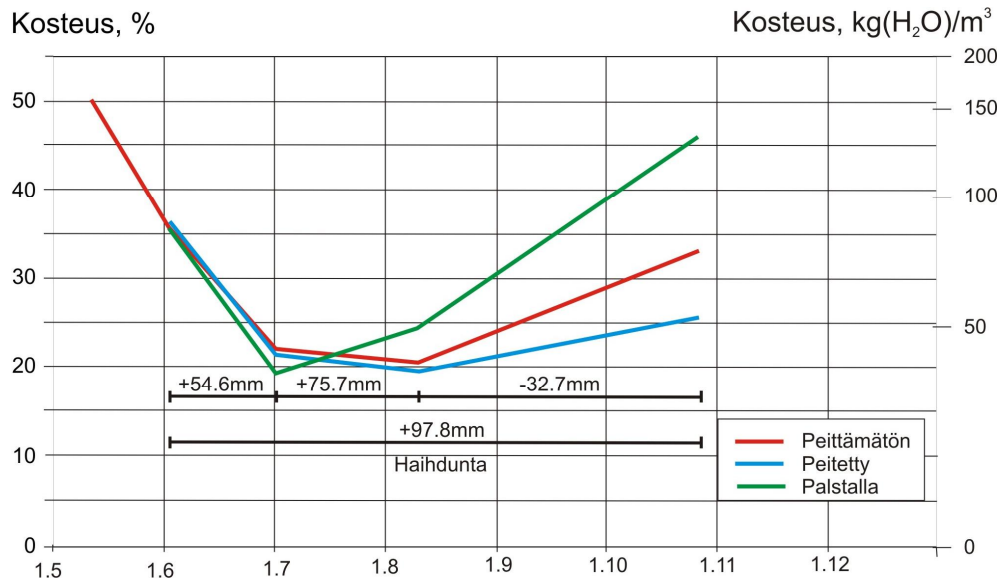
Varastokasojen peittäminen tähän tarkoitukseen suunnitellulla paperilla on varsin yleistä. Paperi suojaa kasaa kastumiselta, joten haketus voidaan tehdä huonojenkin sääolosuhteiden aikana. Paperi voidaan haketta hakkuutähdehakeen joukkoon, joten se ei jää varastopaikalle. Kuvassa 4.9 on esimerkki VTT:n tutkimuksista hakkuutähdehakeen kosteudesta palstalla, peitetyssä ja peittämättömässä aumassa. Kosteus on ilmoitettu sekä painoprosentteina että kg(H₂O)/i-m³. Tulosten perusteella peitetyissä kasoissa hakkuutähdehakeen kosteus oli 7–10 %-yksikköä alhaisempi kuin peittämättömissä kasoissa. Hakkuutähdehakeen kuivuminen oli VTT:n tutkimusten mukaan tehokkainta varastojakson alussa, jolloin hakkuutähdehakeet kuivuivat 14–20 %-yksikköä ensimmäisen kahden kuukauden aikana. Tänä aikana haihdunta oli yli 100 mm suurempi kuin sademäärä. Lokakuussa kosteudet alkoivat kohota sateiden takia (Hillebrand & Nurmi 2000, Raitila et al. 2010 kuva 4.9).

Haketta ei pitäisi varastoida pienissä (< 200 i-m³) varastokasoissa taivasalla muuta kuin lyhytaikaisesti, sillä ne voivat kastua sateen vaikutuksesta läpikotaisin. Suhteellisen kuivaa (< 30 p-%) haketta sen sijaan voi varastoida koko lämmityskaudeksi, mikäli se voidaan sijoittaa katettuun varastoon (Raitila et al. 2010 Röser et al. 2010).

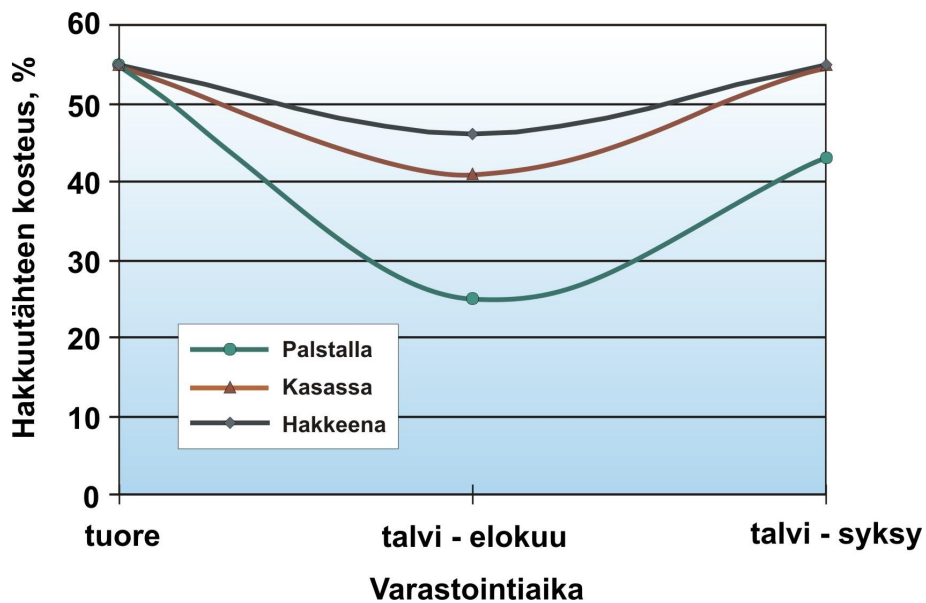
Eri lämpö- ja voimalaitosten polttoaineen vastaanotto-, kuljetin- ja polttolaitteet poikkeavat toisistaan. Tämän takia käyttöpaikka asettaa hakkeelle tietyt laatuvaatimukset, joista tärkeimmät ovat kosteus ja palakokojakauma. Mikäli hakkeessa on pitkiä tikkuja, ne saattavat aiheuttaa käsittelylaitteissa holvaantumista ja tukkeutumista. Tasalaatuisen, suhteellisen hienojakoisen hakkuutähdehakeen 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 jäätymä tai holvaantua silloissa 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 jäätmisvaaraa (Impola 1995).



Kuva 4.9. Hakkuutähteen kosteus palstalla, peittämättömässä ja peitettyssä aumassa (janalla on merkitty haihdunta – sademäärä, mm). Lähde: Hillebrand & Nurmi 2000. Kuva: VTT.



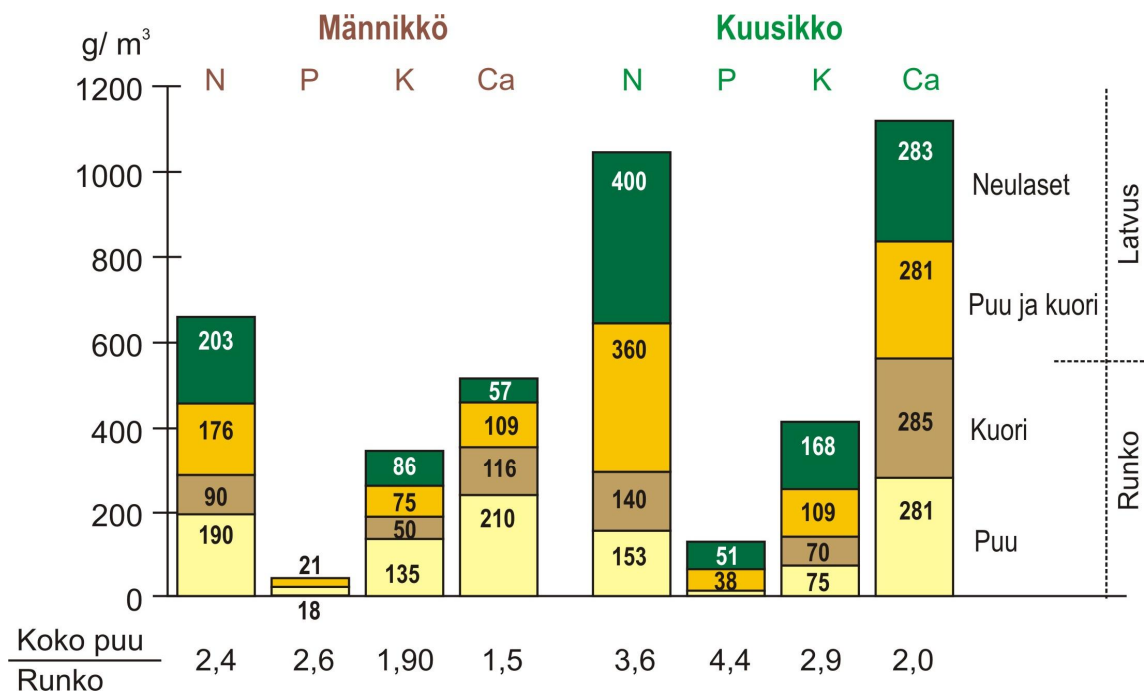
Kuva 4.10. Hakkuutähteen kosteus palstalla, kasassa ja hakkeena. Kuva: VTT.

Kuusen rungon ja oksien puuaineen tuhkapitoisuus on 0,30–0,63 % kuiva-aineesta. 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).

Tuhkan sulamiskäyttäytymisellä on merkitystä erityisesti sellaisissa polttotekniikoissa, joissa tuhkan sulaminen voi estää esim. palamisilman kulkeutumista. Myös tuhkan pehmenemisestä aiheutuvan kattilan likaantumisen estämiseksi on hyödyllistä tuntea tuhkan sulamiskäyttäytymisen. Sulamiskäyttäytymiseen vaikuttavat tuhkan koostumus, polttolaitteet ja poltto-olot. Vaikka metsätähdehakkeen pehmenislämpötila on korkea, voi puupolttoaineilla sintraantuminen eli tuhkahiukkasten yhteen tarttuminen alkaa jo huomattavasti alhaisemmissa lämpötiloissa.

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

Ravinneaineisiin sisältyy myös kloori (Cl), joka voi aiheuttaa kuumakorrosiota höyrykattiloiden tulistimissa. Pienempitehoisissa kattiloissa tätä ongelmaa ei esiinny, koska lämpötilat jäävät alhaiseksi. Polton kannalta olisi eduksi, jos metsähakkeen neulas- tai lehtiaines irtoaa, jolloin kloori- ja kaliumpitoisuudet vähenevät paljon viherainetta sisältävään hakkeeseen verrattuna. Kuorelliseen runkopuuhun verrattuna esimerkiksi kuusen neulasten typpi-, kalium-, fosfori- ja kalsiumpitoisuudet ovat moninkertaisia kuivamassayksikköä kohden. Kuusen neulasten natriumpitoisuus on 0,020–0,040 % ja kloorin < 0,4 %. Männyn neulasten natriumpitoisuus on hyvin pieni ja klooripitoisuus < 0,2 %. Kuvassa 4.11 on esitetty päätehakkuvaiheen männikön ja kuusikon biomassaosien sisältämät ravinteet.



Kuva 4.11 Päätehakkuvaiheen männikön ja kuusikon biomassaosien sisältämät ravinteet (g/m³) lasketuina rungon kuorellista kuutiometriä kohti (Mälkönen 1974 & 1977).

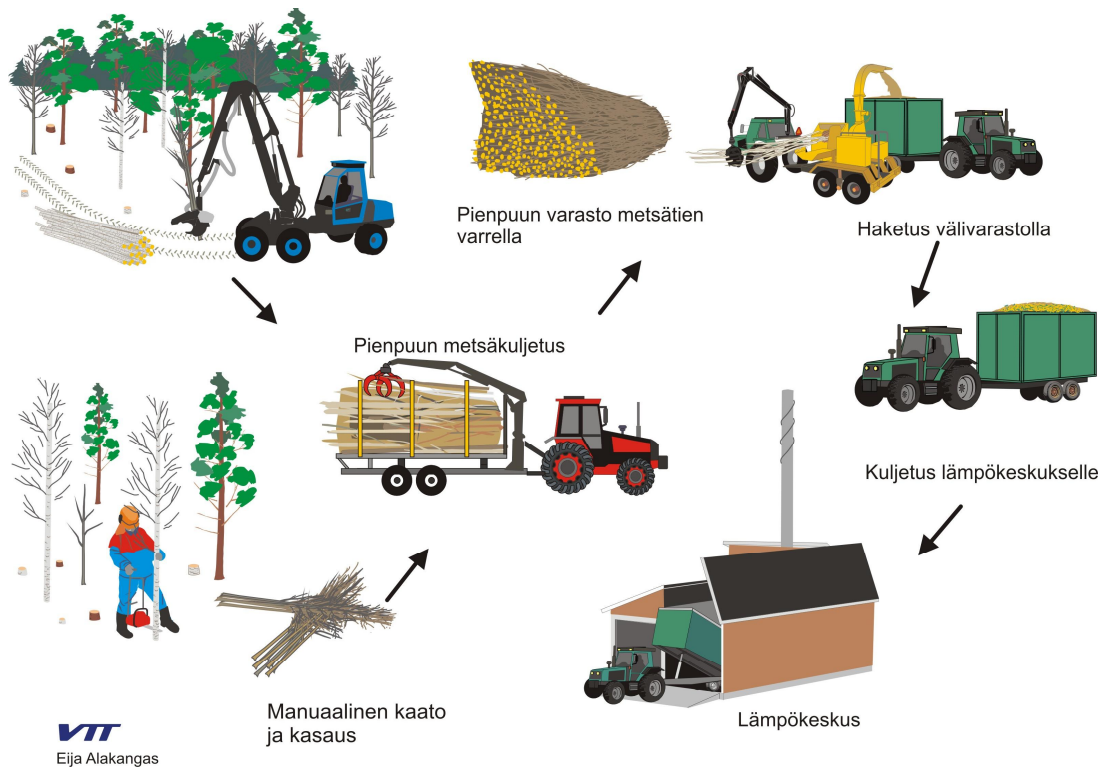
4.2.3 Kokopuu- ja rankahake

Kokopuuhaketta käytetään pienemmissä lämpökeskuksissa sekä koti- ja maatalouden lämpökattiloissa. Hake valmistetaan karsimattomista rangoista, jotka ovat joko hukkarunkopuuta tai teollisuudelle kelpaamattonta pienpuuta (mm. vajaatuottoiset metsät, taimikot, ensiharvennukset). Rankahake valmistetaan karsitusta runkopuusta, ja se on selvästi suurin pienpuuhakkeen lähde. Runkohukkapuu sisältää yleensä kor-

juussa ja metsänhoitotöiden yhteydessä metsään käyttämättä jäävän runkopuun kuorineen. Kokopuuhaaketta käytetään tällä hetkellä eniten kiinteistöjen lämmitykseen sekä pienemmissä kaukolämpökeskuksissa, joissa polttoaineen laatuvaatimukset ovat tiukemmat kuin suuremmissa laitoksissa. Kiinteistöjen polttoaineilla hakkeen kosteuden on oltava alhaisempi (alle 35 %) ja palakoon tasaisempi kuin lämpölaitoksissa. Myös käytetty energiantuotantotekniikka asettaa rajoituksia palakoolle, esim. pienet kaasutuslaitokset. Kokopuuhaaketta tuotetaan joukkokäsittelynä ja manuaalisin menetelmin, jossa metsuri katkoo ja kasaa pienpuut ns. siirtelykaatomenetelmällä (kuva 4.12). Pienpuut haketetaan pääsääntöisesti (66 %) tienvarrella.

Tuottavuuden ja työn ergonomian parantamiseksi apuna käytetään kaatohävää, johon moottorisaha kiinnitetään. Katkotut pienpuut kasataan ajouran tuntumaan ja varastoidaan rankakasoissa, joista ne haketetaan ja kuljetaan käyttäjälle. Koneellisessa korjuussa käytetään joukkokäsittelyä, jolloin usea puu korjataan samaan nippuun ennen palstalle sijoittamista (kuva 4.12).

Taulukoihin 4.21–4.24 on koottu keskeisiä ominaisuuksia pienpuun lämpöarvoista, alkuaineista sekä tuhkapitoisuuksista. Kokopuuhaakkeen ominaisuuksia on tutkittu eniten ensiharvennuskannikoilla (taulukot 4.25–4.27), ja taulukoissa 4.28–4.31 on kokopuun hakkeen tiiviyslukuihin vaikuttavia tekijöitä, palakokoja-kaumia sekä hakkeen liukumiskulmia ja kitkakertoimia.



Kuva 4.12. Kokopuu- tai rankahakkeen korjuu. Kuva: VTT.

Taulukko 4.21. 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 4.22. Pieniläpimittaisten puiden eri osien alkuainepitoisuuksia kuiva-aineessa (Nurmi 1993).

ALKUAINE/ PUULAJI	PUU			SISÄKUORI		ULKOKUORI		KUORI	Neulaset/ lehdet
	Runko	Oksat		Runko	Oksat	Runko	Oksat		
		> 5 mm	< 5 mm		> 5 mm		> 5 mm		
HIILIPITOISUUS, 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, 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, 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

Taulukko 4.23. Puhtaan tuhkan määrä vastakaadetusta pienpuusta tehdyssä polttohakkeessa (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/ neulasitta	0,79	1,08	1,09	0,80	1,25
Kokopuu lehtineen/ neulasineen	0,98	1,25	1,30	0,86	1,56

Taulukko 4.24. Tuhkapitoisuus pienpuiden eri osien kuiva-aineessa (Voipio & Laakso 1992).

Puulaji	Runko 20 %			Runko 80 %			Oksat > 5 mm			Oksat < 5 mm		Neulaset/Lehdet
	Puu	Sisäkuori	Ulko-kuori	Puu	Sisäkuori	Ulko-kuori	Puu	Sisäkuori	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

Taulukko 4.25. Ensiharvennumännyn eri osien tehollinen lämpöarvo ja tuhkapitoisuus (Hakkila et al. 1995, Nurmi 1993).

Puun osa	Tehollinen lämpöarvo			Tuhka	
	Kuiva-aineessa, MJ/kg	40 % kosteudessa, MWh/m ³	50 % kosteudessa, MWh/m ³	% kuiva-aineessa	kg/m ³ puuta
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	21,00	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 4.26. Etelä-Suomen ensiharvennuskannan eri osien keskimääräiset massaosuudet ja kuiva-tuoretiheydet (Hakkila et al. 1995).

Puun osa	Massaosuus, %	Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³
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
Neulas	7,5	373
Elävä latvus	22,1	379
Kuolleet oksat	5,9	424
Koko latvus	28,0	388
Koko puu	128,0	379

Taulukko 4.27. Etelä-Suomen ensiharvennuskannan runkopuun keskimääräisiä ominaisuuksia pysty-puustossa (Hakkila et al. 1995).

Ominaisuus	Koko runko	Runko		Latvan hukkapuu, cm		
		> 6 cm	> 8 cm	6-8	4-6	1-4
KUOREN MÄÄRÄ						
Paksuus, mm	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
Kuiva-ainemassan osuus, %	10,1	9,8	9,8	10,5	13,9	21,4
KUIVA-TUORETIHEYS, kg/m³						
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, p-%						
Kosteus	59	58	58	61	62	63
Kosteussuhde (U)	141	140	138	158	164	170
KOOSTUMUS, kg/m³						
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/i-m³, 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/m³						
	2,3	2,3	2,3	2,3	2,5	2,9

Taulukko 4.28. Kokopuuhakkeen tiiviyslukuja (kiintotilavuusosuuksia) (Uusvaara & Verkasalo 1987).

Hakelaji	Laikkahakkuri, takaa puhaltava Kesä / Talvi	Laikkahakkuri, päältä puhaltava Kesä / Talvi	Laikkahakkuri, kippaava Kesä / Talvi	Rumpuhakkuri, päältä puhaltava Kesä / Talvi	Rumpuhakkuri, kippaava 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 4.29. Kokopuuhakkeen palakokojakaumia (Alakangas 2012).

Seula, mm	Seulalle jäänyt massa, p-%											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
< 3,15	2,8	8,1	45,6	23,5	6,2	17,9	8,9	10,8	5,1	8,8	10,8	16,1
3,15-8	3,6	11,0	22,9	25,9	13,0	22,5	11,7	13,0	12,7	21,2	21,4	18,5
8-16	27,8	14,4	17,7	23,9	30,1	31,5	25,7	22,8	26,9	38,7	32,3	28,2
16-31,5	40,8	19,3	10,1	13,8	37,2	22,5	39,4	40,0	38,4	0	35,6	0
31,5-45	12,8	12,4	1,2	2,7	9,3	5,5	13,3	8,2	13,3	31,3	0	31,1
45-63	5,8	25,4	0	1,9	3,0	0	0,9	5,1	3,5	0	0	3,4
> 63	0	9,5	2,5	0,3	1,3	0	0	0	0,1	0	0	2,8
> 100	0	0	0	8,1								
Laatu	F05, P31	F10, P63	Ei	F25, P31	F10, P31	F20, P31	F10, P31	F15, P45	F10, P31	F10, P45	F15, P31	F20, P45

Taulukko 4.30a. Karsitun rankahakkeen palakokojakaumia (näytteet 1–12) (Alakangas 2012, Laitila & Routa 2015).

Seulat, mm	Seulalle jäänyt massa, p-%											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
< 3,15	11,9	2,1	8,4	2,8	6,3	3,8	5,0	9,13	6,4	6,8	5,8	5,0
3,15-8	26,8	7,3	13,6	3,6	9,9	15,5	14,6	20,2	16,4	22,2	20,1	17,1
8-16	30,1	27,4	46,2	27,8	4,4	14,1	17,4	19,8	10,4	14,8	15,75	7,7
16-31,5	22,7	44,5	18,2	40,8	73,8	62,3	54,9	47,2	62,5	52,5	51,4	62,7
31,5-45	2,5	10,8	18,2	12,8	3,3	2,3	5,1	2,9	1,9	3,7	4,45	5,6
45-63	2,3	6,1	5,1	5,8	1,4	2,0	2,7	0,9	2,4	0	2,5	1,9
> 63	3,7	1,7	8,5	0	0,8	0	0,4	0,0	0	0	0	0
> 100	0	0	17,8									
Luokka	F15, P31	F05, P31	Ei	P05, P31	F10, P31	F05, P31	F05, P31	F10, P31	F10, P31	F10, P31	F10, P31	F05, P31

Ei = Ei täytä hakkeen palakoon laatuvaatimusta. Laatuvaatimukset julkaisussa Alakangas & Impola 2014.

Taulukko 4.30b. Karsitun rankahakkeen palakokojakaumia (näytteet 13–23) (Alakangas 2012, Laitila & Routa 2015).

Seulat, mm	Seulalle jäänyt massa, p-%										
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
< 3,15	4,2	5,1	5,4	6,5	4,6	5,4	5,0	5,5	6,2	6,9	9,7
3,15-8	9,3	12,9	11,6	16,9	13,9	17,7	16,5	13,9	11,5	11,7	16,7
8-16	5,7	5,3	6,0	21,9	5,8	5,8	13,1	6,0	29,1	28,4	31,7
16-31,5	69,0	72,6	67,5	48,8	69,8	65,2	55,2	66,6	40,1	42,1	36,4
31,5-45	8,5	3,9	8,5	5,7	5,5	4,5	5,6	8,1	8,7	10,8	5,7
45-63	3,3	0,3	1,1	0,2	0,4	1,3	2,8	0	1,0	0,2	0
> 63	0	0	0	0	0	0	1,8	0	1,0	0,2	0
> 100	0	0	0	0	0	0	0	0	3,4	0	0
Luokka	F05, P31	F10, P31	F10, P31	F10, P31	F05, P31	F10, P31	F05, P31	F10, P31	F10, P31	F10, P31	F10, P31

Ei = Ei täytä hakkeen palakoon laatuvaatimusta. Laatuvaatimukset julkaisussa Alakangas & Impola 2014.

Taulukko 4.31. Kokopuuhakkeen 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

4.3 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. Metsään jäävän kuoren määräksi on arvioitu noin 1 miljoona m³ (Hakkila et al. 1995, Leino 1975, Impola et al. 2000).

Koska kuorella on huomattavia määriä ligniiniä, sen lämpöarvo on korkea ja lähes sama rungon eri korkeuksilla. Sen sijaan eri puulajien kuorten lämpöarvot vaihtelevat huomattavasti siten, että lehtipuilla ne 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 kuorella kuin oksien kuorella. Lämpöarvo vaihtelee myös puulajeittain ja puun koon mukaan. Vaihtelu on suurempi pienpuussa kuin rungossa. Ensiharvennuskannan kuoren kuiva-aineen lämpöarvo on tuoreena 1,2 MWh/m³ ja 40 % kos-

teudessa 1,3 MWh/m³ alhaisen kuiva-tuoretiheyden vuoksi. Myös kasvupaikalla on vaikutusta kuoren lämpöarvoon (Nurmi 1993 ja 2000, Hakkila et al. 1995).

Käytännössä korkeat kosteus- ja tuhkapitoisuudet heikentävät huomattavasti kuoren polttoaineominaisuuksia. Puun kuorta käytetään yleensä metsäteollisuuslaitosten ja lämpökeskusten kattiloiden polttoaineena. Puunjalostusteollisuuden sivutuotteena syntyvästä kuoresta suurin osa on havupuiden kuorta. Kuoren käsittelyn kannalta ongelmallista on kuoren epähomogeenisuus ja lisäksi polttoaineseoksissa kuori voi aiheuttaa ongelmia polttoaineen 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 seulonnessa kannattaa suuret kappaleet erottaa tarkemmin alitteesta ja pienet ylitteestä, siten vältetään suurten kappaleiden aiheuttamat ongelmat puristuksessa. Saavutettava kuiva-ainepitoisuustaso riippuu sekä kuoren lämpötilasta että sen partikkelikoosta. Lämpökuivaus on harvinaisempi ja vaatii suuria laitoksia. Lämpökuivaukseen käytetään halpaa jätelämpöä tai savukaasuja. Luvun 4.1 taulukoissa sekä taulukoissa 4.32–4.35 on lisää 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.)

Taulukko 4.32. Tyypillisiä kuoren analyysijä, % kuiva-aineessa (Leino 1975).

Kuori	Hiili, C	Vety, H	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 4.33. Eräiden puulajien kuoren kuiva-tuoretiheys, kg/m³ (Kärkkäinen 1985).

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

Taulukko 4.34. Kuoren tuhkan sulamiskäyttäytyminen, °C (Leino 1975).

Kuori	Yhteensulautuminen alkaa	Pehmenemis-lämpötila	Puolipallo-lämpötila	Juoksevuus-lämpötila
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 4.35. Eri puulajien kuoren tuhkapitoisuus kuiva-aineessa sekä tuhkan alkuainekoostumus, p-% (Raiko et al. 2002, Alakangas 2000).

Puulaji	Tuhka	SiO ₂	Fe ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Mänty	1,8	14,5	3,8	2,7	40,0	5,1	2,1	3,4	3,7
Kuusi	3,4	21,7	1,8	2,7	50,5	4,2	2,8	3,5	1,6
Koivu	1,6	3,0	1,0	3,0	60,3	5,9	0,7	4,1	4,8
Tammi	1,5	11,1	3,3		64,5	1,2	8,9	0,2	

Kantoja joutuu turpeen joukkoon tai niitä joudutaan poistamaan esim. tie- ja rakennustyömailta. Kantoja korjataan myös päätehakkuiden jälkeen energiantuotantoon (kuva 4.13). Kannot ovat sitkeitä hakettaa ja ne yleensä murskataan. Kannot voidaan murskata joko terminaalissa (45 %), käyttöpaikalla (40 %) tai tienvarrella (15 %). Kantohakkeen kosteus on yleensä noin 35 % luokkaa ja tuhkapitoisuus voi olla 3,8–13 %, jos mukaan on joutunut maa-aineista. VTT:llä tehdyissä mittauksissa kantomurskeen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa oli keskimäärin 19,3 MJ/kg, kuiva-aineen tiheys 182 kg/i-m³, kosteus keskimäärin 34 % ja tuhkapitoisuus 0,2 %. Korkein tehollinen lämpöarvo on mäntykannoilla (22,36 MJ/kg, taulukko 4.36), koska kannoissa orgaanisen aineksen uuteaineiden määrä on suuri (18–20 %). Laitilan ja Nuutisen (2015) julkaisussa kuusikantojen kosteus oli 17,9–36,7 p-% ja mäntykantojen 20,9–33,7 p-%. Kuusikantojen kuiva-tuoretiheys vaihteli 409–466 kg/m³ ja mäntykantojen 417–446 kg/m³. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo oli 17,9–19,9 MJ/kg ja tuhkapitoisuus 0,4–2,3 p-%.



Kuva 4.13. Kantojen korjuu energian tuotantoon, murskaus käyttöpaikalla. Kuva: VTT.

Taulukko 4.36. Juuren ja kantojen 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	

Kantomurskeelle on tyypillistä paksut palat: yli 8 mm läpimittaisia kappeleita (eli 45 mm ja 8 mm seuloihin jääneitä) oli suurimmalla seulalla tehdyssä murskeessa 34,3 % ja ilman seulaa tehdyssä 44,1 % (Pulkkinen 1996). Kantomurskeen palakokojakaumia on esitetty taulukoissa 4.37 ja 4.38 (Laine & Sahrman 1985, Pulkkinen 1996).

Taulukko 4.37. Kantomurskeen palakokojakaumia (7 näytettä) (Alakangas 2012).

Seula, mm	Seulalle jäänyt massa, p-%						
	1	2	3	4	5	6	7
< 3,15	20,7	9,0	11,0	9,7	20,7	24,4	7,7
3,15-8	11,8	10,5	18,0	25,8	11,8	14,0	27,6
8-16	12,0	15,8	31,0	34,0	12,0	16,1	37,4
16-31,5	21,3	16,7	28,5	23,8	21,3	15,3	0
31,5-45	8,4	11,3	10,9	3,4	8,4	17,1	26,0
45-63	15,2	5,0	0,6	1,4	15,2	7,2	1,3
63-100	1,7	4,6	0	2,0	1,7	0	0
> 100	8,8	27,1	0	0	8,8	5,8	0
Luokka	F25, P63	Ei	F15, P31	F10, P31	F25, P100	F25, P45	F10, P16

Ei = Ei täytä murskeen palakoon laatuvaatimusta. Laatuvaatimukset julkaisussa Alakangas & Impola 2014.

Taulukko 4.38. Kuori- ja kantomurskeen keskimääräiset palakokojakaumat (Laine & Sahrman 1985).

Seulan silmäkoko, mm	100	78	45	40	25	20	10	6	4	Pohja
KUORIMURSKE										
Seulalle jäänyt massa, %		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
KANTOMURSKE										
Seulalle jäänyt massa, %	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

4.4 Sahanpuru ja kutterinlastu

Polttoaineena käytettävää sahanpurua saadaan puutavaran sahauksen sivutuotteena. Kutterinlastu on puolestaan konehöyläyksessä syntyvää puutähdettä. 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 kosteimpiin polttoaineisiin. Metsäteollisuuslaitokset ja lämpökeskukset käyttävät kutterinlastua sahanpurun tavoin. Sahanpurusta ja kutterinlastusta voidaan valmistaa myös puristeita: pellettejä ja brikettejä. Sahanpurun ja kutterinlastun keskimääräisiä ominaisuuksia on esitetty taulukoissa 4.39–4.41.

Taulukko 4.39. 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 ³	380–480	380-480
Kostean polttoaineen tiheys, kg/i-m ³	250–300	80–120
Energiatiheys, MWh/i-m ³	0,4–0,7	0,5
Tuhkapitoisuus, p-% kuiva-aineessa	0,4–1,1	0,4

Taulukko 4.40. Sahanpurun palakokojakauma (Laine & Sahrman 1985, Vapo Oy julkaisematon aineisto 2015).

Seulan silmäkoko, mm	40	15	10	8	4	2	1	0,5	0,25	Pohja
Seulaan jäänyt massa, p-%	2,0	3,2	5,9	3,7	13,8	19,2	30,3	14,4	4,9	2,6
Seulan silmäkoko, mm				> 4	3,15–4	2–3,15	1–2	0,5–1	< 0,5	
Seulaan jäänyt massa, p-%*				3,7	3,7	13,5	45,9	26,4	6,7	

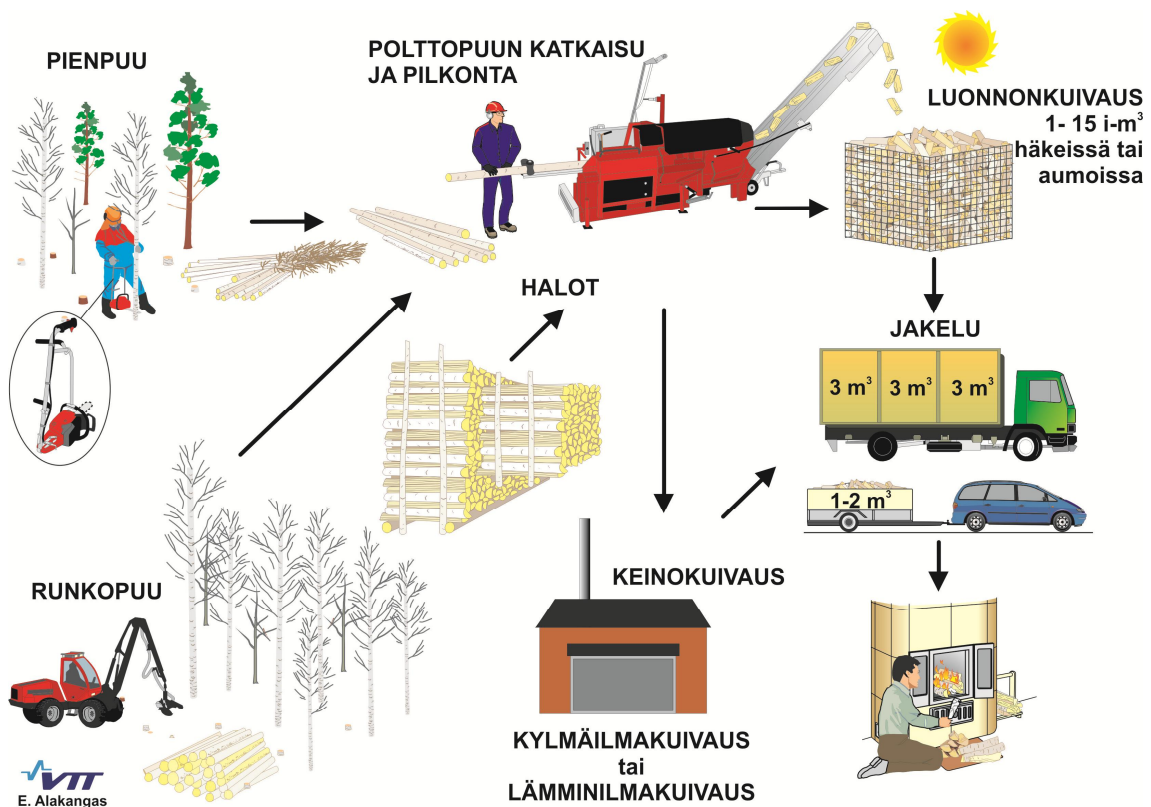
*Kosteus 37,7 p-% ja irtotiheys 222 kg/m³. Q50 on 1,367 ja Q90 on 2,926.

Taulukko 4.41. Sahanpurun (4,0 mm seulalle jäänyt fraktio, 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

4.5 Polttopuu

Polttopuuta käytettiin Suomessa yli 6,7 miljoonaa kiintokuutiometriä (m³) vuonna 2014 (Torvelainen 2009). Yksi kiintokuutiometri puuta vastaa 1,5 pinottua kuutiometriä halkoja tai klapeja/pilkkeitä ja vajaat 2,5 sekaisin olevilla puilla täytettyä kuutiometriä klapeja/pilkkeitä (Pirinen 1995 & 1997). Puulajeista suosituin oli koivu, jota käytettiin 2,2 miljoonaa m³. Myös muuta lehtipuuta, mäntyä ja kuusta käytettiin kutakin vähintään miljoonaa m³. Suurin osa polttopuusta valmistettiin runkopuusta. Noin 20 % polttopuusta ostettiin polttopuun tuottajilta. Kuvassa 4.14 on kuvattu polttopuun tuotantomenetelmiä.



Kuva 4.14. Polttopuun tuotanto- ja jakeluketju. Kuva: VTT.

Halot ovat noin metrin 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 25–50 cm 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 varastosilo, johon voi täyttää esimerkiksi vuorokauden polttoainetarpeen. Pilkkeet ovat lähinnä pienten lämmönkuluttajien ja virkistyskäytön puupolttoaine (Virtanen et al. 1984, Immonen & Seppälä 1984).

Sodan aikana pilkkeeksi kutsuttiin kirveellä tai palahakkurilla tehtyjä noin 50–150 mm pituisia puun paloja. Näitä käytettiin sodan aikana autojen puukaasuttimissa. Tässä julkaisussa pilke-sana tarkoittaa 25–50 cm mittaisia puun paloja.

Myytavälle polttopuulle on määritelty kansainväliset laatuluokat. Polttopuu tarvitsee oman laatustandardinsa, koska käyttövalmiin puun kauppa on lisääntynyt suuresti. Polttopuun laatuluokittelu on määritelty SFS-EN ISO 17225-5:2014 -standardissa, jonka laatuluokat ovat A1, A2 ja B. Myyjän on ilmoitettava tuoteselosteessaan myytävän puun laatuluokitus. Ne koskevat sekä tulisijoissa että halkokattiloissa käytettävää puuta. Polttopuun tärkeimmät määritettävät ominaisuudet ovat raaka-ainelähde, puulaji, mitat, kosteus sekä määrä. Pilkkeet jaetaan kolmeen laatuluokkaan SFS-EN ISO 17225-5:2014 -standardissa. Pilke-erän laatuluokkaan vaikuttavat mm.

- pilkkeiden pituus (L)
- paksuus (D)
- kosteus (M)
- katkaisupinnanlaatu
- laho- ja home-esiintymät
- puulaji

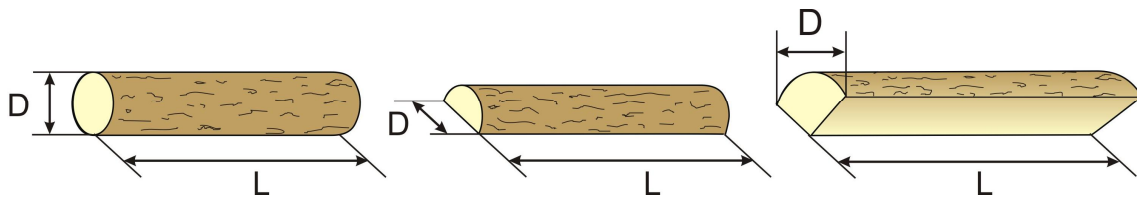
Paras tulisijoissa käytettävän polttopuun laatuluokka on A1, jossa raaka-aineena käytetään runkopuuta. A2- ja B-laatuokissa saa raaka-aineena käyttää myös kokopuuta, hakkuutähteitä tai teollisuuden puutähdettä.

Standardi vaatii, että 85 % polttopuusta on oltava ilmoitetussa halkaisijaluokassa. A1-luokan polttopuussa on oltava vähintään 90 % halkaistuja yksittäisten puiden määrästä eli joka kymmenes puu saa olla halkaisematon. Polttopuun pituusluokat alkavat L20 (pituus alle 20 cm, saa olla kaksi senttimetriä lyhyempi tai pidempi) ja päättyvät metriin. Yleisin laatuluokka on L33 (pituus alle 33 cm), koska monissa maissa polttopuu valmistetaan metrin haloista. Pituudeltaan 25 cm ja 33 cm pilkkeitä käytetään lähinnä takoiissa ja uuneissa, kun taas 50 cm pilke soveltuu keskuslämmityskattiloihin ja leivinuuneihin. Jos polttopuut ladotaan vaakaa unissa, mikä on suositus, niin pienemmissä tulisijoissa on yleensä 25 cm pituinen polttopuu sopiva. Polttopuun joukossa voi olla 15 % lyhyempiä puita. Katkaisupinnan pitäisi olla tasainen A1-luokan polttopuussa (Alakangas et al. 2008).

Polttopuuerän energiasisältö kilowattitunteina riippuu pääosin puun kosteudesta. Kun tunnetaan polttopuun kosteus, paino ja kuiva-aineen lämpöarvo, voidaan laskea sen energiasisältö standardin liitteessä olevan kaavan mukaan. Energiatiheys voidaan määrittää VTT:n kehittämällä menetelmällä (Erkkilä et al. 2012), jossa aluksi määritetään puuerän alkukosteus pilkonnassa ja punnitaan puuerän paino esimerkiksi verkkohäkissä ennen kuivausta. Puuerän alkukosteus määritetään sahanpurunäytteistä (ks. luku 2.2.2). Polttopuun on oltava samaa puulajia ja samasta raaka-aineen toimituserästä. Koska kosteus voidaan määrittää myös jo kuivatusta puuerästä uunikkuivausmenetelmällä tai piikkikosteusmittareilla (jos sallitaan epätarkkuutta). Jos haluttu toimituserän kosteus on esimerkiksi 19 %, voidaan VTT:n kehittämän ohjelman avulla laskea, mikä on puuerän paino tässä kosteudessa ja sen perusteella seurata myös kuivumista. Kuivan polttopuuerän energiasisältö lasketaan toimitusmassan ja -kosteuden sekä puun kuiva-aineen lämpöarvon perusteella.

Polttopuun paksuus tarkoittaa pilkkeen suurinta läpimittaa (kuva 4.15). 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.

Polttopuun halkaisijaluokat (paksuusluokat) ovat A1- ja A2-laatuokissa D2 (alle 2 cm, sytytyspuu), D5 (halkaisija 2–5 cm, hellapuu), D15 (halkaisija 5–15 cm, uunipuu). Sytytyspuut ovat kuorettomia, koneellisesti uritettuja teollisia kiehisä ja niiden halkaisija on alle 2 cm. Kuvassa 4.16 on tyypillisiä suomalaisia sytykkeitä.



Kuva 4.15. Polttopuun halkaisijan ja pituuden mittaaminen. Kuva: VTT.



Kuva 4.16. Sytykkeitä. Sytykkeenä käytetyt puut ovat läpimitaltaan noin 2 cm. Kuva: Eija Alakangas, VTT.

Irtomittaus on yleisesti käytetty pilkkeiden mittausmenetelmä, jossa pilkkeet mitataan toisiinsa nähden sekalaisessa (satunnaisessa) järjestyksessä tietyn kokoisessa laatikossa tai kasassa. Yleisimmin käytetään 1–3 m³ suuruista mittalaatikkoa tai lavaa, jollaisena voi toimia esim. auton peräkärri. 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 pinomittaus- ta. (Kouki 1997, Pirinen 1995 ja 1996.)

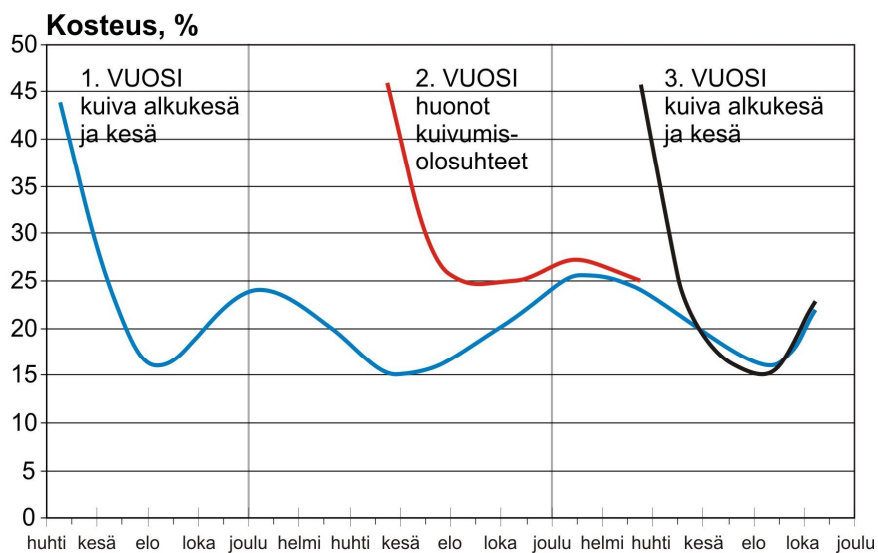
Kaikkien luokkien pilkkeiltä vaaditaan polttoon sopiva riittävän alhainen kosteustaso. Kosteusluokat ovat M20 (korkeintaan 20 % vettä puun kokonaispainosta) tai M25 (korkeintaan 25 % vettä). Polttopuun tuottajan kannattaa pyrkiä kuivaamaan puu M20-luokkaan, koska kosteus lisääntyy yleensä varastoinnissa. Tällöin voidaan välttää myös homehtumista ja vähentää päästöjä polttovaiheessa. Polttopuun kosteuden suositusarvo on 15–20 %. Kun kosteutta on vähemmän tai enemmän, päästöt ja erityisesti pölypäästöt lisääntyvät. A1-luokan polttopuussa ei saa olla näkyvää lahoa tai hometta. M20-luokan kosteus saavutetaan kuivattamalla pilkkeitä kesän yli. Taulukossa 4.42 on pilkkeiden lämpöarvoja eri kosteuspitoisuuksilla.

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 % kosteus. Tuore pilke kutistuu 6–7 %. Kutistuminen alkaa vasta 23–25 % kosteudessa eli ns. puusyiden kyllästymispisteessä. Puun varastointi talven yli esim. liiterissä ei enää oleellisesti vähennä puun kosteutta, koska puun kuivumisen kannalta otollista on kesäkausi huhtikuusta syyskuun alkuun (kuvat 4.17–4.20).

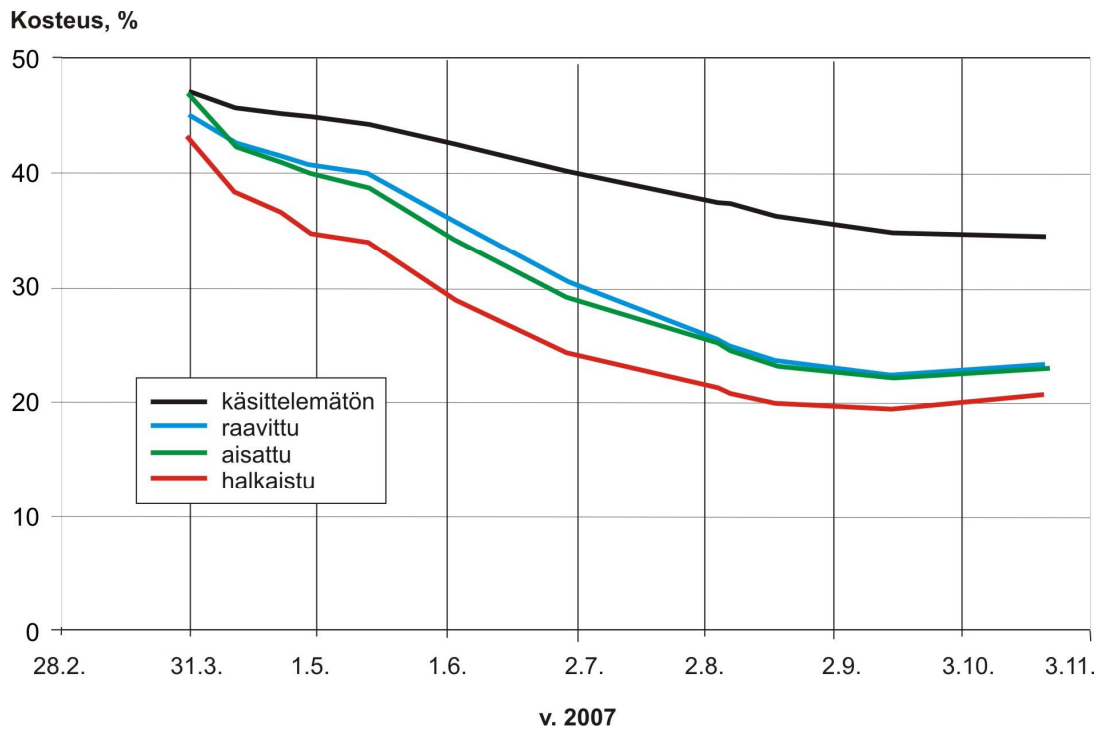
Taulukko 4.42. Eri puulajien ja niiden seoksista valmistettujen pilkkeiden tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa ja energiatiheyksiä (Pirinen 1997).

Puulaji	Tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa, kWh/kg	Kosteus, %	Energiatiheys	
			kWh/irto-m ³	kWh/pino-m ³
Mänty	4,15	20	810	1 360
Kuusi	4,10	20	790	1 320
Koivu	4,15	0	1 040	1 750
		10	1 030	1 730
		20	1 010	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

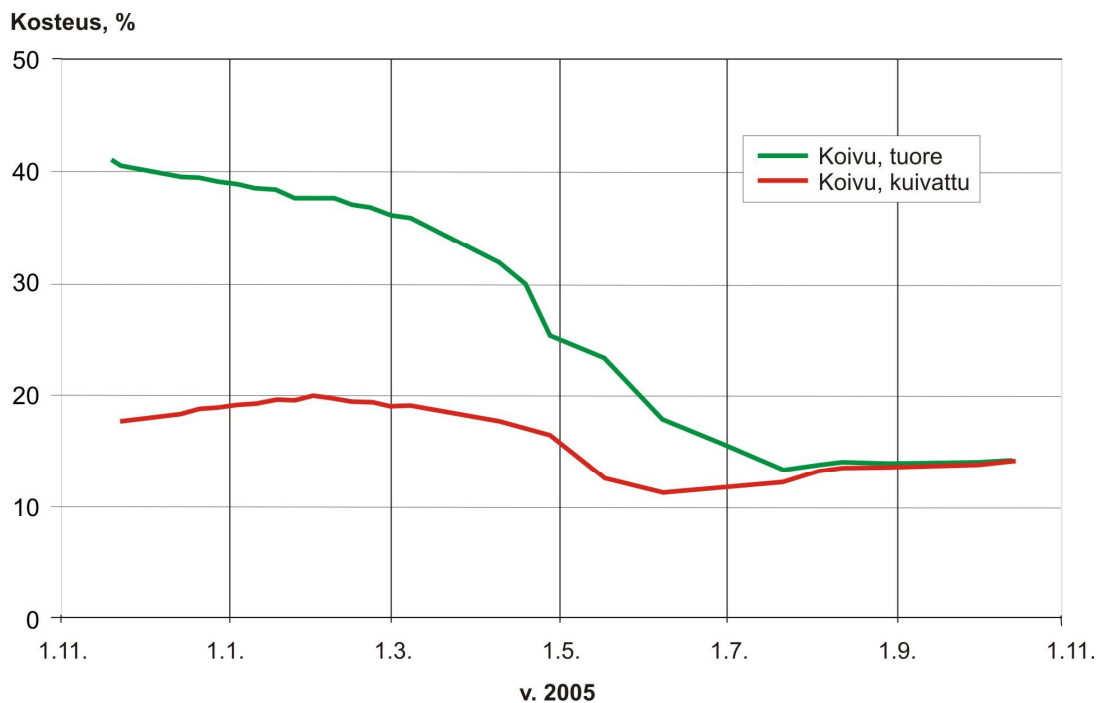
Sekalehtipuun oletetaan sisältävän 50 % leppää + 50 % haapaa ja sekahavupuun 50 % mäntyä + 50 % kuusta.



Kuva 4.17. Pilkkeen kuivuminen ulkona katetussa verkkokehikossa ja kosteuden vuodenaikainen vaihtelu (Alakangas et al. 2008). Kuva: VTT.

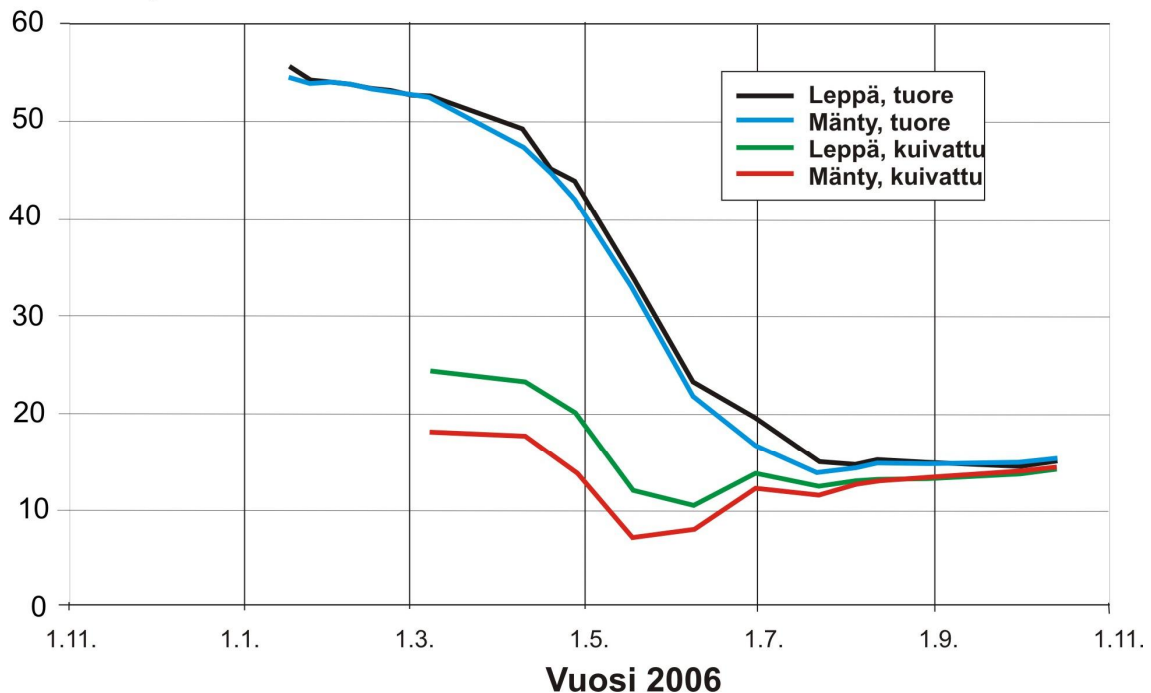


Kuva 4.18. Kuoren rikkomisen vaikutus koivurankanippujen kuivumiseen peitettyssä varastokasassa vuonna 2007. Lähde: Erkkilä et al. 2012. Kuva: VTT.



Kuva 4.19. Tuoreiden ja kuivattujen koivupilkkeiden kosteus varastokatoksessa vuonna 2005. Lähde: Hillebrand & Kouki 2006. Kuva: VTT.

Kosteus, %



Kuva 4.20. Tuoreiden ja kuivattujen leppä- ja mäntypilkkeiden kosteus varastokatoksessa vuonna 2005. Lähde: Hillebrand & Kouki 2006. Kuva: VTT.

Taulukossa 4.43 on Työtehoseuran mittaukset muuntokertoimista, jossa yhdestä kiintokuutiometristä saadaan 2,5 irtokuutiometriä. Esim. yksi irtokuutiometri pilkettä sisältää 0,40 kiintokuutiometriä eli 400 litraa puuta.

Taulukko 4.43. Pilkkeiden mittayksiköiden väliset muuntokertoimet (Pirinen 1995 ja 1996).

Mittayksikkö	Irto-m ³	Pino-m ³	Kiinto-m ³
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

VTT:n 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 2000).

VTT tutki pilkkeiden kuivumista (Erkkilä et al. 2012, taulukot 4.44 ja 4.45). Pilkonta tehtiin tuoreena. Toimituskosteuteen lasketussa irtotiheydessä ei ole otettu huomioon kutistumista eikä lavojen liikuttelusta tapahtuvaa tiivistymistä. Vaihteluväli on 2,15–2,48 irtokuutiometriä yhdestä kiintokuutiometristä (Erkkilä et al. 2006).

Taulukko 4.44. Mittaustietoa pilkkeiden valmistuksesta vuonna 2010 (Erkkilä et al. 2012).

Ominaisuus	Lava 8	Lava 9	Lava 10	Lava 11	Keskiarvo	Keskihajonta
Kiintotilavuus, dm ³	661	697	643	604	651	38
Runkoja, kpl	24	21	19	25	22	2,8
Keskiläpimitta, cm	10,6	11,6	11,6	9,9	10,9	0,8
Keskikoko, dm ³	28	33	34	24	30	4,6
Irtotilavuus, dm ³	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	0
Irto-m ³ /kiinto-m ³	2,27	2,15	2,33	2,48	2,31	0,14
Puiden massa, kg	567	542	518	506	533	27
Kosteus, p-%	43,1	43,1	40,9	40,9	42,0	1,3
Kiintotiheys, kg/m ³	858	778	806	837	820	35
Kuiva-tuoretiheys, kg k.a./m ³	488	443	476	495	475	23
Irtotiheys, kg/i-m ³	378	361	345	337	356	18

Taulukko 4.45. Verkkosäkeissä luonnonkuivauksella vuonna 2011 kuivuneiden koivupilkkeiden kuivumistietoja (1,5 irto-m³ verkkosäkit kuormalavoilla). Alkukosteudet on määritetty purunäytteistä.

Säkki, nro	Pilkkeiden valmistuspäivä	Näytteiden ottopäivä	Säkkien alkukosteus, p-%	Pilkkeiden kosteus, p-%		Näytepilkkeitä, kpl
				Keskiarvo	Hajonta	
Kuivaus katoksessa valmistuksesta alkaen						
37	20.3.	12.8.	44,5	14,6	0,6	15
62	20.3.	12.8.	44,5	13,6	0,5	15
Kuivaus ulkona, kesäkuussa halliin						
138	4.3.	8.9.	45,2	18,1	1,3	14
144	5.4.	8.9.	43,7	17,3	2,3	15
143	5.4.	20.9.	43,7	16,4	1,0	15
158	5.4.	20.9.	42,9	14,9	0,4	16
201	8.4.	8.9.	43,4	16,9	1,0	15
Kuivaus ulkona, säilytetty ulkona pressun alla						
628	30.6.	20.9.	30,1	17,0	1,1	16
629	30.6.	8.9.	30,1	20,3	1,1	15

A1-luokan pilkkeiden katkaisupinnan on oltava tasainen ja sileä. Tämä edellyttää käytännössä sirkkelipilkekojan tai moottorisahan käyttöä. Giljotiini-periaatteella toimivat koneet jättävät pilkkeen päät aina epätasaiseksi, joten tällaiset pilkkeet luokitellaan A2- tai B-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 laatuksena 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. Koivupilkkeissä ei sallita muita puulajeja. Lehtipuupilkkeessä ei hyväksytä havupuuta. Havupuupilkkeessä lehtipuuta sallitaan rajoituksetta.

4.6 Puubriketit

Puubriketit valmistetaan kuivasta purusta, hiontapölystä ja kutterinlastusta puristamalla. Sideaineita ei tavallisesti käytetä, sillä puun omat ainekset (ligniini) pitävät puristeen koossa. Puubriketti on yleensä poikileikkaukseltaan pyöreä tai neliön muotoinen. Brikettien koko on suurempi kuin pellettien, pienin mitta yleensä 50–75 mm. Briketit valmistetaan puristamalla lieriömäiseen tai tiiliskiven muotoon. Brikettien energiasisältö massayksikköä kohti on sama suuruusluokkaa kuin puupellettien. Brikettejä toimitetaan myös irtotavarana ja pakattuna. Suomessa brikettejä on käytetty pääasiassa lämpölaitosten arinakattiloissa. Brikettejä käytetään myös tulisijoissa. Lämmityksessä on otettava huomioon brikettien yli kaksinkertainen energiasisältö tilavuusyksikköä kohti verrattuna koivupilkkeisiin (Kallio & Alakangas 2002).

Pyöreän briketin sisällä voi olla reikä, jonka halkaisija on 10–20 mm. Brikettien raaka-aineksi soveltuvat lähes kaikki kuivat, palavat aineet, joiden kosteus on alle 15 p-%. Puristamisen aikana puuaineksen kosteus on alle 10 %. Puubrikettien kuiva-ainemassa on yli 1 000 kg/m³ ja irtotiheys 650 kg/i-m³. Muihin polttoaineisiin verrattuna briketit ovat raskasta ja kuivaa polttoainetta. Brikettien analyysituloksia on taulukossa 4.46.

Taulukko 4.46. Sahanpurusta valmistettujen sylinterimäisten puubrikettien ominaisuuksia (Laine & Sahrman 1985, Bioklapi Oy).

Ominaisuudet	VTT	ENAS (Bioklapi)
Lämpöarvo, MJ/kg		
* Kuiva-aineen tehollinen	18,93 (0,19)	19,42
* Kalorimetrisen		20,79
* Tehollinen saapumistilassa		17,36
Kosteus valmistusvaiheessa, %	5,4 (0,4)	9,4
Haihtuvat aineet (k.a.), %	83,6 (0,7)	
Tuhkapitoisuus (k.a.), %	0,3	0,6
Irtotiheys, kg/m ³		1 111
Kuiva-aineessa, p-%		
Hiili, C		52,1
Vety, H		6,3
Typpi, N		< 0,2
Rikki, S		0,09
Kloori, Cl		0,002
Kuiva-aineessa, mg/kg		
Kromi, Cr		< 0,5
Kupari, Cu		2,3
Nikkeli, Ni		< 0,5
Sinkki, Zn		10
Arseeni, As		< 0,5
Kadmium, Cd		0,12
Lyijy, Pb		< 0,5
Elohopea, Hg		< 0,05

Analyytitulosten hajonnat suluisissa.

Joillakin mekaanisen metsäteollisuuden yrityksillä on pieniä brikettipuristimia, joilla voidaan valmistaa kiekkomaisia brikettejä. Briketin tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on noin 4,8 kWh/kg (17,3 MJ/kg), kosteus noin 6 p-% ja tuhkapitoisuus alle 0,7 p-%. Kiekkomaisten brikettien kestävyys ei ole niin hyvä kuin sylinterimäisen briketin. Muut ominaisuudet ovat käytetyn raaka-aineen (yleensä kuorettoman havupuun) ominaisuuksien mukaisia. Puubriketeille on kehitetty kansainvälinen standardi SFS-EN ISO 17225-3:2014. Standardissa on määritetty brikettien laatuluokat A1, A2 ja B. Laatuluokissa on määritetty brikettien muoto, mitat, kosteus, tuhkapitoisuus sekä alkuaineiden pitoisuuksia. Alkuaineiden pitoisuudet ovat yhtenäisiä puupellettien kanssa. Myös peltobiomassoista valmistetuille briketeille on laadittu standardi SFS-EN ISO 17225-7:2014, jossa on kaksi laatuluokkaa A ja B.

4.7 Puupelletit

Puupelletit ja -briketit ovat yleensä mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteista tehtyjä sylinterin muotoisia puupolttoainepuristeita. Raaka-aine on useimmiten kuivaa purua, hiontapölyä ja kutterinlastua, mutta pellettejä ja brikettejä voidaan puristaa myös tuoreesta biomassasta, kuoresta ja metsähakkeesta, jolloin raaka-aine pitää murskauksen lisäksi kuivata ennen pelletointia.

Puuta pelletöitäessä katsotaan tehontarpeen, lujuuden ja laitekapasiteetin kannalta ihannekosteudeksi 10–15 %. Havupuut soveltuvat hieman lehtipuita paremmin puupellettien raaka-aineeksi niiden korkeamman ligniinipitoisuuden takia. Ligniini on puun kuitujen luonnollinen sideaine, joka toimii myös pellettien sideaineena.

Mikäli pellettien raaka-aine sisältää kuorta, nousee pellettien lämpöarvo. Yhden pellettitonin valmistus vaatii raaka-aineeksi (Kytö & Äijälä 1981):

- noin 7 i-m³ sahanpurua (kosteus 50–55 %) tai
- noin 10 i-m³ kutterinlastua (kosteus 10–15 %).

Kuivausta ei tarvita, jos raaka-aine on kutterinlastua tai kuivaa sahanpurua. Jos kuitenkin käytetään kosteaa sahanpurua, se pitää kuivata ennen jauhatusta esimerkiksi rumpukuivaimessa.

Jauhatuksessa raaka-aine jauhetaan vähintään pelletin halkaisijaa vastaavaan raekokoon. Jauhettu puupuru ei kuitenkaan saa olla liian hienoa, jolloin pellettiä omalta osaltaan kokoon sitovat isommat kuidut puuttuvat. Yleisimmin jauhamiseen käytetään vasaramyllyä, jolloin saadaan tasalaatuista raaka-ainetta puristettavaksi (Paju & Alakangas 2002).

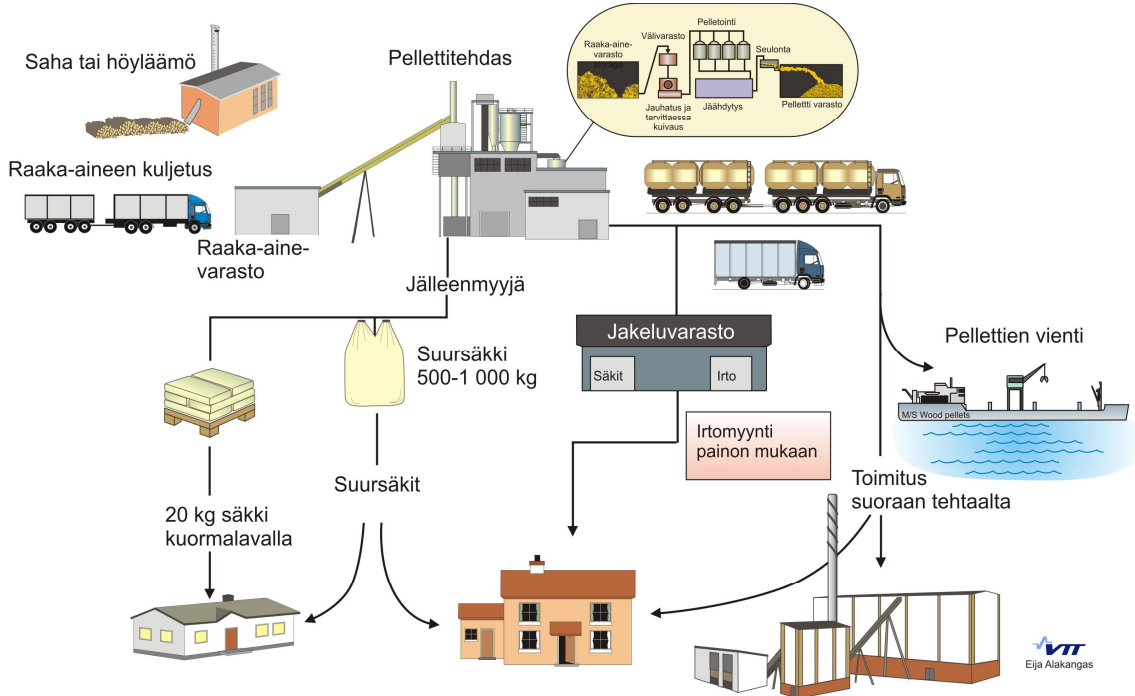
Jauhatusta ja raaka-aineen kuivausta voidaan yhdistää, mikäli kuivaukseen on aihetta. Jauhinkuivaimessa murskain muuttaa kuivattavan purun raekokoa. Murskaamalla helpotetaan huomattavasti kuivausprosessia: partikkelit tulevat samankokoisiksi ja niissä on kauttaaltaan suunnilleen sama kosteuspitoisuus. Kosteuksien jakaantuessa tasaisesti kaikille partikkeleille pelleteistä tulee lujempia ja paremmin kasassa pysyviä. Kuivaukseen käytetään useimmiten kuumakaasukehitintä, jonka poltin polttaa tuotantoprosessissa ylijäävää purua ja pölyä. Muodostuva kaasu koostuu pääasiassa hiilidioksidista, vedestä ja tpeystä.

Pellettien puristus tapahtuu taso- tai rengasmatriisikoneilla. Normaalisti puupellettejä puristettaessa ei käytetä mitään lisäaineita, vaan pellettien yhteen sitovina voimina ovat sisäpintojen koheesio, partikkelien kuitumaiset osat ja ennen kaikkea puristamisen aiheuttamassa kuumuudessa pehmenneen ligniinin aiheuttama adheesio. Pellettipuristimessa hienonnetun puuaineksen lämpötila nousee ja luonnollinen sideaine, ligniini, sulaa ja pitää jäähtyessään pelletin koossa. Pelletti siis saavuttaa lujuutensa vasta, kun se on ehtinyt jäähtyä. Matriisi valitaan aina tapauskohtaisesti riippuen puristettavan raaka-aineen laatuominaisuuksista (kovuus, kosteus, koostumus). Pelletöinnin onnistumista kuvaa se, kuinka paljon pellettien joukossa on hienoainesta puristamisen jälkeen.

Jäähdytys on erittäin tärkeä vaihe prosessissa. Puristusvaiheen jälkeen pellettien lämpötila on korkea, normaalisti noin 90 °C. Puristusvaiheessa vapautunut kosteus siirtyy pois tuotteesta lämmön mukana. Jäähdytys stabiloi pelletit ja kovettaa pellettien pintaan sulaneen ligniinin, jolloin pellettien muoto säilyy.

Seulonnessa erotetaan valmiista pelleteistä niihin sekoittunut raaka-ainepuru, joka johdetaan takaisin pelletointiprosessiin. Tämä tapahtuu yleensä täryseulalla. Näin varmistetaan homogeeninen tuote, joka ei aiheuta ongelmia kuljetus- ja polttolaitteistoissa. Lopuksi pelletit ohjataan varastoon tai säkitetään suur- tai

piensäkkeihin odottamaan kuljetusta kulutuskohteisiin (Paju & Alakangas 2002). Kuva 4.21 esittää pellettien tuotanto- ja jakeluketjua.



Kuva 4.21. Pellettien tuotanto- ja jakeluketju. Kuva: VTT.

Suomessa valmistettavien pellettien halkaisija on yleensä 8 mm ja pituus 10–30 mm. Pellettien kosteus on alhainen, 6–10 %. Myös tuhkapitoisuus on pieni eli noin 0,5 %. Irtokuutiometri pellettejä painaa 640–690 kg. Kiintotiheys on 1 100–1 500 kg/m³. Pellettikilon lämpöarvo on 14,0–17,5 MJ (4,7–5,0 kWh). Yksi kuutiometri pellettejä sisältää siten energiaa 3 000–3 300 kWh. Yksi tonni pellettejä sisältää energiaa 4 700–5 000 kWh ja se vie varastotilaa noin 1,5 m³. Joutuessaan kosketuksiin veden kanssa puupelletit kostuvat, turpoavat ja hajoavat. Ne kestävät huonosti suoranaista kosteutta. Pellettien keskimääräisiä ominaisuuksia ja niiden vertailua on taulukossa 4.47.

Puupelletit sopivat pientalojen, maatilojen ja suurkiinteistöjen lämmityspolttoaineeksi. Puupellettien polttoon tarvitaan erityisesti sitä varten suunnitellut laitteet. Isoissa lämpö- ja voimalaitoksissa pelletit murskaataan ennen syöttämistä esim. pölypolttokattilaan. Suomessa puupellettien suurin tuotantokapasiteetti on noin 630 000 tonnia ja pellettejä valmistetaan vuosittain noin 300 000 tonnia.

Puupelleteille on laadittu kansainvälinen standardi (SFS-EN ISO 17225-2:2014), joka määrittelee pellettien laadun (Alakangas & Valtanen 2015). Puupellettistandardi sisältää sekä pienempään kokoluokkaan (laatuluokat A1, A2 ja B) että teollisuuskäyttöön tarkoitetut pelletit (laatuluokat I1, I2 ja I3). Pellettien laatuominaisuuksista tärkeimmät ovat kosteus, mekaaninen kestävyys ja vähäinen hienoaineksen määrä. Kosteuden on oltava A1-laatuluokassa ≤ 10 p-%, mekaanisen kestävyuden 97,5 p-% ja hienoaineksen (< 3,15 mm) korkeintaan 1 p-%.

Taulukko 4.47. Suomalaisen pellettien keskimääräisiä ominaisuuksia (Tuomi 2001).

Ominaisuus	Tuote 1	Tuote 2	Tuote 3	Tuote 4	Tuote 5
Kosteus, p-%	5,2	6,6	9,1	8,5	9,7
KUIVA-AINEESSA, p-%					
Tuhka	0,28	0,30	0,25	0,24	0,37
Hilli, C	49,80	49,70	49,72	49,39	49,12
Vety, H	6,12	6,11	6,13	6,10	6,03
Typpi, N	0,16	0,16	0,05	0,07	0,08
Rikki, S	0,005	0,006	0,004	0,005	0,007
KUIVA-AINEESSA, mg/kg					
Kadmium, Cd	0,06	0,08	0,07	0,11	0,06
Kromi, Cr	0,48	1,59	0,36	0,48	0,31
Sinkki, Zn	7,83	0,04	7,55	7,56	8,00
Kupari, Cu	1,14	2,76	1,02	1,22	1,10
Nikkeli, Ni	0,26	0,26	0,24	0,21	0,30
Rauta, Fe	9,28	8,19	8,79	7,59	29,79
Kloori, Cl	6,88	5,82	6,85	5,73	7,38
Natrium, Na	61,52	30,32	15,23	7,78	53,35
Mangaani, Mn	64,42	65,74	62,02	85,43	67,21
KUIVA-AINEESSA, mg/g					
Kalsium, Ca	0,57	0,59	0,54	0,62	0,64
Kalium, K	0,31	0,35	0,35	0,26	0,46
Magnesium, Mg	0,11	0,12	0,13	0,09	0,12
Fosfori, P	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03
Halkaisija, mm	8	8	8	8	8
Pituus keskimäärin, mm	16	14	19	7	14
Minimi	10	7	8	4	6
Maksimi	22	25	37	10	25
Pellettien määrä, kpl/100 g	110	120	110	300	140
Puristuslujuus (Amandus-Kahl), kp/kg	21	20	21	17	19
Minimi	20	18	20	9	17
Maksimi	21	21	21	21	21
Rummutuslujuus, hienoaines (ASTM E 1288-89, < 2,36 mm), %	1,8	1,1	1,3	1,9	2,6
Irtotiheys, kg/irto-m ³					
Saapumistilassa	690	680	630	600	560
Kuivana	655	635	575	550	505
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg					
Kuiva-aineessa	19,0	18,9	19,0	18,8	18,7
Saapumistilassa	17,9	17,5	17,0	17,0	16,7
Tehollinen lämpöarvo, MWh/t					
Kuiva-aineessa	5,28	5,26	5,28	5,23	5,20
Saapumistilassa	4,98	4,87	4,74	4,73	4,63
Energiatiheys, MWh/irto-m ³	3,43	3,31	2,98	2,84	2,59

4.8 Puuhiili ja termisesti käsitellyt tiivistetyt biomassapolttoaineet

4.8.1 Puuhiili

Puuhiilen valmistajia on Suomessa nykyään 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 ja 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 puukaasuttimisissa. Aktiivihiihen raaka-aineena puu ja muut kasvi-peräiset 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 lehtipuuta pidetään parempana grillihiilen raaka-aineena (Ranta 1994).

Taulukoissa 4.48 ja 4.49 on esitetty puuhiilen ominaisuuksia. Hiiltymisen edetessä puuhiilen hiilipitoisuudet kasvoivat ja haihtuvien aineiden pitoisuudet pienenevät. 475 °C hiiltolämpötilan hiili oli laadultaan hyvää grillihiiltä, sillä sen tuhkapitoisuus oli pieni ja kiinteän hiilen pitoisuus yli vaaditun 75 % pitoisuuden SFS-EN ISO 17225-1:2014 -standardin mukaan.

Taulukko 4.48. Puuhiilen ominaisuuksia (Fagernäs et al. 2014).

Ominaisuus	Raaka-aine koivu	Hiili, jonka hiiltolämpötila on		
		Matala 300 °C	Keski 375 °C	Korkea 475 °C
Ominaispinta-ala, m ² /g		2,2	6,4	43,5
Kosteus, p-%	10–12	0,2	0,5	0,0
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	20,1	27,2	30,1	33,1
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg				
Kuiva-aineessa	18,8	26,1	29,3	32,4
Saapumistilassa	17,3	26,0	29,1	32,4
KUIVA-AINEESSA, p-%				
Haihtuvat aineet	84,6	48,0	30,0	17,2
Kiinteä hiili	15,0	51,5	69,3	81,8
Hiili	49,9	71,6	80,3	88,5
Vety	5,9	4,9	3,9	3,1
Typpi	0,1	0,2	0,3	0,3
Rikki	0,01	0,01	0,01	0,01
Happi (erotus)	44,0	23,0	15,0	7,0
Tuhka	0,4	0,5	0,7	1,0

Taulukko 4.49. Puuhiilen ominaisuuksia (Fagnäs et al. 2012).

Ominaisuus	Raaka- aine	Hiili	Raaka- aine	Hiili	Raaka- aine	Hiili	Raaka- aine	Hiili
	A1 kuorellinen lehtipuu		A2 kuoreton lehtipuu		B kuorellinen lehtipuu		C kuorellinen lehtipuu	
Raaka-aineen pituus, cm	5–10		15					
Kosteus, p-%	14,7	1,3	13,8	4,9	14,5	2,8	7,6	0,9
Kalorimetrisen lämpöarvo, MJ/kg k.a.		33,2		33,4		33,8		33,4
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg								
Kuiva-aineessa		32,5		32,6		33,1		32,3
Saapumistilassa		32,0		30,9		32,1		32,0
KUIVA-AINEESSA, p-%								
Haihtuvat aineet	84,5	19,6	83,0	19,9	84,5	18,4	72,2	17,1
Kiinteä hiili	14,9	79,6	15,9	78,7	14,9	80,6	27,5	81,9
Hiili	40,7	87,1	50,0	86,4	49,8	87,2	50,3	88,0
Vety	6,1	3,3	5,9	3,3	6,0	3,3	6,0	2,9
Typpi	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Rikki	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Happi (erotus)	44,1	9,0	42,9	9,0	43,5	8,0	43,3	8,0
Tuhka	0,6	0,8	1,1	1,4	0,6	1,2	0,3	0,9

Puuhiilen tiheys riippuu käytetyn raaka-aineen tiheydestä ja kappalekoosta. Pyökkihiilen tiheys on 190–200, koivuhiilen 160–170, mäntyhiilen 130–140 ja kuusihiilen 110–120 kg/m³.

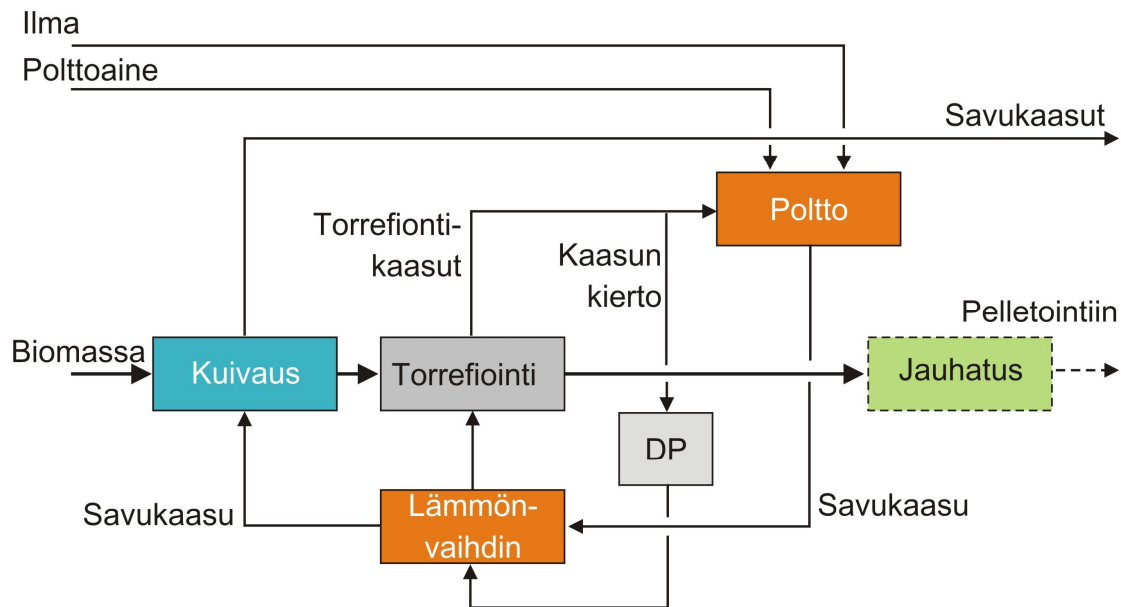
Puuhiilen kosteus on yleensä alle 5 % ja haihtuvien aineiden määrä alle 20 %. Kotitalouksissa suositaan usein suurta haihtuvien aineiden määrää, koska hiili on tällöin helpompi sytyttää, mutta samalla on syntyvien haitallisten kaasujen määrä suurempi. Puuhiilen tuhkapitoisuus on 0,5–1,4 %, mutta ei ole harvinaista, että epäpuhtauksien (mm. maa-aineksen) mukaan joutuminen lisää tuhkapitoisuutta jopa yli 10 %:iin (Ranta 1994).

SFS-EN ISO 17225-1:2014 -standardissa on puuhiilelle kaksi kosteusluokkaa: M8 ja M10. Tuhkapitoisuusluokat ovat A5, A8 ja A8+ (tuhkaa on yli 8 p-% kuiva-aineessa). Kiinteän hiilen luokat ovat C60 ja C75. Irtotiheysluokat ovat BD130 ja BD150. Palakoko on P150, jossa 75 p-% on välillä 16–150 mm, karkea jae on määritetty seuraavasti: korkeintaan 10 % yli 100 mm ja kaikki alle 150 mm. Alle 10 mm hienoainesta saa olla korkeintaan 7 p-%.

4.8.2 Termisesti käsitellyt tiivistetyt kiinteät biopolttoaineet

Termisesti käsitellyt tiivistettyjä polttoaineita eli pellettejä ja brikettejä valmistetaan useammalla menetelmällä. Suomessa on kehitetty torrefiointia/paahdamista, höyryräjäytystä sekä märkähiiltoa (hydro thermal carbonisation). Turpeen märkähiiltoa tutkittiin erityisesti 1970- ja 1980-luvulla.

Torrefiointiprosessin raaka-aineena käytetään kuivattua biomassaa, kuten puuhaketta, metsähaketta tai maatalousperäisiä tähteitä. Torrefiointissa biomassaa käsitellään hapettomassa ja ilmanpaineisessa reaktorissa noin 250–280 °C lämpötilassa. Torrefiointivaiheen jälkeen biomassaa yleensä pelletoidaan, jolloin lopputuotteena saadaan ruskea, tiivis, kuoripellettiä muistuttava biohiilipelletti. Torrefioitu biomassaa sisältää tyypillisesti 60–70 % raaka-aineen alkuperäisestä massasta ja 90 % alkuperäisestä tehollisesta lämpöarvosta. Torrefiointissa vapautuneet kaasut ja höyryt yleensä poltetaan ja muodostunut lämpö hyödynnetään biomassan kuivaamisessa sekä torrefiointiprosessin lämmönlähteenä (kuva 4.22).



Kuva 4.22. Puun torrefiointiprosessi. Kuva: VTT.

Märkähiilto on lämpökemiallinen prosessi, jossa käsitellään tyypillisesti märkiä biomassoja, kuten yhdyskuntalietettä, lantalietettä, biokaasulaitoksen mädätettä, mustalipeää, turvelietettä, levää, ruoan jätteitä, panimolietettä tai erilaisia puu- ja paperiteollisuuden lietteitä. Märkähiilto tapahtuu vedessä lämpötila-alueella 180–250 °C autogeenisessä käsittelypaineessa 2–5 MPa, reaktioajan ollessa tyypillisesti muutamia tunteja. Reaktion pH on noin 7, ja ne ovat lämpöä tuottavia. Märkähiilossa voidaan käyttää orgaanista katalyyttiä, kuten sitruunahappoa. Päätuotteena muodostuu kiinteää hiiltä, jonka massaosa on 35–70 p-%. Tuotehiilen lämpöarvo on tyypillisesti 25–30 MJ/kg. Hiiliä voidaan käyttää energian tuotannossa, erilaisissa biohiilisovelluksissa, maanparannusaineena tai lannoitemateriaalina. Märkähiillon vesivaiheeseen liukenee myös orgaanisia reaktiotuotteita. Reaktiokaasujen määrä on tyypillisesti vähäinen sisältäen pääosin hiilidioksidia. Märkähiilto tapahtuu varsin korkeissa lämpötiloissa, jolloin bionien bakteerit, patogeeniset aineet ja haitalliset orgaaniset epäpuhtaudet, kuten farmaseuttisesti ja hormonaalisesti aktiiviset yhdisteet tuhoutuvat. Saksassa märkähiilto prosessit ovat siirtymässä teolliseen käyttöön yhtenä biolietteiden käsittelytekniikkana.

Höyryräjäytyksen raaka-aineeksi soveltuvat puun ja metsähakkeiden ohella myös maatalousperäiset tähteet, kuten vehnän olki. Höyryräjäytysmenetelmässä puubiomassa syötetään paineistettuun reaktoriin, jossa se kuumennetaan höyryllä kyllästymispisteeseen. Reaktorin painetaso on 0,7–5 MPa ja lämpötila 160–250 °C sovelluksesta riippuen. Reaktioaika vaihtelee muutamista sekunneista kymmeneen minuuttiin. Höyryräjäytystä voidaan käyttää puun kuidutukseen tai esikäsittelyvaiheena bioetanolin tuotannossa. Yleensä höyryräjähdys toteutetaan panostoisesti. Uusi ja ajankohtainen käyttösovellus on höyryräjäytettyjen pellettien valmistus. Tämä on kilpailuva vaihtoehto torrefiointilla valmistetuille pelleteille. Puubiomas- sa voidaan kuivata ennen höyryräjäytystä noin 8 p-% kosteuteen, jolloin höyryräjäytyksen jälkeistä kuiva- usta ei tarvita. Kuivattu raaka-aine hienonnetaan esimerkiksi vasaramyllyllä ennen höyryräjäytysreaktoriin syöttämistä. Reaktorin painetaso on 1,5–2,5 MPa (lämpötila alle 210 °C) ja puumassan reaktioaika on tyypillisesti alle 20 minuuttia. Kuuma ja pehmentynyt biomassa pusketaan ulos reaktorista venttiilin kautta, jolloin massan vesi kiehuu paineen alenemisen seurauksena. Puskussa tapahtuu biomassan mekaaninen hajoaminen. Lopuksi biomassa pelletoidaan väriltään ruskeiksi tai mustiksi pelleteiksi. Höyryräjäytetyn pelletin energiasaanto on tehollisesta lämpöarvosta laskettuna tyypillisesti yli 90 % ja sen energiatiheys on samaa suuruusluokkaa kuin torrefioitujen pellettien.

Taulukossa 4.50 on suomalaisista raaka-aineista Hollannissa torrefioitujen pellettien ominaisuuksia.

Raaka-aineet olivat seuraavat:

- karsittu harvennuspuu (enimmäkseen mäntyä, vähän kuorta)
- eri puulajeista koostuva hakkuutähde, jonka palakoko on 8–32 mm
- runkopuuuhake, mänty
- murskattu kuusenkuori
- pajuhake

Raaka-aine esikuivattiin 20 p-% kosteuteen ja pakattiin 20 kg säkkeihin ja toimitettiin ECN:lle torrefiointia varten. Torrefiointilämpötila optimoitiin näille materiaaleille TGA-analyysillä ja se oli 250–260 °C. Kokeissa massasaanto oli 81–88 p-% ja energiasaanto 88–91 p-%. Taulukoissa 4.51 ja 4.53 on lisää eri raaka-aineista valmistettujen torrefioitujen pellettien ominaisuuksia ja taulukossa 4.53 erilaisten pölyjen räjähdysominaisuuksia.

Taulukko 4.50. Torrefioitujen pellettien ja niiden raaka-aineiden ominaisuuksia (Wilén et al. 2013).

Raaka-aine/ polttoaine	Kosteus, p-%	Ominaisuus kuiva-aineessa, p-%							Lämpöarvo, MJ/kg k.a.	
		Tuhka	Haihtuvat	Kiinteä hiili	Hiili	Vety	Typpi	Happi	Kalorimetrisen	Tehollinen
KARSITTU HARVENNUSPUU										
Raaka-aine	0,5	0,5	83,2	15,8	49,5	6,2	0,17	43,6	19,97	18,62
Torrefioitu 235 °C	< 0,1	0,5	80,4	19,1	51,5	6,1	0,19	41,8	20,99	19,66
Torrefioitu 245 °C	< 0,1	0,7	77,9	21,4	52,2	6,0	0,23	45,9*	21,01	19,70
Torrefioitu 255 °C	< 0,1	0,7	74,4	23,9	53,6	5,9	0,30	39,5	21,59	20,59
HAKKUUTÄHDE										
Raaka-aine	0,3	1,3	80,5	17,9	49,8	6,2	0,3	42,9	20,21	18,86
Torrefioitu 245 °C	< 0,1	1,2	77,1	21,7	52,2	6,0	0,31	40,4	20,96	19,65
Torrefioitu 255 °C	< 0,1	0,8	76,3	22,9	53,2	6,0	0,22	44,3*	21,35	20,05
MURSKATTU KUUSEN KUORI										
Raaka-aine	3,6		69,4	27,0	51,9	5,7	0,45	41,0	20,46	19,22
Torrefioitu 255 °C	4,2		62,4	33,4	56,7	5,2	0,52	38,7	21,99	20,86
RANKAHAKE, MÄNTY										
Raaka-aine	0,3		83,2	16,6	50,9	6,6	0,09	43,6	20,34	20,34
Torrefioitu 255 °C	0,3		78,8	20,9	53,3	6,4	0,09	41,4	21,21	19,82
PAJUHAKE										
Raaka-aine	1,8		79,8	16,0	49,0	5,8	0,53	43,1	19,86	18,59
Torrefioitu 255 °C	2,0		73,5	24,5	53,1	5,7	0,59	38,8	21,37	20,13

* poikkeava arvo

Taulukko 4.51. Torrefioitujen pellettien ominaisuuksia (Wilén et al. 2013).

Näyte	Kosteus, p-%	Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	Irtotiheys, kg/m ³	Energia-tiheys, GJ/m ³ k.a.	Mekaaninen kestävyys, p-%	Puristus-lujuus (Amandus Kahl), kp/kg
Rankahakkeesta valmistettu torrefioitu pelletti, 235 °C	1,4	19,20	556,6	10,69	80,0	18,5
Rankahakkeesta valmistettu torrefioitu pelletti, 245 °C	2,1	20,02	633,1	12,67	92,0	20,8
Rankahakkeesta valmistettu torrefioitu pelletti, 255 °C	1,6	20,27	633,8	12,85	88,0	20,8
Hakkuutähteestä valmistettu torrefioitu pelletti, 240 °C	2,8	19,67	681,3	13,40	89,0	17,5
Hakkuutähteestä valmistettu torrefioitu pelletti, 250 °C	1,0	20,19	643,2	12,99	87,0	9,5
Puupelletti	6,9	17,68	678,5	12,00	98,0	20,5

Taulukko 4.52. Torrefioitujen pellettien ominaisuuksia (Föhr et al. 2015).

Ominaisuus	Raaka-aine					
	Sekalehtipuu	Koivu	Kuusi	Mänty	Kuusiviilu	Koivuviilu
Pituus, mm	17,1	10,8	10,3	9,1	8,0	13,1
Halkaisija, mm	8,0	8,0	8,0	7,9	8,0	8,0
Hienoaines, p-%	0,2	0,6	0,1	0,9	0,8	0,2
Mekaaninen kestävyys, p-%	96,6	97,4	96,8	91,8	92,6	96,8
Kosteus, M _{ar} , p-%	6,6	6,4	4,4	6,8	8,6	5,0
Irtotiheys, g/m ³	700	680	700	680	650	700
Tuhka, p-%	1,3	1,2	1,4	1,3	0,9	1,2
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	19,91	19,37	18,47	19,96	20,53	19,88
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	18,44	17,96	17,53	18,43	18,56	18,77
Energia-tiheys, MWh/i-m ³	3,61	3,38	3,40	3,49	3,34	3,64

Taulukko 4.53. Pölyjen räjähdysominaisuuksien vertailu (Wilén et al. 2013).

Pöly	Räjähdysspaine, P _{max} , bar g	Paineen nousu, K _{max} , m*bar/s	Raja-arvo happi-toisuudelle, LOC, %	Minimisyttymislämpötila, °C	
				Pölypilvessä	Kerroksessa
Torrefioitu puupöly (rankahake 245 °C)	9,0	150	11	460	330
Puupöly	9,1–10,0	57–100	10–12	420	340
Viljapöly	9,2	131		510	300
Turvepöly	9,1–11,9	120–157	13,5	470–590	305–340
Kivihillipöly	8,9–10,0	37–86	14	590–760	270–450

LOC = limiting oxygen concentration

Pölyjen räjähdysluokat ovat seuraavat: St0 (räjähtämätön), kun K_{max} = 0; St1 (heikko, normaali), kun K_{max} ≤ 200; St2 (voimakas), kun K_{max} = 201–300 ja St3 (kiivas), kun on K_{max} > 300. Taulukon 4.53 pölyt kuuluvat räjähdysluokkaan St1.

Upotuskokeessa höyryräjäytettyjä pellettejä upotettiin suodatinpussissa 15 minuuttia astiassa, jossa vettä oli kymmenen kertaa enemmän kuin pellettejä. Upotuksen jälkeen pellettejä valutettiin 15 minuuttia, minkä jälkeen määritettiin kosteus ja mekaaninen kestävyys kosteasta näytteestä (Korpijärvi et al. 2014). Taulukossa 4.54 on VTT:n menetelmällä tehtyjen kokeiden tuloksia (Björklund 2014).

Termisesti käsiteltyjen biomassapolttoaineiden tärkeimmät ominaisuudet ovat: suuri energiatiheys, jauhavuus (voidaan käyttää hiilimylyjä), mekaaninen kestävyys (kuljetus, vähäisempi pölyn muodostuminen) sekä hygroskooppisuus (imee vettä vähemmän). Pellettien kosteus vaihtelee välillä 1–9 p-%. Mekaaninen kestävyys on suomalaisista raaka-aineista valmistetuilla torrefioituilla pelleteillä 80–97,4 p-%. Höyryräjäytettyjen pellettien mekaaninen kestävyys on 98,0 p-% ja kestävyys on upotuskokeen jälkeen vain hiukan alentunut. Energiatiheys on termisesti käsitellyillä pelleteillä 3,0–4,1 MWh/irto-m³ (taulukot 4.52 ja 4.54). Termisesti käsitellyille tiivistetyille biomassapolttoaineille kehitetään omaa tuotestandardia SFS-EN ISO 17225-8.

Taulukko 4.54. Höyryräjäytettyjen pellettien ominaisuuksia ennen upotuskoetta ja sen jälkeen (Björklund 2014).

Pellettiraaka-aine	Havupuupelletti	Höyryräjäytetty, havupuu	Höyryräjäytetty, metsähake
Mekaaninen kestävyys ennen upotuskoetta DU, p-%	98,0	98,0	98,0
Irtotiheys BD, kg/m ³	617	739	746
Energiatiheys E, MWh/m ³	3,0	3,7	4,1
Kosteus ennen upotusta, p-%	5	5	5
Tuhka, p-% kuiva-aineessa	0,4	0,5	4,9
Upotettujen pellettien mekaaninen kestävyys, p-%	98,0	94,0	97,0
Kosteus upotuksen jälkeen, p-%	72	14	12

4.9 Kierrätyspuu

Suomessa käytetään kierrätyspuuta noin miljoona kiintokuutiometriä vuodessa. Käytöstä poistetulle puulle tai puutuotteelle eli ns. kierrätyspuulle (kuva 4.23) on kehitetty omat laatuohjeet vuonna 2008 (Alakangas & Wiik 2008) ja ohje on päivitetty vuonna 2014 (Alakangas 2014). Kierrätyspuun laatuohjeen piiriin kuuluvat kemiallisesti käsitellyt teollisuuden puutähteet, rakennustoiminnan ja jätteenkäsittelyn puutähteet sekä tienvarsipuusto. Kemiallisesti käsitellyksi luetaan mm. maalaus, pinnoitus, liimaus, laminointi. Lämmöllä, ilmalla tai vedellä käsittely ei ole kemiallista käsittelyä.

EU:ssa puhutaan paljon myös kaskadikäytöstä (cascading use), jossa puusta tehdään ensin tuote, jota sitten kierrätetään tai käytetään uudelleen alkuperäisen käytön jälkeen (Sokka et al. 2015, Alakangas et al. 2015). Näin pyritään lisäämään puun jalostusarvoa. Kun puutuotetta ei voi enää kierrättää tai uudelleen käyttää, se voidaan käyttää energiantuotantoon. Kaskadikäytölle on useita määritelmiä ja Suomen kannalta on tärkeä lukea mukaan myös tähteiden ja sivutuotteiden käyttö energiaksi ja määritelmät vaihtelevat esimerkiksi tähteiden ja sivutuotteiden energiakäytön osalta. Suomen puunjalostusteollisuuden tuotteista suuri osa viedään ulkomaille, jolloin kaskadikäyttö kotimaassa on vähäisempää.



Kuva 4.23. Kierrätyspuuta jätteenkäsittelylaitoksella. Kuva: VTT.

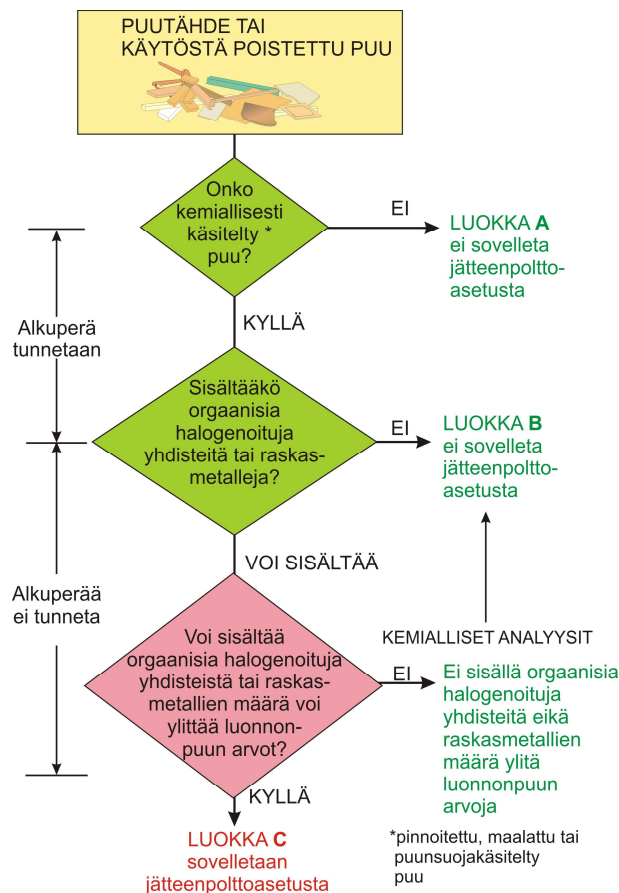
Tämä ns. käytöstä poistettu puu luokitellaan luokkiin A, B, C ja D taulukon 4.55 ohjeen mukaan. Kiinteät biopolttoaineet on jaettu kahteen luokkaan: A ja B ja ne kuuluvat standardin SFS-EN ISO 17225–1 piiriin eikä niihin sovelleta jätteenpoltoasetusta. Kemiallisesti käsittelemätön puutähde luokitellaan luokkaan A ja kemiallisesti käsitelty puu luokkaan B (315), jos se ei sisällä halogeenisia orgaanisia yhdisteitä tai raskasmetalleja puunkyllästysaineilla tai pinnoitteilla tehtyjen käsittelyjen seurauksena enempää kuin luonnonpuu. Luokkaan C kuuluu puutähde, joka sisältää orgaanisia halogenoituja yhdisteitä ja raskasmetalleja enemmän kuin luonnonpuu, mutta ei sisällä puunkyllästysaineita (paineekyllästetty puu). Tällainen puujäte kuuluu kierrätyspolttoaineisiin (SFS-EN 15359:2013) ja siihen sovelletaan jätteenpoltoasetuksen normeja. Luokka D on puunkyllästysaineilla käsiteltyä puuta, joka on vaarallista jätettä.

Taulukko 4.55. Kierrätyspuun luokittelu eri laatuluokkiin (Alakangas 2014).

Luokka	Käytöstä poistetun puun raaka-aineet (SFS-EN ISO 17225-1)	Jätteenpoltoasetuksen soveltaminen
A	1.1 Luonnon- ja istutusmetsän puubiomassa sekä muu luonnonpuu 1.2.1 Kemiallisesti käsittelemätön teollisuuden puutähde 1.3.1 Kemiallisesti käsittelemätön käytöstä poistettu puu tai puutuote 1.1.7 Sekalainen puubiomassa maisemanhoidosta, puistoista, puutarhoista, hedelmätarhojen karsimisesta sekä makean veden uppotukit	Ei sovelleta
B	1.2.2 Kemiallisesti käsitelty puutähde, kuitutähde ja rakenneosat 1.3.2 Kemiallisesti käsitelty käytöstä poistettu puu tai puutuote	Ei sovelleta
C	Sisältää puuta, jonka pinnoitteessa tai puunsuoja-aineessa on orgaanisia halogeeniyhdisteitä (esim. PVC), mutta ei sisällä puunkyllästysaineita (ei ole painekyllästettyä, ei ole kestopuuta) tai jonka alkuperän toteaminen on hankalaa. Myös purkupuu kuuluu tähän luokkaan ellei toisin todisteta (esim. analyysin).	Sovelletaan
D	Vaarallinen jäte sisältää puuta, joka on käsitelty puunkyllästysaineilla.	

Käytöstä poistetussa puussa esiintyvät epäpuhtaudet voidaan jaotella mekaanisiin ja kemiallisiin epäpuhtauksiin. Mekaanisia epäpuhtauksia ovat muun muassa maa-aines, kivet, muovi, metallit, betoni ja lasi. Niille ominaista on, että ne voidaan yleensä erottaa raaka-aineesta lajittelulla tai polttoaineen tuotantoprosessin aikana, esimerkiksi metallit metallin erottimella (magneetti) ja kivet seulomalla. Kemialliset epäpuhtaudet ovat lähes aina kiinteä osa puumateriaalia, jolloin niiden erottaminen ja poistaminen on hyvin vaikeaa. Maalit, pinnoitteet, puunsuoja-aineet ja liimat luetaan käytöstä poistetun puun kemiallisiin epäpuhtauksiin.

Taulukoissa 4.56 ja tekstissä on kerrottu menettelyistä, joilla kunkin luokan polttoaine määritellään. Velvoittavat ominaisuudet ovat pakollisia ja opastavat vapaaehtoisia. Minimivaatimus sisältää vain velvoittavat ominaisuudet. Purkupuu kuuluu luokkaan C, mikäli ei voida laatu järjestelmän avulla tai ominaisuustiedoin osoittaa, että purkupuu on kemiallisesti käsittelemätöntä (esim. talon runkorakenteet, hirret). Kuvassa 4.24 esitetään päättelyketju, joka ohjaa toimintaa puutähteen luokittelussa.



Kuva 4.24. Vuokaavio luokkien A, B ja C todentamisjärjestyksestä. Lähde: Alakangas 2014.

Fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien analysointi ei ole tarpeen, mikäli eriteltävät ominaisuudet tunnetaan riittävän hyvin. Riittävä informaatio voi olla tieto polttoaineen alkuperästä tai polttoaineen käsitelystä, laatu järjestelmästä tai valmistusmenetelmästä saatu tieto. Tällaisia ovat mm. mekaanisesta metsäteollisuudesta tulevat puutuotteet ja niiden tähteet kuten vaneri-, lastu- ja MDF-levyt sekä muut vastaavat liimatut, maalattut tai pinnoitetut levyt. Tällöin taulukossa 4.56 lueteltuja analyysejä tehdään, kun tuotetta käytetään ensimmäisen kerran polttoaineena tai jos puuraaka-aine tai lisäaineet muuttuvat.

Luokan B puulle suositellaan, että typpi-, rikki- ja klooripitoisuudet sekä raskasmetallipitoisuudet (taulukko 4.56) analysoidaan vähintään puolivuositain yhdistetyistä kuukauden kokoomanäytteistä. Ensimmäisen toimintavuoden aikana suositellaan, että analyysit tehdään vähintään neljä kertaa vuodessa. Mikäli ko-

koomanäytteen analysoitu pitoisuus on yli 20 % korkeampi kuin taulukon 4.56 raja-arvo arseeni-, kromi- ja kuparipitoisuuden summa-arvon ja kadmiumin osalta, katsotaan ylitys merkittäväksi. Tällöin seuraavan puolen vuoden aikana analyysija tehdään useammin (vähintään 4 kertaa) ja laatuajrjestelmää parannetaan, jotta varmistetaan jatkossa käytöstä poistetun puun laatu. Samaa menettelyä voidaan noudattaa myös mekaanisille epäpuhtauksille.

A ja B luokan puupolttoaineiden ominaisuuksien luokitteluun ja alkuperän merkitsemiseen voidaan käyttää puupolttoaineiden laatuohjetta (Alakangas & Impola 2014). Puupolttoaineen laatuohjeessa on taulukot hakkeen ja murskeen laatuokille. Hake ja murske on jaettu kahteen ryhmään, jolloin kemiallisesti käsitellylle puulle (B luokka) on pakollisena tietona ilmoitettava myös typpi-, rikki- ja klooripitoisuus. Taulukossa 4.56 on myös muita alkuaineita, joiden pitoisuuksille on annettu raja-arvot. Taulukon 4.56 raja-arvoja sovelletaan vain kloorille, typelle, rikille ja raskasmetalleille. Velvoittavat ominaisuudet ovat pakollisia ja opastavat vapaaehtoisia. Kaliumin ja natriumin arvot ovat suositusarvoja (opastavia).

Taulukko 4.56. Raja-arvot luokan A, B ja C puulle (Alakangas 2014).

Ominaisuus	Raja-arvo kuiva- aineessa	Luonnonpuu, johon raja-arvo perustuu	Luokka A		Luokka B		Luokka C
			Velvoittavat	Opastavat	Velvoittavat	Opastavat	
Rikki, S	≤ 0,2 p-%	kuori, lehtipuu		X	X		X
Typpi, N	≤ 0,9 p-%	kuori, lehtipuu		X	X		X
Kalium, K	≤ 5 000 mg/kg (0,5 p-%)	kuori, lehtipuu				X	
Natrium, Na	≤ 2 000 mg/kg (0,2 p-%)	kuori, havupuu				X	
Kloori, Cl	≤ 0,1 p-%	²		X	X		X
"Raskasmetallit" Σ Arseni ¹ + Kromi+Kupari, As+ Cr+ Cu	≤ 70 mg/kg	kuori, havupuu Σ 74 mg/kg			X		X
Kadmium, Cd	≤ 1 mg/kg	kuori, havupuu			X		X
Elohopea, Hg	≤ 0,1 mg/kg	kuori, havupuu			X		X
Lyijy, Pb	≤ 50 mg/kg	kuori, havupuu			X		X
Sinkki, Zn	≤ 200 mg/kg	kuori, havupuu			X		X

¹ Arseenin arvo ei saa ylittää luokan B puulla 10 mg/kg huomioiden mittaustarkkuus ± 30 %.

² Luonnonpuun arvo ≤ 0,05 p-%

Luokan A kierrätyspuuta voidaan käyttää kaikissa kattilalaitoksissa, myös pienissä. Luokan B kierrätyspuuta voidaan käyttää kattilalaitoksissa, joissa polttotekniikan taso ja varustetaso on hyvä (riittävä viipymäaika ja lämpötilataso, palamisilman hallinta ja savukaasujen puhdistus) ja palamisen hyvyttä voidaan tarkkailla. Luokan B puuta suositellaan käytettävän seospolttoaineena ensisijaisesti kattilalaitoksissa, joiden teho on vähintään 20 MW_{th}. Nykyään lainsäädännössä (750/2013) polttotekniikan taso on edellä vaaditun kaltainen myös pienemmissä, yli 5 MW_{th} uusissa laitoksissa. Yli 50 MW_{th} laitoksille sovelletaan Valtioneuvoston asetusta vähintään 50 megawatin polttolaitoksien päästöjen rajoittamisesta (93/2013).

Liitteeseen F on koottu eri kierrätyspuun ominaisuuksia. Levytuotteiden ominaisuuksia on lueteltu taulukossa 4.57 ja huonekalupuun taulukossa 4.58. Taulukossa 4.59 on vertailtu kierrätyspuun ominaisuuksia luonnonpuuhun. Ominaisuudet vaihtelevat puutähteen alkuperän mukaan.

Taulukko 4.57. Kierrätyspuun ominaisuuksia (Linna & Kolsi 1992, Vesterinen 1995 ja kierrätyspuuhjeen laadintaan haastatellut yritykset).

Ominaisuus	Liima- puu	Lastu- levy	Vanerinsyrjä			MDF- levy	Kreosootti- kyllästetty puu	CCA- kyllästetty kierrätys- puu**
			1	2	3			
Kosteus, p-%	13,5		21,9	8,6		4,7		
Tehollinen lämpö- arvo, MJ/kg, k.a.	18,3	18,6	19,1	19,08		18,7	19,8	18,9
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%								
Tuhka	1,8	1,6	0,96	1,2	1,6	0,3	4,0	1,4
Hiili, C	48,6	48,8	50,6	50,9			52,3	50,4
Vety, H	6,1	5,9	5,9	5,9			5,9	6,1
Typpi, N	3,0	0,31*	0,10	0,2	< 0,2		0,19	0,13
Rikki, S	0,05	0,02	0,01		< 0,02	0,03	0,07	0,02
Kloori, Cl	0,011		0,01	0,003	0,009		0,008	0,009
Fluori, F	< 0,002							
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, mg/kg								
Kalsium, Ca			3 069					
Rauta, Fe			30,5					
Kalium, K	593		297	900	700		829	198
Mangaani, Mn	81		71,8				115	81
Natrium, Na	568		2 349	5 100	3 100		717	68
Arseeni, As	< 2			< 0,5	< 0,5		5,5	2 022
Kadmium, Cd	0,12			0,05	0,05		< 0,1	0,31
Kromi, Cr	17			0,98	0,51		22	5 272
Kupari, Cu	4,6			0,87	0,97		6,1	1 911
Elohopea, Hg	< 2			< 0,5	< 0,05		0,13	0,15
Nikkeli, Ni	9,6						7,8	3,6
Lyijy, Pb	4,4			< 0,5	< 0,5		2,4	1,8
Sinkki, Zn	80			8,2	9,7		19	12

* nykyisten lastulevyjen arvioidaan sisältävän kymmenkertaisen määrän typpeä

**CCA: kupari, kromi, arseeni (kylläste)

Taulukko 4.58. Huonekalupuun analyyseja (Larjava et al. 1995).

Polttoainenäyte	Lastulevyypitoinen puru	Lastulevyypuru	Kutterinlastupuruseos
Kosteus,%	7,5	5,8	22,2
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	18,4	18,6	19,0
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%			
Tuhka	0,75	1,64	0,42
Hiili, C	48,8	48,8	49,9
Vety, H	5,84	5,87	6,02
Typpi, N	0,54	0,31	0,2
Rikki, S	0,02	0,02	0,02

Taulukko 4.59. Yhteenveto kierrätyspuun ja luonnonpuun ominaisuuksista kuiva-aineessa (Alakangas & Wiik 2008, VTT ja laatuohjeeseen haastatellut yritykset).

Ominaisuus	Kierrätyspuu	Luonnonpuu
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,6–20,7	17,1–20,6
PITOISUUS, p-%		
Tuhka	0,3–10,6	0,2–10,0
Hiili, C	48,1–50,4	47–55
Vety, H	5,8–6,5	5,3–7,0
Typpi, N	0,23–2,86	<0,1–1,2
Rikki, S	< 0,02–0,08	< 0,01–0,20
Kloori, Cl	0,02–0,16	< 0,01–0,01
Fluori, F	< 0,01	< 0,0005–0,002
PITOISUUS, mg/kg		
Alumiini, Al	100–600	10–3 000
Rauta, Fe	350–1 070	500–2 000
Kalium, K	240–900	200–5 000
Magnesium, Mg	ei saatavilla	100–3 000
Mangaani, Mn	72–115	9–840
Natrium, Na	200–5 100	10–2 000
Fosfori, P	26–340	50–1 300
Pii, Si	ei saatavilla	2–20 000
Titaani, Ti	ei saatavilla	1–50
Arseeni, As	< 0,1–54	< 0,1–4,0
Kadmium, Cd	0,12–0,94	< 0,05–5,0
Kromi, Cr	0,2–81,0	0,2–40,0
Kupari, Cu	5,5–47,0	0,5–400,0
Elohopea, Hg	< 0,03–0,14	< 0,02–2,0
Nikkeli, Ni	1,0–19,0	< 0,1–80,0
Lyijy, Pb	1,7–150,0	< 0,5–50,0
Vanadiini, V	0,5–13	0,7–3,0
Sinkki, Zn	27–230	5–200
Tina, Sn	0,42–6,0	
Tallium, Tl	< 0,01–1,0	
Koboltti, Co	0,4–2,7	
Antimoni, Sb	0,5–8,0	
Barium, Ba	24–120	

Liitteessä E on lisää kierrätyspuun ominaisuuksia.

5. Mustalipeä

Sulfaattimenetelmä on kehittynyt merkittävimmäksi kemiallisen massan valmistusmenetelmäksi. Menetelmässä poistetaan epäorgaanisten keittokemikaalien (natriumhydroksidi NaOH ja natriumsulfidi Na₂S) avulla suurin osa raaka-ainepuun selluloosakuituja toisiinsa sitovasta ligniinistä voimakkaasti alkalisisissä olosuhteissa. Tämä ei kuitenkaan tapahdu täysin selektiivisesti, vaan osa selluloosasta ja puun muista hiilihydraattikomponenteista (glukomannaanit ja ksylaani) muuntuu samanaikaisesti alifaattisiksi karboksyylihapoiksi. Puun hiilihydraatteihin kohdistuvien saantohäviöiden takia noin puolet puun kuivasta massasta liukenee keittoliemeen. Keittoliemen, ns. mustalipeän, kuiva-aine sisältää siten epäorgaanisen aineksen lisäksi pääasiassa pilkkoutunutta ligniiniä ja hiilihydraattipohjaisia karboksyylihappoja (taulukko 5.1). Lisäksi mustalipeässä esiintyy vähäisiä määriä uteainefraktoita. Mustalipeän kemiallinen koostumus (erityisesti epäorgaanisen aineksen määrä) sekä ominaisuudet vaihtelevat kuitenkin merkittävästi ja niihin vaikuttavat mm. lipeän kuiva-aineosuus, raaka-aineen laatu (havu- ja lehtipuuhaake), sovellettu keittomodi- fikaatio sekä tehtaan prosessivesien kierrätysaste. (Raiko et al. 2002.)

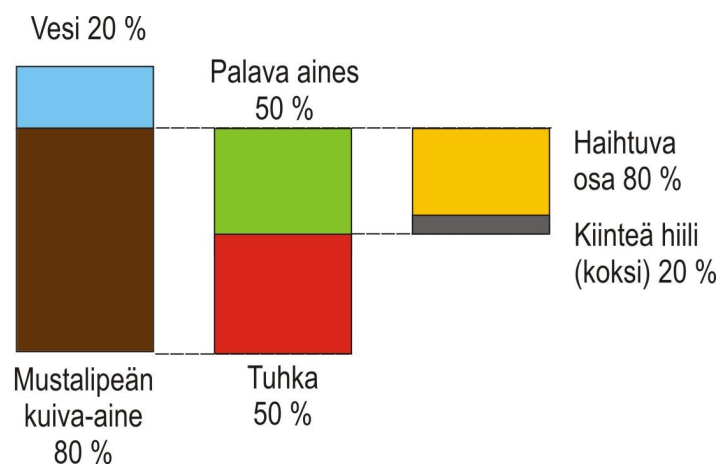
Taulukko 5.1. Tyypillisen mänty- ja koivusulfaattimustalipeän koostumus p-% kuiva-aineessa (Raiko et al. 2002).

Aineosa	Mänty	Koivu
Orgaaninen aines	67	67
- Ligniini	31	25
- Alifaattiset karboksyylihapot	29	33
• Muurahaishappo	6	4
• Glykolihapo	4	8
• Etikkahappo	2	2
• Maitohappo	3	3
• 2-hydroksivoihappo	1	5
• 3,4-dideoksipentonihapo	2	1
• 3-deoksipentonihapo	1	1
• Ksyloisosakkariinihapo	1	3
• Glukoisosakkariinihapo	6	3
• Muut	3	3
- Muu orgaaninen aines	7	9*
• Uuteaineet	4	3
• Poly- ja oligosakkaridit	2	5
• Muut	1	1
Epäorgaaninen aines	33	33
- Epäorgaaniset yhdisteet	22	22
- Orgaanisesti sitoutunut natrium	11	11

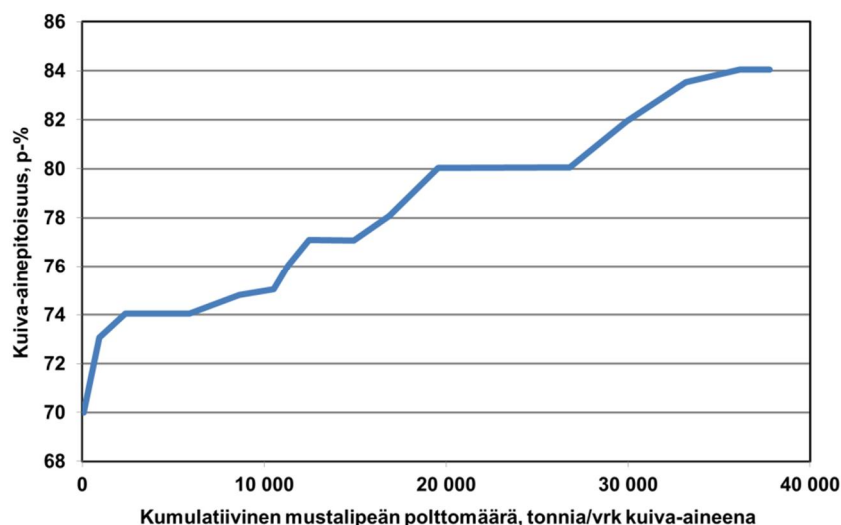
*Muutettu alkuperäisestä lähteestä 7 → 9.

Kuiduista keiton jälkeen erotetun mustalipeän kuiva-ainepitoisuus on vain noin 15 p-%, jolloin siitä käytetään nimitystä "heikko lipeä". Kuiva-ainepitoisuutta kohotetaan erityisissä haihdutusyksiköissä, joiden jälkeen kuiva-ainepitoisuus on noin 60–85 p-% ("vahva lipeä"). Tämän jälkeen mustalipeä pumpataan noin kiehumispisteessään soodakattilaan, jossa keittokemikaalit regeneroidaan sekä tuotetaan samalla höyryä sähköntuotantoon ja tehtaan prosesseihin. Lämmitys on tarpeen, sillä vahva mustalipeä on hyvin viskoosi neste, jota ei voi huoneenlämpötilassa pumpata. (Raiko et al. 2002.)

Kuvassa 5.1 on esitetty Suomen sellutehtaille tyypilliset mustalipeän peruspolttoaineominaisuudet. Suomalaisissa soodakattiloissa kuiva-ainepitoisuus on nykyisin korkea, noin 75–85 % (kuva 5.2). Vielä 1980-luvun alkupuolella tyypillinen kuiva-ainepitoisuus oli 65 p-%. Kuiva-ainepitoisuuden kasvattaminen parantaa kattilalahyötysuhdetta, vähentää rikkipäästöjä sekä pienentää tarvittavaa kattilakokoa – tai vaihtoehtoisesti mahdollistaa kapasiteetin kasvattamisen. Kuiva-ainepitoisuuden kasvattamista rajoittaa mm. viskositeetin nousu, haihduttamon likaantuminen sekä haasteet riittävän keon ylläpidossa kattilassa (Vakkilainen 1993 ja 2000).



Kuva 5.1. Mustalipeän peruspolttoaineominaisuudet (Raiko et al. 2002, osa lukuarvoista päivitetty).
Kuva: VTT.



Kuva 5.2. Polttoliipeän kuiva-ainepitoisuus Suomen sellutehtaissa vuonna 2004 (Suomen Soodakattilayhdistys ry 2010).

Kuiva-aineesta noin puolet on pääosin keittokemikaaleista koostuvaa, tuhkaa muodostavaa ainesta (taulukko 5.2) ja puolet orgaanista, palavaa ainesta. Palavasta aineksesta noin viidennes on kiinteää hiiltä ja loput haihtuvia aineita (Raiko et al. 2002). Haihtuvien aineiden osuuden analysointi mustaliipeästä ei kuitenkaan ole kovin yleistä eikä sille ole laajasti käytettyä standardimenetelmää (Vakkilainen 2000). Mustaliipeän kalorimetrinen lämpöarvo kuiva-aineessa on tyypillisesti 13–15 MJ/kg (taulukot 5.2–5.3).

Taulukko 5.2. Pohjoismaisten mustaliipeiden kuiva-aineen tyypillisiä ominaisuuksia ja vaihteluvälejä (Vakkilainen 2000).

	Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg		Tuhkapitoisuus, p-%		Sulfiditeetti $\text{Na}_2\text{S}/(\text{Na}_2\text{S}+\text{NaOH})$, mol/mol	Haihtuvat aineet*, p-%
	Tyypillinen	Vaihteluväli	Tyypillinen	Vaihteluväli	Tyypillinen	
Havupuu	14,2	13,3–14,8	49	46–52	35	28
Lehtipuu	13,5	13,0–14,3	51	48–54	37	30

*kokeellinen metodi

Taulukko 5.3. Eräissä suomalaisissa soodakattiloissa poltettavien lipeiden keskimääräiset kuiva-ainepitoisuudet ja lämpöarvot (Juvonen 2004).

Kattila	Lipeälaji	Kuiva-ainepitoisuus, p-%	Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.
A	Havu	80	13,5
B	Havu	80	13,5
C	Seka	80	12,5
D	Seka	74	13,7
E	Seka	74	13,7
F	Havu	80	13,3
G	Seka	77	13,0
H	Seka	77	13,0
I	Havu/Koivu/Seka	77	13,2
J	Havu	78	13,0
K	Havu/Seka	82	13,7
L	Havu/Koivu/Seka	70	13,7
M	Havu/Koivu/Seka	80	13,7
N	Havu	75	14,1

Mustalipeän alkuainekoostumuksia on esitetty taulukoissa 5.4–5.6. Keittokemikaalien vuoksi mustalipeän kemiallinen koostumus poikkeaa merkittävästi muista puupolttoaineista. Tämä ilmenee korkeana epäorgaanisen aineksen määränä sekä sen poikkeavana koostumuksena. Tyypillisesti natriumin, kaliumin, rikin ja kloorin summa on 25–29 p-% kuiva-aineesta (Vakkilainen 2000). Mustalipeän epäorgaaniset pääkomponentit ovat Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , Na_2S , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, NaOH ja myös NaCl tapauksissa, joissa klooria on talteenottosysteemissä (KnowPulp 2013).

Poikkeavasta tuhkan koostumuksesta johtuen mustalipeätuhkan sulamislämpötila on alhainen, noin 750 °C. Tästä aiheutuu kattiloiden lämmönsiirtopintojen likaantumista ja korroosiota. Vieraiden aineiden – lähinnä kloorin ja kaliumin – läsnäolo vaikuttaa sulamiskäyttäytymiseen ratkaisevalla tavalla. Sekä kalium että kloori laskevat pölyhiukkasten sulamislämpötila-alueita ja erityisesti kloorilla on merkittävä korroosiota kiihdyttävä vaikutus. Yhä tehokkaampi jätevesien palautus takaisin kiertoön (prosessin sulkeminen) on lisännyt vieraiden aineiden rikastumista ja onkin mahdollista, että tulevaisuudessa prosessiin lisätään vaiheita, joilla näitä vieraita aineita voidaan poistaa kierrosta. (Raiko et al. 2002.)

Taulukko 5.4. Neitseellisen pohjoismaisen mänty- ja koivuperäisen mustalipeän koostumus painoprosentteina kuiva-aineessa (Vakkilainen 2000).

	Mänty		Koivu	
	Tyypillinen	Vaihteluväli	Tyypillinen	Vaihteluväli
Hiili, C	35,0	32–37	32,5	31–35
Vety, H	3,6	3,2–3,7	3,3	3,2–3,5
Typpi, N	0,1	0,06–0,12	0,2	0,1–0,2
Happi, O	33,9	33–36	35,5	33–37
Natrium, Na	19,4	18–22	19,8	18–22
Kalium, K	1,8	1,5–2,5	2,0	1,5–2,5
Rikki, S	5,5	4–7	6,0	4–7
Kloori, Cl	0,5	0,1–0,8	0,5	0,1–0,8
Inertti aines	0,2	0,1–0,3	0,2	0,1–0,3
Summa	100		100	

Taulukko 5.5. Åbo Akademin tietopankista poimittuja Suomen tehtaiden mustalipeiden analyysituloksia.

Ominaisuus	Lehtipuu (1999)	Havupuu (1999)	Sekapuu (2009)	Sekapuu (2009)	Sekapuu (2009)
Kuiva-aines, p-%	74,5	77,9	81,3	80,8	82,2
KUIVA-AINEESSA, p-%					
Hiili, C	32,5	32,2	31,4	32,2	31,0
Vety, H	3,2	3,3	3,1	3,3	3,1
Typpi, N	0,08	0,04	0,11	0,09	0,10
Natrium, Na	20,7	20,7	21,6	21,4	21,8
Kalium, K	2,3	2,7	2,4	2,4	2,3
Rikki, S	7,4	6,3	6,6	6,4	6,6
Kloori, Cl	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	12,74	13,01	12,85	13,17	12,81

Taulukko 5.6. Mustalipeän koostumuksia kuiva-aineessa (Söderhjelm et al. 1989).

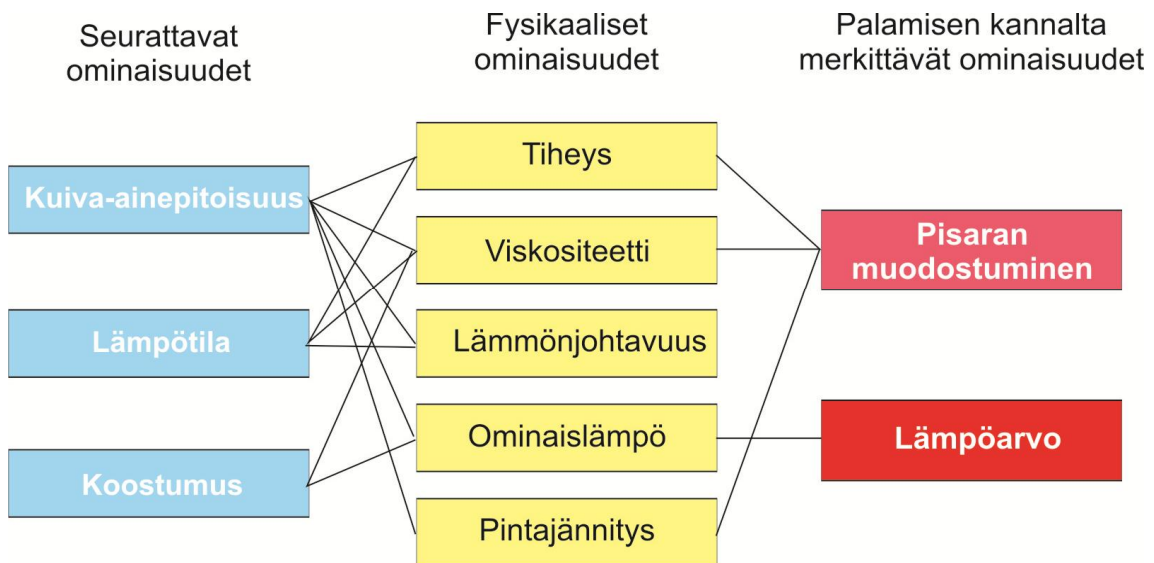
Ominaisuus	Tehdas 1	Tehdas 2	Tehdas 3	Tehdas 4	Tehdas 5	Tehdas 6
Lipeälaji	Lehtipuu	Havupuu	Lehtipuu	Havupuu	Lehtipuu	Lehtipuu
Tuotteen kappaluvun tavoite	~20	30–32	~22	~34	~20	~15
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	-	14,1	11,9	15,4	13,2	13,2
PITOISUUDET, p-%						
Tuhka (700 °C)	50,3	47,9	55,8	44,8	51,8	48,9
Hiili, C	32,8	35,8	30,5	37,8	33,3	33,4
Vety, H	3,3	3,5	3,4	4,2	3,6	3,9
Typpi, N	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
Rikki, S	4,6	4,1	6,4	4,8	5,4	4,4
Natrium, Na	20,7	19,9	21,0	17,9	19,9	20,7
Kalium, K	-	1,1	1,1	1,2	1,5	1,7
Kalsium, Ca	-	0,006	0,02	0,007	0,02	0,01
Kloori, Cl	-	0,2	0,7	2,9	0,6	0,25
Pii, Si	-	0,03	0,05	0,04	0,03	0,08
Natriumvetysulfidi, NaHS	4,3	5,3	4,2	5,5	3,8	3,2
Natriumhydroksidi, NaOH ¹⁾	1,8	6,3	2,0	4,3	3,0	2,4
Natriumsulfaatti, Na ₂ SO ₄	-	2,3	-	2,3	5,8	3,4
Natriumkarbonaatti, Na ₂ CO ₃	12,5	8,0	12,3	5,1	8,9	10,0
Teholliset alkalit ^{1,2)}	4,9	10,0	5,0	8,2	5,7	4,7
Mäntyljy	0,26	-	0,22	0,45	0,88	1,6
Ligniini	36,0	-	31,2	-	29,7	33,7
Karboksylihapot	9,4	-	8,7	-	7,8	-
Ligniini-hiilihydraattikompleksi, p-%	11,0	7,0	10,0	9,0	13,0	-
Polysakkaridit, p-%	5,0	2,8	3,6	2,2	1,6	-
Korkeamoolimassaisten yhdisteiden osuus ligniinistä ³⁾ , p-%	5	-	5	11	4	3
TGA (termogravimetrinen analyysi)						
- 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

¹⁾ Arvot ovat korkeita, mutta vertailukelpoisia. ²⁾ Laskettu NaOH:na. ³⁾ Niiden yhdisteiden, joiden moolimassa on yli 10 000 g/mol, osuus kokonaisligniinistä prosentteina.

Kemiallisen ominaisuuksien lisäksi mustalipeän polttoon vaikuttavat myös monet fysikaaliset ominaisuudet kuten tiheys, viskositeetti, lämmönjohtavuus, ominaislämpö ja pintajännitys. Käytännön kannalta tärkein fysikaalinen ominaisuus on viskositeetti, joka vaikuttaa pumpattavuuden lisäksi mm. haihduttamon lämmönsiirtoon ja haihdutusnopeuteen sekä pisaran muodostukseen lipeäsuuttimilla. Viskositeetti on pidettävä alle 0,5 Pa·s tason lämmityksellä tai muilla keinoin (Raiko et al. 2002). Mustalipeän viskositeettiin vai-

kuttaa lämpötilan lisäksi vahvasti myös kuiva-ainepitoisuus. Myös lipeän koostumuksella ja mahdollisella esikäsitteilyllä (lämpökäsittely, esihapetus) on vaikutusta. Lehtipuulipeän, eli Suomessa useimmiten koivu-
 lipeän, viskositeetti on korkeampi kuin havulipeän. Myös sekalipeän viskositeetti on usein korkeampi kuin havulipeän. (Juvonen 2004.)

Mustalipeän fysikaalisten ominaisuuksien määrittäminen ovat vielä osin tutkimuksen kohteena (Raiko et al. 2002). Mustalipeän kuiva-ainepitoisuuden, koostumuksen ja lämpötilan perusteella voidaan arvioida myös fysikaalisia ominaisuuksia usein riittäväällä tarkkuudella (kuva 5.3) (KnowPulp 2013).



Kuva 5.3. Mustalipeän tärkeimpien fysikaalisten ominaisuuksien suhde seurattaviin ja palamisen kannalta merkittäviin ominaisuuksiin. Lähde: KnowPulp 2013. Kuva: VTT.

6. Turve

6.1 Turvevarat ja käyttö

Geologian tutkimuskeskus (GTK) sekä Luonnonvarakeskus (Luke) selvittävät Suomen turvevaroja. Turvevarojen tiedot ovat hiukan erilaisia eri lähteissä. Metsätalastollisen vuosikirjan 2014 mukaan soiden metsätieteellinen pinta-ala on noin 8,8 miljoonaa hehtaaria, johon on lisättävä maatalouden käytössä olevat suot 0,25 miljoonaa hehtaaria ja tuotannossa oleva turveala 0,06 miljoonaa hehtaaria. Luonnontilaisia soita on Suomessa 3,91 miljoonaa hehtaaria, josta on suojeltuja 1,2 miljoonaa hehtaaria (www.YM.fi/soidensuojeluohjelma, 2014), metsätaloudessa (ojitettuna) on 4,68 miljoonaa hehtaaria, maatalouden käytössä on 0,25 miljoonaa hehtaaria ja turvetuotannossa on 0,07 miljoonaa hehtaaria (YM, ympäristöluparekisteri). Turvetuotantoalasta suurimmalla osalla tuotetaan energiaturvetta. Muun kuin energiaturpeen tuotantoala on vajaa 10 % (Bioenergia ry). Turvetuotantokäytöstä on viime vuosina poistunut 2000–3000 ha ja uutta lainvoimaistunutta tuotantoalaa saatu 1000–2000 ha (Bioenergia ry).

Soiden kokonaisalasta on ojitettu noin 4,1 miljoonaa hehtaaria eli 34,1 %. Metsätalastoissa suoksi käsitetään alue, jossa turvetta ja/tai pintakasvillisuudesta yli 75 % on 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, Metsätalastollinen vuosikirja 2014, Leinonen 2010).

Biologisesti määriteltyä suota on Suomessa ollut 1920-luvulla 12 miljoonaa hehtaaria ja 1950-luvulla tehdyssä inventoinnissa 10,4 miljoonaa hehtaaria. 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 5,1 miljoonaa hehtaaria. Yli 20 hehtaarin suuruisten soiden sitoma hiilimäärä on arviolta 3,2 mrd tonnia. Turpeen tuotantoon soveltuvien soiden energia on nykyisin vain n. 6 400 TWh, josta on jo käytetty mahdollisesti n. 500–700 TWh eli jäljellä voisi olla maksimissaan noin 5 800 TWh. Suokuutiosta saadaan energiaa keskimäärin 0,54 MWh. Suomen soiden turvemäärä on noin 69,3 mrd suo-m³, josta kuiva-ainemäärä on 6,3 mrd tonnia (87 kg k.a/suo-m³). Yli 2 m syvien soiden turvemäärä on 34,08 mrd suo-m³, yli 50 ha ja 2 m syvyisten soiden turvemäärä on 23,7 mrd suo-m³. Yli 2 m syviä 50 hehtaarin soita on yhteensä noin miljoonaa hehtaaria. Soiden keskisyvyys on 1,4 metriä. Turvetuotantoon teknisesti soveltuva suoala on 1,2 miljoonaa hehtaaria. Nykyisten suojeleohjelmien ja ympäristölainsäädännön huomioimisen jälkeen turvevaroista noin puolet arvioidaan oleva käytettävissä turvetuotantoon (Lappalainen & Hänninen 1993, Metsätalastollinen vuosikirja 2014, Alakangas et al. 2011, Virtanen et al. 2003, Leinonen 2010, Virtanen 2011).

Soiden soveltuvuus turvetuotantoon määritellään seuraavilla seikoilla (Alakangas et al. 2011)

- turpeen paksuus
- turvelaji
- pohjamaalaji
- pinnan ja pohjan korkeus
- turpeen ominaisuudet (tiheys, lämpöarvo, tuhka- ja rikkipitoisuus ja raskasmetallit)

Turpeen käyttö on ollut 2010-luvulla 14,4–26,3 TWh vuodessa. Turpeen käyttö on ollut ympäristötavoitteiden sallimissa rajoissa ja käytön tavoitteeksi on linjattu noin 20 TWh. 1980-luvulla Suomessa tuotettiin turvepellettejä, -koksia ja -brikettejä. Turvepellettejä tuotettiin 18 000 tonnia vuonna 2013 (85 GWh), mutta turvekoksin ja -briketin tuotanto on loppunut Suomessa (Metsätilastollinen vuosikirja 2014).

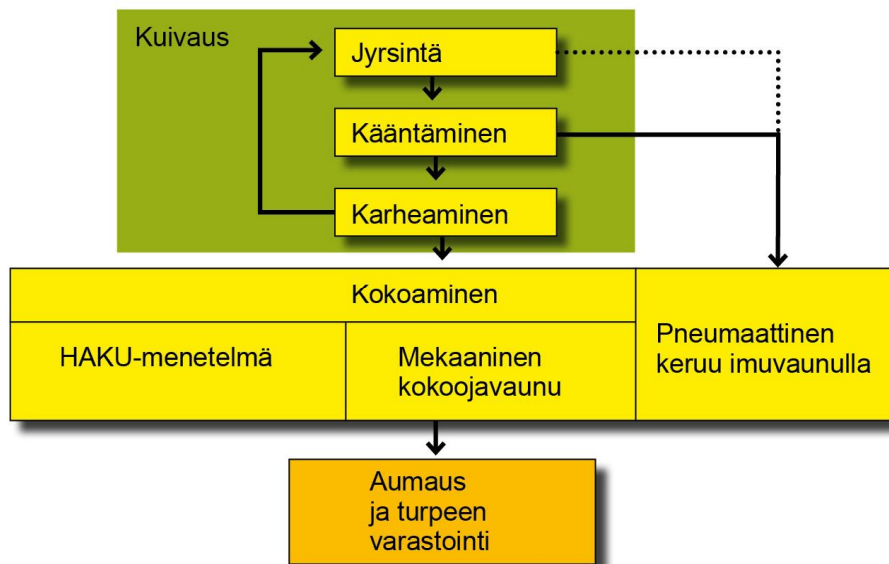
6.2 Jyrsinturve

Energiaturpeen tuotannosta on jyrsinpolttoturpeen osuus yli 90 %. Jyrsinturpeen tuotantomenetelmien päävaiheet ovat jyrsintä, kääntäminen, karheaminen ja kokoaminen (kuva 6.1). Eri tuotantomenetelmät eroavat toisistaan kokoamisvaiheen perusteella. Jyrsinnässä turvekentän pinnasta irrotetaan ohut kerros auringon säteilyenergialla kuivaamista varten. Turpeen kuivumista voidaan nopeuttaa pyrkimällä suureen raekokoon jyrsintävaiheessa. Jyrsöksen kääntäminen nopeuttaa myös kuivumista (kuva 6.2).

Tuotantomenetelmiä ovat Haku-menetelmä, mekaaninen kokoojavaunumenetelmä ja imuvaunumenetelmä. Haku-menetelmässä kuiva karhettu turve kuormataan hihnakuormaajalla traktorien vetämiin turveperävaunuihin, joilla turve kuljetetaan aumaan varastoitavaksi. Imuvaunu- ja kokoojavaunumenetelmässä kuivan turpeen keräävä vaunu myös kuljettaa turpeen varastoaumalle. Imuvaunu kerää jyrsinturpeen kentältä säiliöön pneumaattisesti.

Haku-menetelmällä tuotetaan nykyisin vajaa puolet jyrsinturpeesta, mekaanisella kokoojavaunumenetelmällä noin puolet ja imuvaunumenetelmällä noin kymmenesosa. Haku-menetelmässä voidaan useita jyrsöksiä koota samalle karheelle ja kuormata ne yhtä aikaa. Näin voidaan hyödyntää hyvät poutajaksot tehokkaasti turpeen kuivaukseen ja käyttää heikommat sääolot karheiden kuormaukseen ja turpeen aumaukseen (Alakangas et al. 2011). Vaunumenetelmiä käytetään erityisesti pinta-alaltaan pienemmillä soilla ja turvekerroksen mataloitumisen vuoksi rikkonaisemmillä soilla kuin Haku-menetelmää.

Jyrsinturvetta käytetään kaukolämpölaitoksissa ja yhdyskuntien ja teollisuuden voimalaitoksissa. Viime vuosina turpeen käyttäjät ovat lisänneet puupolttoaineiden käyttöä ja turpeen merkitys seospolttoaineena puun tai kierrätyspolttoaineiden kanssa on korostunut.



Kuva 6.1. Jyrsinturpeen tuotantomenetelmät (Alakangas et al. 2011).



Kuva 6.2. Jyrsinturpeen kääntäminen. Kuva: Vapo Oy.

6.3 Palaturve

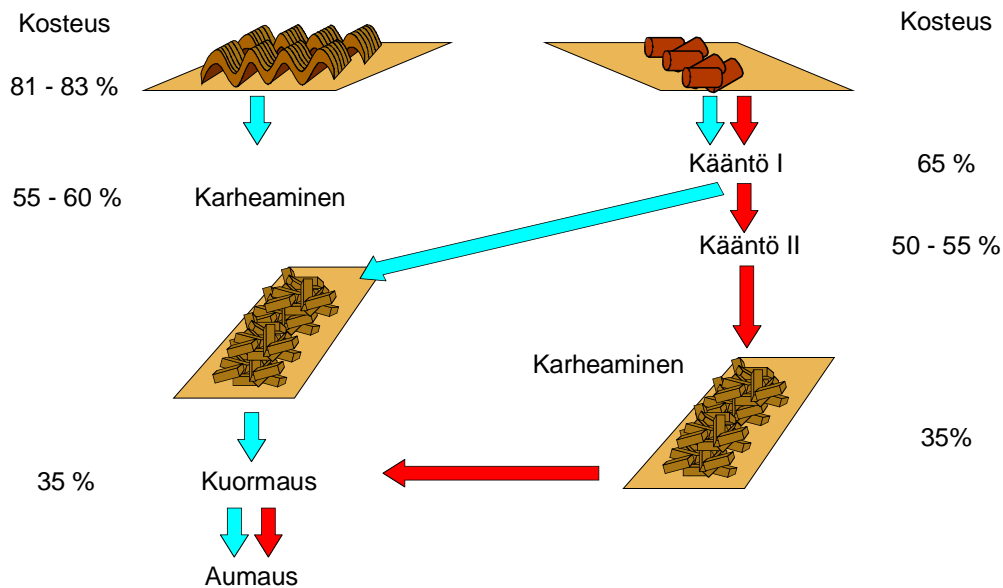
Palaturpeen tuotantomenetelmän (kuva 6.3) ensimmäisessä työvaiheessa palaturvekoneella jyrjitään kenttään ura, josta irrotettu turvemassa muokataan, tiivistetään ja puristetaan suutinosan läpi palaturpeeksi kuivumaan kentän pinnalle. Jyrsintä tapahtuu joko nostokiekolla tai nostoruuvilla yleensä noin 0,5 m syvyydeltä. Yleisimmät palamuodot ovat sylinteripala eli ns. lieriöpala ja lainepala (Alakangas et al. 2011).

Tuotantomenetelmästä riippuen palat joko käännetään kuivumisen nopeuttamiseksi ja kuivataan kentällä tai karhetaan puolikuivana ja kuivataan karheella tavoitekosteuteen. Palaturve kuivataan yleensä vähintään 35 % kosteuteen, mutta on myös käyttäjiä, jotka vaativat palaturpeen vielä tätäkin kuivempaan. Kuiva palaturve kerätään aumoihin palaturvekuormaajan ja perävaunujen tai kokoojavaunun avulla. Aumat muotoillaan ja peitetään.

Palaturvetuotannon riippuvuus säistä on pienempi kuin jyrsinturvetuotannon. 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 nopeampi kuivuminen isoon palaan verrattuna. Saantoon vaikuttaa myös hävikki, jota syntyy jokaisessa työvaiheessa paloja käsiteltäessä. Palaturvesaanto satoa kohti on 150–300 m³/ha.

Palaturvetta käytetään kiinteistöjen, kaukolämpökeskusten että suurempien voimalaitoksien polttoaineena.



Kuva 6.3. Palaturpeen tuotantomenetelmät (Alakangas et al. 2011).

6.4 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 maatuneita, karkeita kasvinosia (liekokuuta, varpuja yms.).

Käytettäessä turvetta energialähteenä on tärkeää tietää turpeen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Keskeisimpiä ominaisuuksia ovat lämpöarvo ja kosteus sekä polttoaineen käsittelyyn vaikuttavat ominaisuudet kuten tiheys ja palakoko. Silloin kun polttoainekauppaa käydään suuressa mitassa, määritetään tärkeimmät ominaisuudet laboratoriokokein. Pienkauppaa varten voidaan ominaisuuksien arvioimiseksi käyttää valmiita taulukoita ja graafisia kuvaajia polttoaineen keskimääräisistä ominaisuuksista ja ominaisuuksien välisistä riippuvuus-suhteista. Turpeen laatuluokittelu on esitetty Nordtest-menetelmässä NT ENVIR 009:fi ja liitteessä G.

Sopivilla kuljetus-, käsittely- ja varastointimenetelmillä on erittäin suuri merkitys energiaturpeen toimituslaadulle. Niillä varmistetaan myös se, että polttoainetta varastoidaan oikeissa olosuhteissa. Kaikkien polttoaineen toimitusketjun toimijoiden on pyrittävä välttämään polttoaineen laatua heikentäviä toimia (loppuvarastoinnin osalta myös loppukäyttäjän) kuten epäpuhtauksia, ylisuuria kappaleita, hienoaineksen lisääntymistä. Esimerkkejä epäpuhtauksista ovat kivet, multa, metallikappaleet, muovit, jää ja lumi. Laatua voi heikentää myös kosteuden imeytyminen palaturpeeseen ja pelletteihin.

Myytävän energiaturpeen koko ja muoto vaihtelevat. Koko ja muoto vaikuttavat polttoaineen käsittelyyn sekä sen palamisominaisuuksiin. Polttoainetta voidaan toimittaa esimerkiksi taulukossa 6.1 esitettyinä kauppanimikkeinä.

Polttoaineen paino määritetään pääosin voimalaitoksella autovaa'alla ja kosteus polttoainenäyttein. Turvetuotannossa polttoaineen määrä määritetään kuutiometreinä turveaumassa (Fagnäs et al. 1980, Impola 1983, Impola et al. 1986).

Kuvassa 6.4 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 ruskosammalturpeisiin (B). Nämä kasvit voivat yksinään muodostaa turvelajin. Usein turvelaji kuitenkin koostuu kahdesta pääturvelajista. Turpeen eräs tärkeä ominaisuus on maatumisaste. Maatumisaste ilmoi-

enemmän ligniiniä kuin rahkaturpeessa. Maatumisasteen kasvaessa lisääntyy ligniinin määrä, mutta selluloosan ja hemiselluloosan pitoisuudet alenevat. Turpeessa on vetyä 5–6,5 %, happea 30–40 %, rikkiä alle 0,3 % ja typpeä 0,2–3,1 %. Turpeen rikkipitoisuus on yleensä 0,1–0,2 %. Joillakin alueilla, erityisesti Pohjois-Karjalassa ja Länsi-Lapissa, rikkipitoisuus voi olla runsaasti yli 0,3 %. Suuren hiilipitoisuuden takia turve palaa ”hitaammin” kuin puu (Berggren et al. 1980, Blomqvist et al. 1984, Impola 1983, Impola et al. 1986, Moilanen & Ranta 1983, Herranen 2009) (taulukot 6.2 ja 6.3).

Haihtuvia aineita turpeessa on vähemmän kuin puussa eli 56–74 %. 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 tuhkapitoisuus kuitenkin yleensä lisääntyy, mikä ainakin teoriassa alentaa lämpöarvoa. Turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on noin 19,0–22,6 MJ/kg (taulukko 6.3).

Taulukon 6.3 näytteet on otettu toimitusten yhteydessä vastaanottoasemalla (käsin tai automaattisesti) kuormaa purettaessa tai heti kuorman purkamisen jälkeen (2/3 näytteistä) ja 1/3 on tuotannon aikaisina laatukontrollinäytteinä (esim. aumaan ajettu turve satokerroittain lapiolla tai 1,5 tai 3 m kairalla), valmiiden aumojen laadunmääritysnäytteinä 8 metrin kairalla. Mukana on myös tutkimusnäytteitä tuotannosta, aumoista ja toimituksista yms. Vapo Oy on tehnyt analyysit vuoteen 2005 asti ja ENAS Oy (nykyinen Labtium Oy) vuosina 2006–2011.

Taulukko 6.3. Turpeen kemiallisia ominaisuuksia kuiva-aineessa vuosina 2001–2011 (Lehtovaara & Salonen 2012).

Ominaisuus	Tuhka		Lämpöarvo, MJ/kg		Kemialliset analyysit, p-%					
	815 °C	550 °C	Kalorimetritinen	Tehollinen	Haihtuvat aineet	H	C	H	N	S
Menetelmä	ISO 1171	EN 14775	ISO 1928 EN 14918		SFS-EN 15148	Empiirinen laskenta*	EN 15104			ASTM D 4239 tai EN 15289
Analyyseiden lukumäärä	21 686	51	20 008	20 027	666	655	1 229	67	662	19 745
Keskiarvo	5,63	5,75	22,00	20,78	67,85	5,52	53,84	5,64	1,63	0,213
Mediaani	5,0	5,5	22,04	20,83	68,0	5,53	53,8	5,70	1,59	0,20
Hajonta (std)	3,2	2,0	0,89	0,89	2,5	0,13	1,6	0,25	0,38	0,11
Varianssi	10,4	4,0	0,80	0,80	6,0	0,02	2,4	0,06	0,14	0,01
Maksimi	39,9	14,9	25,42	24,20	74,5	5,8	59,4	6,20	3,25	3,01
Minimi	0,5	2,4	13,68	12,46	56,6	4,7	46,3	4,90	0,19	0,01
95 % luottamusväli, Maksimi**	12,1	9,7	23,78	22,56	72,8	5,77	57,0	6,14	2,39	0,43
95 % luottamusväli, Minimi**	-	1,8	20,21	18,99	62,9	5,26	50,7	5,13	0,88	-

* Vuosina 1989–1991 vety on laskettu seuraavalla kaavalla: $3 + 0.001672 \cdot \text{haihtuvat aineet}$ * kalorimetritinen lämpöarvo (Nordin 1924).

** 95 % luottamusväli minimille ja maksimille on laskettu seuraavasti: keskiarvo \pm hajonta $\cdot 2$

Kemiallisesti turve on hyvin reaktiivista. Tätä turpeen ominaisuutta voidaan hyödyntää esim. turpeen kasutuksessa ja turveammoniakin valmistuksessa. Myös koksauksessa saatava turvehiili on erittäin reaktiivista ja sitä voidaan käyttää metallien ja malmien pelkistykseen. Toisaalta reaktiivisuutensa takia turve 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.

Jyrsin- ja palaturpeiden koostumuksia on taulukossa 6.4. Taulukossa 6.5 on niiden keskimääräisiä ominaisuuksia kaupankäynnin kannalta tärkeimmistä ominaisuuksista.

Taulukko 6.4. Jyrsin- ja palaturpeen alkuainepitoisuudet (% kuiva-aineessa) (Vapo Oy, Sisäinen Turvetietokanta 2001–2015).

Polttoaine	Hiili, C	Vety, H	Typpi, N	Happi, O	Rikki, S
Jyrsinturve	53,73	5,58	1,69	32,97	0,22
Palaturve	55,70	5,80	2,18	32,53	0,18

Taulukko 6.5. Jyrsin- ja palaturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia (Taipale 1996, Electrowatt-Ekono 1999 a ja b, 2005, Vapo Oy:n tiedot toimitettujen turpeiden ominaisuudet vuosina 2010–2014 ja sisäinen turvetietokanta 2001–2014).

TURVE	JYRSINTURVE			PALATURVE		
Lähde	VTT	Ekono	Vapo	VTT	Ekono	Vapo
Kosteus, p-%	48,5	47,1	45,9	38,9	39,5	35,3
Tiheys saapumistilassa, kg/m ³		330	313		385	346
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	9,6	9,9	9,8	11,9	11,9	11,9
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA						
Tuhka, p-%	5,1	5,8	6,3	4,5	4,8	3,5
Haihtuvat aineet, p-%	68,6		67,7	68,9		69,2
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	22,1		21,8	22,5		22,6
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	20,9	20,8	20,6	21,3	21,2	21,3
Tiheys, kg/m ³		175			233	
Energiatiheys, MWh/m ³		0,91	0,85		1,27	1,15

Polttoturpeen raskasmetallipitoisuudet on lueteltu taulukoissa 6.6 ja 6.7 ja alkalimetalli- ja halogeenipitoisuudet taulukossa 6.8. Taulukossa 6.9 on jyrsinturpeen palakokojakauma.

Electrowatt-Ekono (nykyinen Pöyry Consulting) seurasi myös toimitetun turpeen laatua kyselemällä käyttö- ja laatu tietoja turpeen käyttäjiltä vuosina 1985–2005. Vuoden 1993 tietoja ei ole tilastoitu. Tilastointi lopetettiin energiamarkkinoiden vapautuessa vuonna 2005. Liitteeseen F on koottu turpeen käyttäjien keskimääräisiä tietoja jyrsin- ja palaturpeen ominaisuuksista näiltä vuosilta.

Taulukko 6.6. Polttoturpeen raskasmetallipitoisuudet kuiva-aineessa (mg/kg) (Vähä-Savo et al. 2016, koboltti on Vapon aikaisemmista tutkimuksista vuosilta 1996–2013).

Ominaisuus	Keskiarvo	Mediaani	Keskiahajonta	Minimi	Maksimi
Arseeni, As	3,3	3,1	1,4	0,5	6,9
Kadmium, Cd	0,13	0,12	0,04	0,06	0,2
Koboltti, Co	1,29	1,1	0,74	0,3	8,8
Kromi, Cr	6,14	5,5	3,18	0,82	15,0
Kupari, Cu	7,7	6,95	3,4	2,1	18,0
Nikkeli, Ni	4,37	4,0	2,1	0,94	13,0
Lyijy, Pb	3,74	3,4	2,11	0,5	11,0
Sinkki, Zn	7,5	7,23	2,7	2,1	16,0
Elohopea, Hg	0,056	0,05	0,019	0,05	0,20
Vanadiini, V	8,7	8,3	4,1	1,2	20,0
Molybdeeni, Mo	1,07	1,0	0,52	0,5	3,4

Taulukko 6.7. Polttoturpeen raskasmetallipitoisuudet kuiva-aineessa (mg/kg) (Taipale 1996, Vapo Oy).

	Arseeni, As	Kadmium, Cd	Koboltti, Co	Kromi, Cr	Kupari, Cu	Nikkeli, Ni	Lyijy, Pb	Sinkki, Zn
Keskiarvo	2,2	0,12	1,4	5,9	6	3,9	4,6	9,0
Keskihajonta	1,2	0,025	0,61	2,78	2,61	1,66	1,48	3,54
Minimi	0,2	0,03	0,1	0,9	1,4	0,8	0,6	2,8
Maksimi	9,3	0,2	3,7	24,9	16,5	16,7	9,9	36,5

Taulukko 6.8. Polttoturpeen alkalimetalli- ja halogeenipitoisuudet kuiva-aineessa (Vähä-Savo et al. 2016).

	Kloori, Cl	Fluori, F	Bromi, Br	Natrium, Na	Kalium, K
Yksikkö	p-%			mg/kg	
Keskiarvo	0,023	0,0028	0,0015	607	734
Mediaani	0,024	0,0020	0,0010	575	730
Keskihajonta	0,004	0,0018	0,0006	457	484
Minimi	0,011	0,001	0,001	33	89
Maksimi	0,035	0,01	0,003	2 600	2 700

Taulukko 6.9. Jyrsinturpeen palakokojakauma (p-%) seulanläpäisyjen mukaan esitettynä (Vapo Oy).

Palakoko, mm	Määrä	Keskiarvo	Mediaani	Maksimi	Minimi
Keskiraekoko	26	3,56	3,37	6,34	2,18
D50	43	1,28	1,31	3,17	0,34
31,5	37	100,0	100,0	100,0	100,0
16	18	96,3	97,4	100,0	85,4
10	18	90,5	91,5	98,6	77,1
4	18	74,4	72,6	91,5	57,0
2	18	60,8	59,2	82,5	40,2
1	18	47,7	46,0	70,7	28,2
0,63	18	39,6	38,1	62,4	22,6
0,5	18	38,3	35,2	58,3	20,2
0,25	18	26,0	24,0	45,4	9,7
0,125	18	15,9	14,4	30,8	3,0
Alite	18	11,0	9,1	22,9	1,7

Taulukossa 6.10 on turvepellettien ominaisuudet ja vertailu NT ENVIR 009-Nordtest-menetelmän vaatimuksiin.

Taulukko 6.10. Turvepellettien ominaisuuksia (Vapo Oy & NT ENVIR).

Ominaisuus	NT ENVIR koodi	Tyypillinen arvo	Vaihteluväli
Mitat	D12, Halkaisija (D), mm ja pituus, mm	≤ 12 mm ± 1 mm 5 X D	
	D15, Halkaisija (D), mm ja pituus, mm	≤ 15 mm ±1 mm 5 X D	
Kosteus, M, p-%	M20	15 p-%	13–20 p-%
Mekaaninen käsittelykestävyys, DU	DU95	≥ 95 %	≥ 95 %
Irtotiheys, BD	BD700	700 kg/i-m ³	± 50 kg/i-m ³
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, Q	Q16.2	4,7 kWh/kg ≥ 16,9 MJ/kg	4,4–5,0 kWh/kg 15,1–18,0 MJ/kg
Energiatiheys, E		≥ 3,3 MWh/i-m ³	2,05–3,60 MWh/i-m ³
Haihtuvat aineet, VM _d (k.a.)		69 %	67–73 %
Tuhka (550 °C) (k.a.)	A6.0	3 %	1,1–6,0 %
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	Puolipallopiste, HT	1 160 °C	1 130–1 390 °C
Rikki, S (k.a.)	S0.15	0,12 %	0,04–0,30 %
Typpi, N (k.a.)	N1.5	1,20 %	0,7–1,7 %
Kloori, Cl (k.a.)	Cl 0.03	< 0,03 %	0,0235–0,027 %
Kadmium, Cd (k.a.)	Cd 0.01	≤ 0,01 %	
Hiili, C (k.a.)		54 %	49–56 %
Päästökerroin, saapumistilassa	-	97–99 g CO ₂ /MJ	97–99 g CO ₂ /MJ
Cesium, Cs-137 Bq/kg (k.a.)	-	< 80	10–340

k.a. = kuiva-aineessa

Turpeen tuhkapitoisuudella tarkoitetaan turpeessa olevien epäorgaanisten kivennäisravinteiden, tulvakerostumien ja kemiallisten saostumien yhteismäärää. Suomessa turpeen tuhkapitoisuus kuiva-aineessa on yleensä 3–10 %. Turpeen epäorgaanisen aineksen määrä ja laatu riippuvat sen kerrostumisen aikaisista olosuhteista, turvetta muodostavista kasveista ja maatumisasteesta (Mäkilä 1994, Virtanen et al. 2003, taulukko 6.3 ja 6.5).

Tuhka voidaan jakaa alkuperänsä perusteella primaariseen ja sekundaariseen tuhkaan. Primaarinen tuhka on peräisin turvetta muodostavista kasveista. Sekundaarinen tuhka on mineraaliainesta, joka on joutunut turpeeseen suon kehityksen kuluessa esim. pölyn tai tulvan tuomana (Mäkilä 1994).

Turpeessa oleva mineraaliaine on tyypillisesti hienojakoista ja se koostuu Suomessa tavallisesti mm. kvartsista sekä maasälpä-, amfiboli- ja kiilleryhmien mineraaleista.

Rahkavaltaisen turpeen tuhkapitoisuus on yleensä pienempi kuin saravaltaisen turpeen. Rahkavaltaisen turpeen keskimääräinen tuhkapitoisuus on Suomessa 2,5 % ja saravaltaisen turpeen 4 %. Turpeen tuhkapitoisuus kasvaa yleensä suon ravinnetason ja turpeen maatumisasteen kasvaessa (Virtanen et al. 2003).

Monipolttoainekattiloiden käytön yleistyessä syntyneet tuhkat ovat seostuhkia – yleisemmin turpeen ja puun seostuhkia. Tuhkia käytetään kaatopaikkarakenteissa, tierakentamisessa, muussa maarakentamisessa ja lannoitevalmisteena. Lannoitevalmisteena voidaan käyttää puhtaan puun, turpeen ja peltobio-massojen tuhkaa, joka täyttää lannoitelainsäädännön vaatimukset (www.finlex.fi).

Tuhkien laatu voi vaihdella paljon eri voimalaitosten välillä. Tuhkan fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin vaikuttavat etenkin polttoaineen koostumus ja laatu, mutta myös kattilatyyppi, polttotekniikka ja –parametrit sekä tuhkan talteenottojärjestelmä. Taulukossa 6.11 on esitetty turvetuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa ilmakehässä. Taulukossa 6.12 on esitelty tyypillisiä metallipitoisuuksia turpeen, lietteiden ja puun polton tuhkille. Turvetuhkien käyttöä lannoitteena rajoittavat yleensä alhainen ravinnepitoisuus sekä lannoiteasetuksessa määriteltyä enimmäispitoisuutta korkeampi arseenipitoisuus. Metsälannoitteeksi soveltuvat parhaiten turve-puuseostuhkat, jotka muodostavat poltettaessa puuta yli 50 % osuudella. Turvetuhkassa on vähemmän kaliumia kuin puutuhkassa.

Taulukko 6.11. Turvetuhkan sulamiskäyttäytyminen hapettavassa ilmakehässä (Taipale 1996, Vapo Oy 2015).

Polttoainetyyppi	Jyrsinturve			Palaturve		
	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Minimi	Maksimi
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (VTT), °C						
ST, Pehmenemislämpötila	1 130	1 100	1 190	1 136	1 040	1 335
HT, Puolipallolämpötila	1 253	1 200	1 375	1 273	1 145	1 415
FT, Juoksevuuslämpötila	1 290	1 205	1 430	1 308	1 175	1 490
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Vapo), °C						
DT, Muodonmuutoslämpötila	1 181	1 080	1 360	1 222	1 080	1 420
ST, Pehmenemislämpötila	1 202	1 100	1 390	1 252	1 130	1 430
HT, Puolipallolämpötila	1 236	1 130	1 450	1 271	1 150	1 500
FT, Juoksevuuslämpötila	1 282	1 160	1 510	1 297	1 160	1 530

Taulukko 6.12. Turpeen, puun ja puunkuori-lietteen lentotuhkan metallipitoisuuksia leijupoltossa, mg/kg kuiva-aineessa (Korpijärvi et al. 2009).

Ominaisuus	Turpeen ja puun seostuhka	Puun tuhka	Puunkuori-lietelentotuhka*
Arseeni, As	30–120	1–60	11–12
Barium, B	150–2 200	200–300	
Kadmium, Cd	0,5–5,0	6–40	3,7–14,0
Koboltti, Co	10–50	3–200	
Kromi, Cr	43–130	40–250	50–230
Kupari, Cu	60–200	50–300	52–85
Elohopea, Hg	0,3–2,0	0,02–1,00	0,004–1,1
Molybdeeni, Mo	10–50	15	
Nikkeli, Ni	30–700	20–100	38–89
Lyijy, Pb	85–1 000	3–1 100	34–72
Seleen, Se	< 10–26		
Vanadiini, V	20–500	20–30	
Sinkki, Zn	50–2 200	200–2 000	790–3 700

*Liete tarkoittaa biolietettä, jonka seassa on mahdollisesti kuorimo- ja kuitulietettä.

Taulukossa 6.13 on puu- ja turvetuhkan haitta-ainepitoisuudet ja taulukossa 6.14 ravinteiden pitoisuudet eri tuhkatyypeillä. Tarkasteltujen tuhkien pH oli hyvin korkea (taulukko 6.14). Erityisesti puupohjaisissa tuhissa pH on kaikilla tuhkatyypeillä lähes 12. Suoraan alkalisuuteen vaikuttavat kalium ja kalsium erottuvat puutuhkista, kun taas turvepohjaisten tuhkien ko. pitoisuudet ovat pienempiä (Kirjavainen 2015).

Taulukoissa 6.13–6.14 termi ”seostuhka” tarkoittaa lento- ja pohjatuhkan seosta, joita erityisesti arinakattiloissa muodostuu näiden jakeiden yhdistyessä märkätuhkakuljettimella (Kirjavainen 2015). Taulukoissa 6.15–6.19 on koottu turpeen käsittelytekniisiä ominaisuuksia.

Taulukko 6.13a. Puu- ja turvetuhkien haitta-aineiden (As, Ba, Cd, Cr, Cu ja Hg) kokonaispitoisuuksia (mg/kg kuiva-aineessa) eri tuhkatyyppien ja polttoaineiden mukaan jaoteltuna (Kirjavainen 2015).

Tuhkalaji		As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg
<i>Seostuhka</i>							
Puu ≥ 50 % 23 näytettä	Mediaani	1,9	2 400	3,4	64,0	98,0	0,1
	Vaihteluväli	1,0–1,9	230–3 900	0,3–17,0	9,2–780,0	63–220	0,0–0,8
Turve ≥ 50 % 23 näytettä	Mediaani	22,0	810	0,5	68,0	103,0	0,1
	Vaihteluväli	1,8–140	410–2 200	0,1–4,9	25–310	43–260	0,0–0,4
<i>Lentotuhka</i>							
Puu ≥ 50 % 13 näytettä	Mediaani	27	1 300	5,5	57	100	0,4
	Vaihteluväli	4–110	550–4 400	0,8–37	29–94	34–250	0,1–0,8
Turve ≥ 50 % 25 näytettä	Mediaani	40	630	2	78	110	0,3
	Vaihteluväli	4–150	1,5–1 700	0,2–12	41,6–250	52–3 100	0–0,6
<i>Pohjatuhka/Leijupetihiekka</i>							
Puu ≥ 50 % 5 näytettä	Mediaani	4	300	0,2	23	49,5	0,1
	Vaihteluväli	0,5–5,8	130–470	0,1–0,4	14–97	12–100	0–0,4
Turve ≥ 50 % 8 näytettä	Mediaani	5,9	372	0,3	21,5	53	0,1
	Vaihteluväli	1–17	59–860	0–1,3	13–73	12–83	0–0,1

Taulukko 6.13b. Puu- ja turvetuhkien haitta-aineiden (Mo, Ni, Pb, Sb, Se, V ja Zn) kokonaispitoisuuksia (mg/kg kuiva-aineessa) eri tuhkatyyppien ja polttoaineiden mukaan jaoteltuna (Kirjavainen 2015).

Tuhkalaji		Mo	Ni	Pb	Sb	Se	V	Zn
<i>Seostuhka</i>								
Puu ≥ 50 % 23 näytettä	Mediaani	2,0	32,0	9,7	0,5	1,0	14,0	490,0
	Vaihteluväli	1,4–17,0	13,0–230,0	1,0–110,0	0,1–1,5	0,1–18,0	8,2–92,0	75,0–1 300
Turve ≥ 50 % 23 näytettä	Mediaani	12,0	57,0	16,0	0,5	2,6	100,5	42,0
	Vaihteluväli	1,4–47	28–120	1–100	0,1–1,0	0,1–12	27–240	1–620
<i>Lentotuhka</i>								
Puu ≥ 50 % 13 näytettä	Mediaani	6,9	40	59	2,1	4,9	67	930
	Vaihteluväli	2,2–23	14–67	9–200	0,5–11	1–22	9,5–160	120–19 600
Turve ≥ 50 % 25 näytettä	Mediaani	10	56	36	1,4	6,4	130	215
	Vaihteluväli	2,4–21	23–140	15–2 400	0,1–16	0,5–30	40–270	41–1 980
<i>Pohjatuhka/Leijupetihiekka</i>								
Puu ≥ 50 % 5 näytettä	Mediaani	2	14	8,2	0,5	1	19,5	180
	Vaihteluväli	2–2	9–30	1,2–9,7	0,5–0,5	1–1	19–20	120–230
Turve ≥ 50 % 8 näytettä	Mediaani	2,0	23,5	21,0	1,0	1,0	22,0	155
	Vaihteluväli	0,7–6,2	8,5–51	1,1–50	0,5–2,6	1–2	17–79	4,5–590

Taulukko 6.14. Ravinteiden kokonaispitoisuudet kuiva-aineessa eri tuhkatyypeissä (mg/kg tai p-%) sekä pH-arvo (Kirjavainen 2015).

Tuhkalaji		Kalium, K	Kalsium, Ca	Fosfori, P	pH
		mg/kg			
<i>Seostuhka</i>					
Puu ≥ 50 % 23 näytettä	Mediaani	44 000	170 000	13 000	12,4
	Vaihteluväli	10 000–96 000	88 000–410 000	4 500–36 000	10,5–13,1
Turve ≥ 50 % 23 näytettä	Mediaani	2 350	78 500	11 000	9,2
	Vaihteluväli	1 100–10 000	30 000–150 000	4 100–19 000	7,3–12,0
<i>Lentotuhka</i>					
Puu ≥ 50 % 13 näytettä	Mediaani	27 500	100 000	12 000	11,7
	Vaihteluväli	4 200–99 100	45 000–290 000	2 720–22 600	9,0–13,1
Turve ≥ 50 % 25 näytettä	Mediaani	7 600	45 000	8 370	9,4
	Vaihteluväli	2 250–41 000	13 500–160 000	3 000–37 000	7,9–12,7
<i>Pohjatuhka/leijupetihiikka</i>					
Puu ≥ 50 % 5 näytettä	Mediaani	39 250	135 100	6 400	10,5
	Vaihteluväli	5 900–65 000	12 000–206 000	990–12 000	10,4–10,5
Turve ≥ 50 % 8 näytettä	Mediaani	12 000	28 000	5 840	9,1
	Vaihteluväli	1 600–18 300	4 000–41 000	1 000–110 000	7,9–11,5

Taulukko 6.15. 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 6.16. Jyrsinturpeen kosteuden vaikutus juoksevuuteen (Rautalin et al. 1986, Thun & Rautalin 1980).

Konsolidaatiopaine, kPa	Kosteus, %	Puristuslujuus vapaalla pinnalla, kPa	Maksimi-jännitys, kPa	Koheesio, kPa	Sisäinen kitkakulma, °	Tehollinen kitkakulma, °	Juoksevuusfunktion arvo yhdellä konsolidaatiolla
7,59	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	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	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	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	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 6.17. Jyrsinturpeen asettumis- ja virtauskulma (Rautalin et al. 1986).

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

Taulukko 6.18. Jyrsinturpeen ja eri pintamateriaalien välinen kittakerroin (Rautalin et al. 1986).

Fraktio, mm	Kosteus, p-%	Kittakerroin				
		Filmivaneri	Teräslevy	Kovalevy	Akryylilevy	Lasikuitu
Seulomaton	21	0,37	0,45	0,43	0,43	0,37
	30	0,58	0,74	0,66	0,64	0,61
	40	0,57	0,74	0,66	0,56	0,74
	55	0,65	0,76	0,72	0,50	0,55
	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 6.19. Palaturvetuotteiden asettumiskulma (Rautalin et al. 1986).

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

Peltobioenergian potentiaali on Suomessa 12–22 TWh (Mikkola 2012), jos 0,1–0,5 miljoonaa hehtaaria käytetään peltoenergiakasvien viljelyyn. Pahkala ja Lötjönen (2015) ovat arvioineet viljelykasvien sivutuotteiden teknistä ja teknistaloudellista potentiaalia vuoteen 2050 asti (taulukko 7.1). Viljelykasvien sivutuotteita ovat viljan oljet, öljy- ja palkokasvien varret ja juurikasvien naatit. Sivutuotteiden vaihtoehtoisia käyttötapoja ovat viljojen olkien käyttö eläinkuivikkeena tai rehuna ja olkien käyttö maa- ja puutarhatalouden katemateriaalina. Suomessa on arvioitu, että noin 10–20 % vuosittaisesta olkisadosta käytetään eläinten kuivikkeena tai rehuna. Suomessa maatalousmaa-ala on 2,3 miljoonaa hehtaaria, josta nurmialaa on 0,7 miljoonaa hehtaaria sekä kesantoalaa 0,2 miljoonaa hehtaaria. Nurmi- ja kesantoalasta voisi käyttää osan bioenergian tuotantoon ja samalla vähentää riskejä ravinteiden huuhtoutumisesta. Vuonna 2010 ruokohelven viljelyala oli 16 700 hehtaaria ja vuonna 2015 vain 4 200 hehtaaria (Lötjönen & Paappanen 2013).

Taulukko 7.1. Viljelykasvien sivutuotteiden tekninen ja teknistaloudellinen potentiaali Suomessa: nykytila, 2030 ja 2050 (Pahkala & Lötjönen 2015).

Kasvi	Nykytila tekninen potentiaali		Teknistaloudellinen, TWh		
	1 000 tonnia k.a.	TWh	Nykytila	2030	2050
Viljat	2 119	10,6	3,8		
Öljykasvit	114	0,6	0,2		
Peruna	85	0,4	0,2		
Palkokasvit	5	0,0	0,0		
Sokerijuurikas	54	0,3	0,1		
Yhteensä		11,9	4,3	5,1	6,2

Mikkola (2012) on arvioinut oljen vuotuisiksi potentiaaleiksi 8 TWh. Korpinen et al. 2014 laskee teknistaloudelliseksi vuotuisiksi olkipotentiaaleiksi 3 TWh ja Luke 3,8 TWh (taulukko 7.1). Maatilat käyttivät olkea energian tuotantoon 0,2 TWh vuonna 2013 ja eläinten kuivikkeena 0,4 miljoonaa kuiva-ainetonna (Korpinen et al. 2014).

7.2 Vilja ja olki

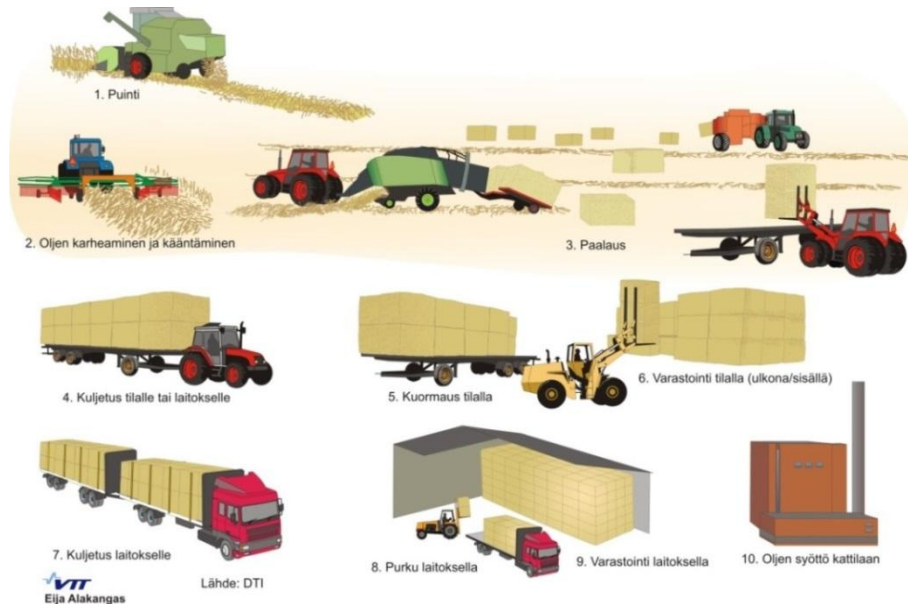
Viljan (ohra, vehnä, ruis ja kaura) olki ja jyvät sopivat kiinteänä polttoaineena käytettäväksi. Jyville ja oljella on erilaiset palamisominaisuudet, joten olkea ja jyviä käytetään erikseen. Maatilojen lisäksi oljen potentiaalisia käyttökohteita ovat maaseudun taajamien lämpökeskukset ja pientalot. Polttamiseen 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 jäähmettynyttä että sulamatta jäänyttä tuhkaa (Ahokas et al. 1983, Sankari 1994).

Oljen hyväksikäytön suurin ongelma on sen tiheys (irto-oljen tilavuus on 30–40 kg/i-m³, paalattuna 100–150 kg/i-m³) mikä hankaloittaa varastointia ja tekee kuljetuksen kalliiksi. Toinen merkittävä ongelma on myöhäinen korjuuajankohta syksyllä, mikä saattaa joinain vuosina vaikeuttaa oljen saamista varastoon tarpeeksi kuivana. Olkea voidaan käyttää polttoaineena suurpaaleina, kovapaaleina, silppuna, jauhettuna ja puristeina. Kuvassa 7.2 on oljen korjuu suurkanttipaaleina.

Olki ja puu ovat muutamilta ominaisuuksiltaan samanlaisia polttoaineita. Niiden alkuaines sisältö (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, suuri tuhkapitoisuus ja tuhkan alhaiset sulamislämpötilat tekevät siitä kuitenkin puuta ja muita kiinteitä polttoaineita ongelmallisemmän polttoaineen (Ahokas et al. 1983, Sankari 1994).

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 % kosteudessa, se on kuivattava koneellisesti, jotta poltto onnistuisi (Ahokas et al. 1983, Tuunanen 1994).

Oljen tehollinen lämpöarvo 20 % kosteudessa on noin 13,5 MJ/kg. Oljen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 16,7–17,8 MJ/kg ja keskimääräinen kuiva-aineen lämpöarvo on 17,4 MJ/kg (taulukko 7.2).



Kuva 7.2. Oljen korjuu suurkanttipaaleina. Lähde: Alakangas & Virkkunen 2007.

Taulukossa 7.2 on vertailtu oljen, ruokohelven ja hampun (*Cannabis sativa*) koostumusta ja taulukossa 7.3 olkien tuhkapitoisuutta ja lämpöarvoa. Hampun varsi muodostuu nilakuidusta (35 %) ja puumaisesta ytimestä (65 %) (Laine 2015).

Taulukko 7.2. Ruokohelven ja oljen kemiallinen koostumus p-% kuiva-aineessa (Paavilainen 1997, Laine 2015, VTT:n analyysi [hamppu 2/2016]).

Ainesosa	Ruokohelvi	Olki (vehnä)	Hamppu
Selluloosa	34	37	55
Hemiselluloosa	22	23–30	16
Ligniini	14	20	4
Tuhka	7	5–9	2,2–2,4
Silikaatti	2	1,5–2,0	

Taulukko 7.3. Erialaisten 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	4,5–5,9	4,9	5,0
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

Oljen tuhkan ominaisuudet vaihtelevat suuresti viljalajin, kasvupaikan ja lannoituksen mukaan. Kauran oljen lämpöarvo on alhaisin ja sulamisominaisuudet huonommat (sintraantuva). Kauran olki on lisäksi

sitkeää. Viljan olki sisältää tuhkaa 4,5–6,5 % kuiva-aineessa. Vehnän oljessa on eniten tuhkaa. Haihtuvien aineiden pitoisuus on 60–70 % (Ståhlberg et al. 1985, Puuronen et al. 1994, Ahokas 1983, Sankari 1994 ja 1995). Viljan olkien ominaisuuksia on esitelty taulukoissa 7.4–7.5.

Taulukko 7.4. Viljan olkien tuhkan koostumus p-% kuiva-aineessa (Taipale 1996).

Aine p-%	Olki yleisesti		Vehnä**	Ruis	Ohra	Kaura
	Tuhkaus 815 °C	Tuhkaus 550 °C				
	Vaihteluväli / Keskiarvo					
SiO ₂	18–61 / 43	21–79 / 52	78,2 / 68,4	61,7	44,7	37,3
K ₂ 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 ₂ O ₅	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 / 3,0	1,3–3,8 / 2,7	3,6 / 2,0	2,8	2,5	3,0
Al ₂ O ₃	0,32–3,8 / 1,5	0,13–3,5 / 0,7	2,0 / 0,85	2,1	0,4	0,8
Fe ₂ O ₃	1,4–6,8 / 3,3	< 0,1–1,9 / 0,5	1,5 / 0,45	1,5	0,5	0,5
SO ₃	1,8–5,4 / 3,7	/ 3,0*	1,4 / 0,90	1,3	1,4	1,4
Na ₂ O	0,31–9,9 / 3	0,2–10,4 / 2,1	0,3 / 0,25	0,3	0,3	0,3
TiO ₂			/ 0,04			

* laskennallinen arvo

** luvut kahdesta eri lähteestä

Kemialliseen koostumukseen vaikuttavat eri kasvilajien lisäksi kasvin ikä ja viljelyolosuhteet (säätö, maaperä ja lannoitus). Myös kasvin osien kemiallinen koostumus voi olla erilainen. Sadonkorjuun ajankohdasta 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). Taulukossa 7.6 on viljan oljen metallipitoisuuksia.

Oljen tuhkan sulaminen tapahtuu laajalla lämpötila-alueella (taulukko 7.7). Olkien tuhkat poikkeavat toisistaan SiO₂-, K₂O- ja CaO-pitoisuuksien osalta. SiO₂:lla on sulamislämpötiloja kohottava ja K₂O: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 myös käyttämällä lisäaineita kuten kaoliinia. Kun kaoliinia käytetään 2 % olkipelleteissä, muodonmuutoslämpötila nousee 770 °C:sta 1 100 °C:een (Puuronen et al. 1994, Taipale 1996).

Taulukko 7.5. Erilaisten viljan olkien alkuaine- ja metallipitoisuuksia (Taipale 1996).

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

Taulukko 7.6. Oljen tuhkan sisältämiä metallipitoisuuksia (Taipale 1996).

Aine	Pitoisuus, mg/kg	Aine	Pitoisuus, mg/kg
Antimoni, Sb	< 20	Kupari, Cu	85
Arseeni, As	32	Nikkeli, Ni	45
Barium, Ba	90	Elohopea, Hg	< 5
Lyijy, Pb	45	Seleeni, Se	< 30
Kadmium, Cd	3	Vanadiini, V	28
Kromi, Cr	58	Sinkki, Zn	125
Koboltti, Co	< 20		

Taulukko 7.7. Eri viljalajien oljen tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Ahokas et al. 1983).

Viljalaji	Hapettavassa atmosfäärissä		
	Pehmenemislämpötila, DT, °C	Puolipallolämpötila, HT, °C	Sulalämpötila, FT, °C
Vehnä	1 050	1 350	1 400
Ruis	840	1 150	1 330
Ohra	765	1 035	1 190
Kaura	735	1 045	1 175

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

Briketointi ja pelletointi kasvattavat polttoaineen tiheyttä ja helpottavat polttoaineen käsittelyä. Olkibriketit valmistetaan valssi-, mäntä- tai ruuvipuristimilla. Brikettien muoto vaihtelee tyynymäisestä kiekoon tai tankoon. Niiden läpimitta on 12–100 mm ja kosteus 8–15 %. Olkibrikettien kiintotiheys on 450–1 100 kg/m³ ja varastointitiheys 300–550 kg/m³ (Peltola 1981, Ahokas et al. 1983).

Olkipelletit tehdään rengas- ja tasomatriisikoneilla. Raaka-aine puristetaan rullien avulla reikälevyn tai rei'itetyn sylinterin läpi. Pellettien läpimitta on 6–15 mm ja kiintotiheys on 800–1 400 kg/m³, irtotiheys 450–750 kg/m³ 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/m³ (vertaa ruokohelven taulukko 7.18).

Viljan jyvillä on lähes sama lämpöarvo kuiva-ainekiloa kohti kuin polttopuulla tai oljella. Jyvistä nimenomaan kauran jyvät palavat oljen tapaan, koska niissä on paljon kuorta. Jyvä voidaan polttaa sellaisenaan tai jauhettuna. Ohran jyvän tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa on 4,5 MWh/tonni (16,2 MJ/kg) tai 2,41 MWh/m³. Tiheys on 536 kg/m³ (Tuunanen 1994). Jyvän klooripitoisuus vaihtelee 0,028–0,048 p-% ja tuhkapitoisuus on 2,5 p-% kuiva-aineessa (Silvennoinen & Hedman 2011). Kauran akanan tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 17,4–17,8 MJ/kg.

Kauran, kauraleseen ja eräiden öljykasvien tähteiden ominaisuuksia on taulukossa 7.8 ja kauran, rypsin ja rypsipuristeen ominaisuuksia on taulukossa 7.9. Viljan ja viljapölyn analyysijä on taulukossa 7.10.

Taulukko 7.8. Kauran, kauraleseen ja eräiden öljykasvien tähteiden ominaisuuksia (Luonnonvarakeskus 2008, julkaisematon).

Polttoaine	Kosteus, p-%	Tuhka, p-% k.a.	Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	
				Kuiva- aineessa	Saapumis- tilassa
Kauran kuori- jauho	9,0	4,7	18,89	17,56	15,77
Kauralese	8,3	4,9	18,26	16,93	15,33
Camelina puris- te, briketti	9,1	5,7	22,68	21,35	19,20
Camelina puris- te, levy	10,0	5,7	22,41	21,08	18,73
Rehukaura	12,2	3,4	19,24	17,91	15,42
Viljajaebriketti	8,9	7,4	18,91	17,59	15,80

Taulukko 7.9. Kauran, rypsin ja rypsipuristeen vertailu puu- ja turvepelletteihin (Kouki et al. 2008).

Ominaisuus	Kaura	Puu- pelletti	Turve- pelletti	Rypsi	Rypsi- puriste	Kaura (80 %) ja turve (20 %) seos
Kosteus, p-%	11,4	5,3	10,4	5,5	6,8	11,2
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	15,91	17,62	16,75	23,99	20,94	16,08
Irtotiheys, kg/l-m ³	570	630				
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA						
Tuhka, p-%	2,4	0,3	2,5	4,4	6,1	2,4
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	19,59	20,15	20,21	27,08	24,2	19,71
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,26	18,74	18,97	25,54	22,65	18,40
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, mg/kg						
Alumiini, Al	24,4	9,9	782,7	¹	9,4	176,1
Boori, B	1,5	2,6	1,5	13,3	15,3	1,5
Kalsium, Ca	640	940	1 620	5 410	5 980	836
Kadmium, Cd	¹	0,11	0,15	0,17	0,16	0,03
Kupari, Cu	4,4	1,9	2,5	3,5	4,8	4,1
Rauta, Fe	80	10	1 790	60	90	422
Kalium, K	5 290	670	190	7 910	10 170	4 270
Magnesium, Mg	1 330	200	630	3 380	5 410	1 190
Mangaani, Mn	40	70	40	20	50	40
Molybdeeni, Mo	¹	¹	¹	¹	¹	¹
Natrium, Na	42,9	10,4	77,0	24,8	36,3	49,7
Nikkeli, Ni	1,8	0,2	1,6	0,7	1,9	1,7
Fosfori, P	4 010	40	310	8 880	12 640	3 278
Lyijy, Pb	¹	¹	7,25	¹	¹	¹
Rikki, S	1 540	70	1 160	4 350	4 910	1 544
Sinkki, Zn	28,0	7,2	13,3	34,4	57,5	25,1
Kloori, Cl	383	67	278	117	92	362

¹ alle määrittäysrajan

Taulukko 7.10. Viljan ja viljapölyn ominaisuuksia (VTT:n ja Viljavuuspalvelun julkaisematon aineisto).

Ominaisuus	Vilja- tähdde 1	Vilja- tähdde 2	Vilja- tähdde 3	Vilja- tähdde 4	Vilja- tähdde 5	Viljatähde 6	Viljatähde 7
Kosteus, p-%	6,7	6,4	7,10	7,3	11,3	12,4	11,0
Tuhka, p-% k.a.	6,7	8,6	6,4	6,1	5,4	4,7	6,4
Irtotiheys, kg/l-m ³					194	137	235
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	18,86	18,53	19,11	19,09	19,3	18,49	18,94
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a	17,46	17,10	17,71	17,65	17,97	17,24	17,63
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	16,12	15,87	16,29	16,18	15,67	14,80	15,42
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%							
Haihtuvat aineet						76,0	76,3
Kiinteä hiili (laskettu)						19,3	17,3
Hiili, C	47,0	45,8	47,0	47,1		46,4	46,0
Vety, H	6,2	6,3	6,2	6,4		5,7	6,0
Rikki, S	1,1	1,0	1,3	1,5		0,04	0,14
Typpi, N						0,3	1,4
Kloori, Cl						0,24	0,16
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, mg/kg							
Arseni, As					0,5		
Kadmium, Cd					0,073		
Kromi, Cr					8,0		
Kupari, Cu					10		
Nikkeli, Ni					28		
Lyijy, Pb					2,0		
Sinkki, Zn					75		
Elohopea, Hg					0,07		
Natrium, Na						37	51
Kalium, K						4 000	7 400
TUHKAN SULAMISOMINAISUUDET (hapettava / pelkistävä olosuhde), °C							
Muodonmuutoslämpötila, DT						910 / 890	1 110 / 1 040
Pehmenemislämpötila ST						1 000 / 990	1 170 / 1 110
Puolipallolämpötila, HT						1 110 / 1 140	1 260 / 1 220
Sulalämpötila, FT						1 250 / 1 320	1 400 / 1 290
SEULA-ANALYYSIT, p-%							
10 mm (näytteille 1-4)	0,0	0,0	0,0	1,4		-	
> 5 mm (näytteille 6-7)	-	-	-	-		0,5	0,5
3,15-5 mm (näytteille 6-7)	-	-	-	-		1,0	0,8
3 mm (näytteille 1-4)	1,1	1,7	1,8	1,3		-	-
2-3,15 mm (näytteille 6-7)	-	-	-	-		57,6	38,3
1-2 mm (näytteille 6-7)	-	-	-	-		33,5	23,4
1 mm (näytteille 1-4)	3,9	70,1	77,4	73,6		-	-
0,71-1 mm (näytteille 6-7)	-	-	-	-		4,2	6,4
0,5 mm (näytteille 1-4)	8,7	11,6	12,8	15,5		-	-
0,5-0,71 mm (näytteille 6-7)	-	-	-	-		1,3	6,1
< 0,5 mm (pohja)	86,3	16,6	8,0	8,2		1,9	24,3

7.3 Öljy- ja kuitukasvit

Öljykasveista rypsi ja rapsi sekä öljy- ja kuitukasvina käytetty pellava soveltuvat tutkimusten mukaan käytettäväksi myös kiinteänä polttoaineena. Näiden kasvien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 7.11.

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

Pellava (*Linum usitatissimum*) 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 ja 1995).

Rypsin ja rapsin olkisadot ovat keskimäärin 1 945 kg/ha. Oljen sisältämä energiamäärä 25 % kosteudessa 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/m³ (kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo 23,9 MJ/kg). Rypsin siementen tiheys on 665 kg/m³ (Tuomi & Kouki 1993, Tuunanen 1994, Taipale 1996).

Taulukko 7.11. Rypsin, rapsin ja pellavan polttoaineominaisuuksia ja alkuainepitoisuuksia (Taipale 1996).

Polttoaineominaisuus	Rypsin olki	Rypsin siemen	Rapsin olki	Pellavan olki, kokonainen	Pellava-päistäre
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	19,33		18,2 ± 0,5	20,04	20,19
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	18,04–18,9	26,4		18,71	18,86–21,1
PITOISUUKSIA KUIVA-AINEESSA, p-%					
Haihtuvat aineet	79,2		74,4	78,8	63–78,6
Tuhka	2,4–2,86	4,6	9,6 (6,7–14)	2,93	1,81–2,1
Kiinteä hiili (laskettu)	17,94			18,27	19,59
Hiili, C	46–48,1	58,6	46,2 ± 0,9	49,1	50,3
Vety, H	5,7–5,9	8,5	5,7 ± 0,2	6,10	6,10
Typpi, N	0,8	3,7	0,76 ± 0,12	1,30	0,60
Happi, O	39–42,13		38,8 ± 0,7	40,45	41,12
Rikki, S	0,170,21		0,17 ± 0,04	0,12	0,07
Kloori, Cl	0,22–0,10	0,5	0,22 ± 0,06	0,06	0,04
TUHKAA MUODOSTAVAT ALKUAINEEET KUIVA-AINEESSA, p-%					
Natrium, Na	0,017		0,14 ± 0,06	0,013	0,009
Kalium, K	0,58		1,0 ± 0,3	0,51	0,34
Magnesium, Mg			0,10 ± 0,03		
Pii, Si			2,1 ± 2,2		
Fosfori, P			0,085 ± 0,017		
Kalsium, Ca			1,3 ± 0,2		
Rauta, Fe			0,16 ± 0,16		
Alumiini, Al			0,22 ± 0,20		

7.4 Ruokohelpi ja järviruoko

Ruokohelpi (*Phalaris arundinacea* L.) on Suomessa luonnonvaraisena kasvava monivuotinen heinäkasvi, jolla on korkea biomassasato. Ruokohelpeä voidaan käyttää myös paperin valmistuksen raaka-aineena. Lisäksi sitä voidaan käyttää myös valumavesien suodatukseen ja haihdutukseen sekä eläinten rehuna. Ruokohelven luontaisia kasvupaikkoja ovat meren ja järvien rannat, ojat ja tienpientareet. Luonnossa se esiintyy noin 1 m² kokoisina tai suurempina kasvustoina ja se leviää tehokkaasti. Viljeltyjen, lupaavimpien uusien lajikkeiden sato on ollut yli 10 tonnia kuiva-ainetta/ha. Ruokohelpeä on kokeiltu seospolttoaineena yleensä turpeen kanssa tai siitä on valmistettu ruokohelpipellettejä (Taipale 1996, Lindh 1995). Kuvassa 7.3 on esitetty ruokohelven varsi ja piirros ruokohelven eri osista.



Kuva 7.3. Ruokohelpi. Kuva: Vapo Oy.

Ruokohelven polttoaineominaisuuksiin vaikuttavat kasvilajike, kasvupaikka ja -alusta, lannoitus ja korjuu-ajankohta (taulukot 7.12 ja 7.13). Taulukoissa on verrattu eri vuodenaikoina korjatun ruokohelven ominaisuuksia myös muihin polttoaineisiin (Lindh 1995). Erityisesti savipitoisella maaperällä kasvatetun ruokohelven tuhkapitoisuus on korkeampi kuin humuspitoisilla mailla tai turvemilla.

Taulukko 7.12. Ruokohelppi verrattuna muihin biopolttoaineisiin, tyypillisiä polttoainetietoja (Lindh 1995).

Ominaisuus	Ruokohelppi (kevätkorjattu)	Ruokohelppi (syyskorjattu)	Vehnän olki	Puu- polttoaine	Pala- turve
Kosteus, p-%	14	15	15	50	40
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, 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
Tuhkan sulalämpötila, °C	1 404	1 075	930	1 150	1 100
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%					
Haihtuvat aineet	74	72	73	80	70
Tuhka	5,5	6,5	7,0	1,5	4,0
Hiili, C	46	46	46	50	55
Vety, H	5,5	5,7	5,5	6,0	5,6
Typpi, N	0,9	1,3	0,5	0,3	1,5
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
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, mg/kg					
Arseeni, As	0,2	0,1		0,1	2
Elohopea, Hg	0,03	0,03	0,03	0,02	0,09
Kadmium, Cd	0,06	0,04	0,05	0,1	0,1
Lyijy, Pb	2	1	1	4	5

Ruokohelpeä ja järviruokoa on kokeiltu seospolttoaineena turpeen joukossa. Korjuuajankohta vaikuttaa polton kannalta olennaisiin ominaisuuksiin kuten tuhkan sulamiskäyttämiseen ja polttoaineen klooripitoisuuteen. Syyskorjatun ruokohelven ominaisuudet ovat näiden tekijöiden kannalta heikommat kuin kevätkorjatun (Flyktman 1998). Syyskorjatussa ruokohelpeessä on enemmän kaliumia kuin keväällä korjatussa. Kalium vaikuttaa tuhkan sulamiskäyttämiseen alentamalla tuhkan pehmenemispistettä (taulukko 7.14, Lindh 1995).

Taulukko 7.13. Ruokohelven ja timotein analyysituloksia (Lindh 1995).

Ominaisuus	Ruokohelpi, syksy-94					Ruokohelpi, kevät-94		Timotei, heinäkuu-94	Ruokohelpi, syksy-94	
	1	2	3	4	5	1	1	1	1	2
Kasvualusta	Savi	Savi	Savi	Savi	Multamaa	Savi	Savi	Savi	Kivennäismaa	Turvesuo
N-lannoitus, kg/ha	0	50	100	150	110	100	200	60	80	110
LÄMPÖARVOT KUIVA-AINEESSA, MJ/kg										
Kalorimetrinen lämpöarvo	17,95	18,11	18,34	18,44	18,95	18,38	18,74	18,48	18,64	18,86
Tehollinen lämpöarvo	16,74	16,89	17,10	17,21	17,66	13,17	17,47	17,20	17,36	17,55
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%										
Häihtävät aineet	71,5	72,1	72,5	72,8	75,2	76,4	76,4	74	76,1	77,9
Tuhka	8,7	7,8	7,1	6,6	5,2	7,5	6,2	4,7	4,3	2,4
Hilli, 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 (erotus)	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
RASKASMETALLIT KUIVA-AINEESSA, mg/kg										
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 7.14. Turve-ruokohelpiseoksen tuhkan sulamiskäyttäytyminen (Flyktman 1998).

Näyte	Tuhkauslämpötila, °C	Turve/Ruokohelpi, %-osuus	Ruokohelpi	Pehmenemislämpötila, DT, °C	Puolipallolämpötila, ST, °C	Sulalämpötila, FT, °C
1	815	90 / 10	Kevät	1 080	1 205	1 300
2	815	70 / 30	Kevät	1 080	1 350	1 415
3	550	50 / 50	Kevät	1 080	1 510	1 550
4	815	90 / 10	Syys	940	1 240	1 285
5	815	70 / 30	Syys	915	1 290	1 380
6	550	0 / 100	Syys	820	1 190	1 400
7	815	100 / 0	-	1 060	1 155	1 270
8	550	0 / 100	Kevät	1 125	1 555	1 590

Taulukossa 7.15 on ruokohelven ominaisuuksia VTT:n kokeista, jotka tehtiin Rauhalahden ja Kokkolan voimalaitoksilla. Ruokohelpeä käytettiin 1–2 % kokonaisenergiasta. Kokeissa käytettyjen ruokohelpien tuhkapitoisuudet olivat alhaisia (vrt. taulukko 7.13). Palavien aineiden (C, H, N, S) koostumuksen osalta ruokohelpi on lähellä kuorta.

Taulukko 7.15. Ruokohelven ominaisuudet kuiva-aineessa kahdella voimalaitoksella (Paappanen et al. 2008).

Ominaisuus	Ruokohelpi 1 – Rauhalahden	Ruokohelpi 2 – Kokkola
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,2	17,9
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%		
Tuhka (550 °C)	1,0	3,4
Tuhka (815 °C)	1,1	3,3
Hilli, C	49	48
Vety, H	6,1	5,9
Typpi, N	0,44	0,71
Kloori, Cl	0,02	0,04
Rikki, S	0,06	0,08
Kalium, K	0,08	0,20
Natrium, Na	0,002	0,003
Kalsium, Ca	0,10	0,12
Pii, Si	0,23	1,16
Fosfori, P	0,04	0,09
Mangaani, Mn	0,02	0,01
Magnesium, Mg	0,05	0,06
Alumiini, Al	0,002	0,006
Rauta, Fe	0,006	0,01
TUHKAN SULAMISLÄMPÖTILAT, °C (pelkistävä olosuhde)		
Muodonmuutoslämpötila, DT	1 110	> 1 450
Pehmenemislämpötila, ST	1 170	> 1 450
Puolipallolämpötila, HT	1 200	> 1 450
Juoksevuuslämpötila, FT	1 260	> 1 450

Ruokohelvelle on Burvallin julkaisussa vuodelta 1997 esitetty korrelaatio suhteen $Si/(Ca+K+Mg)$ ja sulamiskäyttämisen muodonmuutoslämpötilan välillä. Suhteen arvon ollessa noin 1 on muodonmuutoslämpötila 1 000–1 100 °C. Rauhalahden ruokohelpinäytteen (taulukko 7.15) ko. suhteelle saadaan arvoksi 1 ja siten määritetty muodonmuutoslämpötilan arvo 1 110 °C on täysin Burvallin (1997) tutkimuksen mukainen. Kokkolan ruokohelpinäytteelle saatu suhteen arvo oli 3, jolloin Burvallin mukaan muodonmuutoslämpötila on yli 1 400 °C ja on myös Burvallin tutkimuksen mukainen. Burvallin julkaisussa analyysit on tehty hapettavissa olosuhteissa (Burvall 1997).

Taulukoissa 7.16 on ruokohelven tuhkan analyysituloksia ja taulukossa 7.17 turve-ruokohelpiseosten tuhkanäytteiden raskasmetallianalyysijä.

Taulukko 7.16. Ruokohelven tuhkan koostumus (Moilanen et al. 1996, Taipale 1996).

Yhdiste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
p-%	89,8	1,4	1,2	3,5	1,5	3,2	0,15	0,1	1,1	4,1

Taulukko 7.17. Turpeen ja ruokohelpisilpun sekoituksen tuhkanäytteiden raskasmetallianalyysit (Flyktman 1998).

Koe	Ruokohelpisilpun ja turpeen sekoitus (1:5), ruokohelven osuus energiasta 12 %	Ruokohelpisilpun ja turpeen sekoitus (1:8), ruokohelven osuus energiasta 7 %	Perus Sahaustähde ja kuori
RASKASMETALLIT KUIVA-AINEESSA, mg/kg			
Arseeni, As	1,0	2,7	0,47
Kadmium, Cd	9,3	9,7	11,7
Kromi, Cr	2,2	3,2	0,38
Lyijy, Pb	61,0	63,0	58,4
Kupari, Cu	80,0	77,0	93,4
Nikkeli, Ni	55,0	36,0	31,3
Sinkki, Zn	1 140	1 510	2 060
Kloori, Cl	121	284	462
Palamiskelpoinen ainesosa, %	13,3	18,1	19,8

Ruokohelpisilpun koko: osa silpusta alle 4 cm ja osa yli 4 cm.

Ruokohelpi on kevyempää kuin turve ja puupohjaiset polttoaineet. Kevätkorjattujen paalien tiheys vaihteli Lötjösen ja Paappasen (2013) tutkimuksessa 108–171 kg_{k.a./i}-m³. Seospoltossa tämä seikka voi 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, taulukko 7.18). Kevätkorjattu ruokohelpi soveltuu käytettäväksi seospolttoon siinä tapauksessa, että kattilaa ei tarvitse ajaa täydellä teholla ja helven osuus seoksessa ei nouse merkittäväksi. Ruokohelven energiaosuus ei käytännössä voi ylittää 10 % ilman muutoksia laitosten käsittelylaitteissa (Flyktman 1998). Rauhalahden voimalaitoksen kokeissa saavutettiin maksimissaan 15 % osuus talvella, kun ruokohelpi toimitettiin turpeen seassa (Paappanen et al. 2008).

Ruokohelpisilpun aumavarastointia on selvitetty ja kostea syyskorjattu (kosteus 24–33 %) säilyi huonosti, varasto kuumeni ja "paloi" itsekseen. Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa laski (14,3 MJ/kg), kun se ruokohelvellä on yleensä yli 17 MJ/kg. Kevätkorjattu kuiva ruokohelpisilppu (kosteus alle 10 %) säilyi paremmin ja vaikka kosteus kohosi noin 24 %:iin, varastoauomojen lämpötilat eivät nousseet (Lindh et al. 1998).

Ruokohelpi on kevyttä kuten olki (taulukko 7.18) ja sen irtotiheyttä voidaan nostaa tiivistämisellä. VTT:llä tehdyissä kokeissa irtotiheyden maksimiarvoksi saatiin 218 kg/i-m³ (164 kg_{k.a./i}-m³), kun se ennen koetta oli 91,5 kg/i-m³ (69 kg_{k.a./i}-m³).

Ruokohelpipellettien ominaisuuksia on taulukossa 7.19.

Taulukko 7.18. Ruokohelven korjuukokeissa erilaisilla silppureilla tuotettujen silppujen pituudet ja irtotiheydet (Lindh et al. 1998).

Silppuri	Tarkkuus-silppuri Nokka 2000	Tarkkuus-silppuri JF-850*	Kaksoissilppuri Elho Super Louko		Itseniittävä silppuri Hietaranta	Tarkkuus-silppuri JF-900*	Maissin korjuukone Kemper
Paikka	Jokioinen	Alavus	Alavus	Alavus	Alavus	Liminka	Liminka
Silpun pituus	Silpun massaosuus, p-%						
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
IRTOTIHEYYS KUIVA-AINEESSA							
kg/m ³	59-61	59-61	50	50	50	93,7	83,8

* Asetus 15 mm

Taulukko 7.19. Ruokohelpipellettien ominaisuuksia (Vapo Oy).

Ominaisuus	Pelletti 1	Pelletti 2	Pelletti 3
Kosteus, p-%	8,9	10,8	11,7
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	18,45	19,06	19,57
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	17,28	17,86	18,24
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg ar	15,52	15,67	15,82
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%			
Tuhka (815 °C)	7,3	5,4	
Tuhka (550 °C)			3,5
Hiili, C	46,5		49,5
Vety, H	5,8		6,1
Typpi, N	0,56	1,14	0,52
Kloori, Cl		0,050	0,016
Rikki, S	0,07	0,13	0,05
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, mg/kg			
Natrium, Na		< 21	170
Kalium, K		2 200	1 100
OMINAIUUDET SAAPUMISTILASSA			
Mekaaninen kestävyys (Ligno), p-%	91,2		97,1
Mekaaninen kestävyys (EN standardi), p-%			94,3
Irtotiheys, kg/m ³			659
Pituus, L, mm			15,1
Hienoaines, F, p-%			0,15
Muodonmuutoslämpötila, DT, °C	1 160	> 1 420	1 180
Pehmenemislämpötila, ST, °C	1 190	> 1 420	1 200
Puolipallolämpötila, HT, °C	1 240	> 1 420	1 300
Sulalämpötila, FT, °C	1 340	> 1 420	1 380

Järviruoko (*Phragmites australis*) on kookkain luonnonkasvi Suomessa. Se kasvaa hyvinkin kolmen metrin mittaiseksi, mutta puolet sen pituudesta on veden alla. Juurakko on pitkä, paksu, haarova ja monivuotinen. Lehdet saattavat olla jopa 2 cm leveät. Ruoko leviää pääasiassa juurakoista. Järviruoko viihtyy parhaiten runsasravinteisissa vesistöissä, mutta sitä kasvaa myös soilla ja vesijättömailla. Järviruoko on vuosituotos on 5–12 tonnia/ha. Talvella korjatun ruo'on kosteus on alle 20 %, jolloin järviruoko on varastointikelpoista. Järviruoko on tehollinen lämpöarvo on keskimäärin 17,5 MJ/kg (Puuronen et al. 1994, Taipale 1996). Taulukossa 7.20 on esimerkki keväällä korjatun järviruoko'on tuhka-analyysistä.

Taulukko 7.20. Keväällä korjatun järviruoko'on tuhka-analyysi (Puuronen et al. 1994).

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

7.5 Eläinperäiset tähteet

Eläinperäisiä tähteitä on tutkittu Suomessa melko vähän. VTT:llä on tutkittu lihaluujauhon seospolttoa kivihiilen kanssa leijupoltossa (Aho & Ferrer 2005) sekä myös hevosen- ja kananlannan käyttöä polttoaineena. Taulukossa 7.21 on VTT:n kokeissa käytettyjen lihaluujauhon ja kananlannan ominaisuuksia.

Taulukko 7.21. Lihaluujauhon ja kananlannan ominaisuuksia (Aho & Ferrer 2005).

Ominaisuus	Lihaluujauho (< 5 mm)	Kananlanta
Kosteus, p-%	5,6	
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	19,38	
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	18,16	15,7
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%		
Haihtuvat aineet	71,9	
Tuhka (550 °C)	18,3	
Tuhka (815 °C)	17,8	16,0
Hiili, C	44,9	
Vety, H	6,4	
Typpi, N	11,2	0,45
Rikki, S	0,97	
Kloori, Cl	0,35	0,54
Happi, O (erotus)	18,77	
Pii, Si		0,36
Fosfori, P		1,60
Kalium, K		3,10
Kalsium, Ca		1,95
Magnesium, Mg		0,61
Alumiini, Al		0,04
Natrium, Na		0,50

Taulukossa 7.22 on hevosenlannan analyysjä. Muita eläinlannan arvoja on luvussa 12.4. Hevonen tuottaa vuodessa noin 17 m³ lantaa, joka sisältää myös kuivikkeen. Kuivikkeena käytetään turvetta tai sahanpurua.

Taulukko 7.22. Hevosenlannan ominaisuuksia (Vapo Oy 2016 julkaisematon aineisto, Tyni et al. 2009, Lundgren & Pettersson 2009).

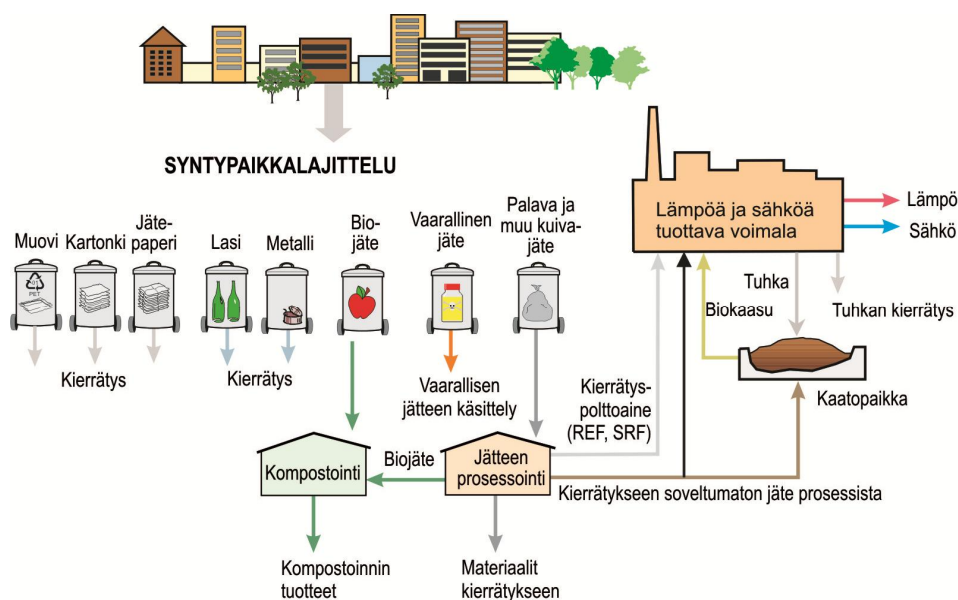
Ominaisuus	Hevosenlanta 1	Hevosenlanta 2	Hevosenlanta 3
Kosteus, p-%	69,9	80,3	77,6
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	3,39	1,49	
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg, k.a.	18,04	18,74	
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg, k.a.	16,90	17,55	
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%			
Tuhka (550 °C)	13,3	11,0	
Tuhka (815 °C)	12,4	10,7	7,5
Hiili, C	45,8	46,4	45,0
Vety, H	5,2	5,5	6,0
Typpi, N	1,49	1,11	1,5
Haihtuvat aineet	63,6		
Rikki, S	0,19	0,13	< 2
Happi, O		36,16	38
Kloori, Cl	0,62	0,13	
Fluori, F	0,003		
Pii, Si			1,71
Fosfori, P			0,47
Kalium, K	1,45		0,94
Kalsium, Ca	0,62		0,32
Magnesium, Mg	0,26		0,29
Alumiini, Al			0,10
Natrium, Na	0,4		0,23
Rauta, Fe			0,04
Titaani, Ti			0,002
Mangaani, Mn			0,02
Sinkki, Zn			157
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, mg/kg			
Arseeni, As	1,4		
Kadmium, Cr	0,07		
Elohopea, Hg	< 0,05		
TUHKAN SULAMISKÄYTTÄYMINEN (tuhkauslämpötila 550 °C)			
Muodonmuutoslämpötila, DT, °C	1 140		
Pehmenemislämpötila, ST, °C	1 170		
Puolipallolämpötila, HT, °C	1 200		
Juoksevuuslämpötila, FT, °C	1 230		

8. Kierrätyspolttoaineet

8.1 Jätteiden synty

Valtakunnallisen jätesuunnitelman tavoitteena on vakiinnuttaa yhdyskuntajätemäärää 2000-luvun tasolle (2,3–2,5 miljoonaa tonnia/vuosi) ja kääntää jätemäärä vuoteen 2016 mennessä laskuun. Tavoitteena on jätteiden synnyn vähentäminen materiaalihyötykäyttöä kehittämällä ja energiakäyttöä lisäämällä kaatopaikkakuormituksen vähentämiseksi. Jätteitä muodostuu vuosittain noin 97 miljoonaa tonnia. Jätteiden kokonaismäärään luetaan tilastollisesti mukaan kaikki alkutuotannon jättemateriaalit lukuun ottamatta metsään jääviä puunkorjuutähteitä. Suurimmat jätemäärät (noin 90 %) 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 loppukäsittelellä esimerkiksi sijoittamalla ne kaatopaikoille. Hyödyntämisessä etusijalle asetetaan hyödyntäminen aineena, mutta jos näin ei voida taloudellisista tai ympäristösyistä tehdä, jätteet voidaan hyödyntää polttamalla (Häkkinen et al. 2014).

Kierrätyspolttoaineet voivat olla teollisuuden, yritysten ja yhdyskuntien syntypistelajiteltuja, kuivia ja polttopolteisia materiaaleja sellaisenaan tai niistä valmistettuja polttoaineita, joilla korvataan olemassa olevien lämpö- ja voimalaitosten tai muiden termisten prosessien kiinteitä polttoaineita. Kuva 8.1 havainnollistaa, mitkä fraktiot ovat sopivia energiantuotantoon joko kiinteänä polttoaineena tai jalostettuna joko pelleteiksi tai orgaaniset jätteet biokaasuksi (kohta 12.4).

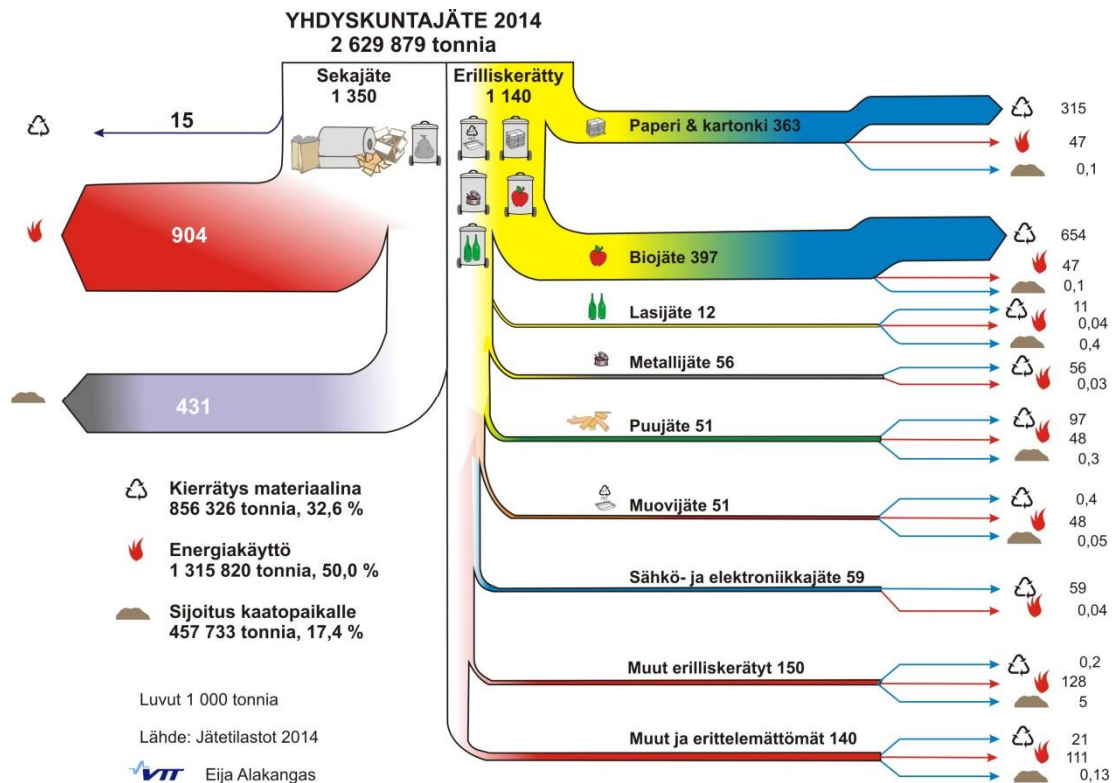


Kuva 8.1. Jätteiden hyötykäytön ja energiakäytön vaihtoehdot. Kuva: VTT.

Lähes 50 % Suomessa vuonna 2014 kertyneestä yhdyskuntajätteestä poltettiin (kuva 8.2). Polton osuus on kasvanut erittäin nopeasti, sillä kymmenen vuotta aiemmin jätteestä poltettiin vain 12 %. Jätteiden kaatopaikkasijoitus on sitä vastoin laskenut kutakuinkin samalla nopeudella eli käytännössä kaikki polttoon toimitettu yhdyskuntajäte on pois kaatopaikoilta. Kaatopaikoille vietiin enää alle viidennes jätteiden kokonaismäärästä (Jätetilasto 2014).

Vuonna 2014 yhdyskuntajätettä kertyi yhteensä 2,6 miljoonaa tonnia. Verrattaessa syntyneitä yhdyskuntajättemääriä asukasta kohden vuodessa, jätemäärä on pysytellyt noin 500 kg/asukas/v koko 2000-luvun ajan. Yhdyskuntajätteet syntyvät kotitalouksissa ja palveluiloilla, ja suurimmat erät ovat paperi- ja kartonkijätettä, biohajoavaa keittiö- ja ruokalajätettä sekä pakkauksia ja romua. Kotitalouksien osuus yhdyskuntajätteiden kokonaismäärästä on arvioitu olevan vajaat 60 %. Lajittelemattoman, palavan sekajätteen määrä on kuitenkin suurin ja kasvamassa polttokäsittelyn yleistyessä (Jätetilasto 2014, Salmenperä et al. 2015).

Yhdyskuntajätteiden energiahyödynnykseen toimitettu määrä oli 1,3 miljoonaa tonnia ja kaatopaikoille vietiin 460 000 tonnia vuonna 2014. Loppuosa eli 856 000 tonnia kierrätettiin eli hyödynnettiin materiaalina, josta suurimmat erät olivat paperia, biohajoavaa keittiöjätettä ja metalli- ja sähkölaiteromua. Kierrätysmäärät ovat pitkään pysyneet melko samoina, mutta trendi näyttäisi kuitenkin olevan lievästi nouseva (kuva 8.2).



Kuva 8.2. Yhdyskuntajätteiden hyödyntäminen vuonna 2014. Lähde: Jätetilasto 2014. Kuva: VTT.

Jätteenpolttolaitoksia toimii kuudella paikkakunnalla ja lähivuosina valmistuu laitos kolmelle uudelle paikkakunnalle. Jätteenpolton yleistyminen on ollut nopeaa ja suurin osa kapasiteetista on valmistunut vuoden 2012 jälkeen. Seitsemässä teollisuusyrityksien ja yhdyskuntien voimalaitoksessa on kierrätyspolttoaineen käyttö rinnakkaispolttona merkittävää. Lisäksi 19 laitosta voi käyttää kierrätyspolttoaineita murskattuna muiden polttoaineiden seospolttoaineena 5–30 % polttoaineen käyttömäärästä (Pöyry 2015).

Energiakäyttöön soveltuvat helpoimmin teollisuuden ja kaupan pakkaus-, paperi- ja muovijätteet sekä rakennusjätteet. Yhdyskuntajätteistä soveltuvat metalli- ja lasijätteen erottelun jälkeen termiseen energiatuotantoon parhaiten kuivat jätteet. Märät biojätteet yleensä kompostoidaan tai käytetään biokaasun valmistukseen.

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).

Kierrätyspolttoaineiden tuotantoketju muodostuu energijakeen 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 energijakeen syntypaikat ja eri materiaaliosuudet. Kierrätyspolttoaineiden turvallinen käyttö edellyttää vähän haitta-aineita ja epäpuhtauksia, hyvää syntypaikkalajittelua sekä asianmukaista valmistusprosessia.

Kierrätyspolttoaineiden raaka-aineet ovat peräisin useista eri lähteistä (taulukko 8.1), mistä johtuen niiden laatu vaihtelee (taulukko 8.2). Kierrätyspolttoaineen laatuksitekereistä tärkeimmät ovat

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

Taulukko 8.1. Energijätteen keskimääräinen koostumus (Salmenperä et al. 2015).

Jätejake	Osuus, p-%
Muovi	33
Paperi/kartonki	46
Puu	4
Muu palava	2
Epäpuhtaudet	15

Palakoko on kaikissa mursketta (irtojätettä, fluffia) polttavissa laitoksissa osoittautunut ratkaisevaksi tasalaatuisuuden, syötettävyyden ja palamisen onnistumisen kannalta. Kierrätyspolttoaineen nimellinen palakoko 63 mm ja maksimipalakoko 300 mm ovat sopivia polttoaineen syöttölaitteille. Tiettyjen fraktioiden, kuten muovin, tekstiilien ja kumin silppuaminen/murskaaminen vaadittuun palakokoon on enemmän 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 höyryntuotuslämpötiloissa sähköntuotannon yhteydessä tulee ottaa huomioon polttoaineen klooripitoisuuden mahdollisesti aiheuttama kuumakorrosioriski (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). Taulukossa 8.2 on esitetty VTT:n mittauksia kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksista.

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 ensimmäiseen kylmempään pintaan, joka tavallisesti on hila tai tulistinpinta. Polttoaineessa oleva alumiini on eräissä tapauksissa johtanut jopa kattilan tukkeutumiseen. Alumiinilla on myös muita haittavaikutuksia. Kierrätyspolttoaineet voivat sisältää lisäksi lyijyä, jonka yhdisteet ovat voimakkaasti liikaavia ja korrodoivia. Suodintuhkien eräiden raskasmetallien pitoisuudet (Cr, Cu, Pb ja Zn) yleensä hieman nousevat verrattuna biopolttoaineisiin (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 ympäristökijät: kosteus (materiaalikosteus ja suhteellinen ilman kosteus), lämpötila, ravinteet, pH, varastointiaika ja vuodenaika (Juvonen 1998).

Taulukko 8.2. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksien vaihtelu (Alakangas 2000).

Ominaisuus	Kaikkien vaihteluväli	SRF I Keskiarvo eri analyyseistä	SRF III Keskiarvo eri analyyseistä
Kosteus, %	5–30	9,1 irtotavara 3,2 pelletit	28,5 irtotavara 3,2 pelletit
Irtotiheys saapumistilassa, kg/m ³		180 irtotavara 300 pelletit	210 irtotavara 300 pelletit
Tuhka, % kuiva-aineessa	1–16	5,9	9,5
Haihtuvat aineet, % kuiva-aineessa	70–86		
Lämpöarvot, MJ/kg			
Kalorimetrinen	20–40	24,7	22,9
Tehollinen kuiva-aineessa	17-37	23,1	21,5
Tehollinen saapumistilassa		20,8	14,6
Alkuainekoostumus, p-% k.a.			
Hiili, C	48–75	56,0	52,9
Vety, H	5–9	7,4	7,3
Typpi, N	0,2–0,9	0,63	0,71
Rikki, S	0,05–0,20	0,16	0,13
Kloori, Cl	0,03–0,7	0,19	0,71
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen		Hapettavat / pelkistävät olosuhteet	
Muodonmuutoslämpötila, DT		1 150–1 220 / 1 100–1 200 °C	
Puolipallolämpötila, HT		1 200–1 260 / 1 200–1 250 °C	
Juoksevuuslämpötila, FT		1 210–1 265 / 1 220–1 270 °C	

SRF I = syntypistelajiteltu pakkauksia ja puujätettä sisältävä seos

SRF III = syntypistelajiteltu kotitalouden jäte

Lassila & Tikanoja on tutkinut kierrätyspolttoaineen laatua ja ominaisuuksia ja vuosilta 2006–2014 on noin 400 analyysitulosta (Hannula 2014). Niiden perusteella kierrätyspolttoaine-erien keskimääräinen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa oli 17,9 MJ/kg. Kosteuspitoisuus oli näytteissä keskimäärin 20,2 %. Rikkipitoisuutta (näytteiden keskiarvo 0,24 %) nostaa erityisesti rakennusjätteen joukossa oleva kipsi ja klooripitoi-

suutta (keskiarvo 0,5 %) kovat muovit, kumi ja tekstiilit. Muita keskimääräisiä ominaisuuksia kuiva-aineessa: bromi 0,013 %, Na+K summa 0,34 %. Seuraavat ominaisuudet on ilmoitettu mediaaneina kierrätyspolttoainestandardin SFS-EN 15358:2011 mukaisesti: elohopea 0,12 mg/kg, kadmium 0,4 mg/kg, kupari 85 mg/kg, lyijy 35 mg/kg ja sinkki 250 mg/kg. Kierrätyspolttoaineen materiaalikoostumus ja laatuominaisuudet muuttuvat kierrätyksen ja uudelleenikäytön lisääntyessä. Kun teknologia kehittyy, voi olla että pahvi, paperit ja muovit ohjautuvatkin kierrätykseen. Silloin kierrätyspolttoaineen koostumus ja lämpöarvo ovat hyvinkin erilaiset. Materiaalikierrätyksen sivuvirroista ja käsittelyrejekteistä löytyy jatkossa hyvin kierrätyspolttoaineen raaka-aineeksi soveltuvia virtoja (Hannula 2014).

8.2 Pakkaukset ja jätepaperi

Kuitupohjaisiin pakkausmateriaaleihin kuuluvat sekä pelkästään kuitumaisesta raaka-aineesta valmistetut tuotteet että erilaiset yhdistelmäateriaalit. Kuitupohjaisia pakkauksia ovat mm. erilaiset kartonkipakkaukset, aaltopahvi, paperisäkit, voimapaperi jne. Taulukoissa 8.3–8.6 on eri paperituotteiden ominaisuuksia.

Taulukko 8.3. Kuitumaisten aineiden palamisteknisiä ominaisuuksia (Viinikainen & Aittola 1990, Vesterinen 1997).

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

Taulukko 8.4. Jätepaperin ominaisuuksia (Thun & Korhonen 1999).

OMINAISUUS		PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%	
Kosteus, %	3,9	Tuhka	28,2
LÄMPÖARVO, MJ/kg		Haihtuvat aineet	64,5
Kalorimetrinen kuiva-aineessa	12,5	Hiili, C	34,1
Tehollinen kuiva-aineessa	11,6	Vety, H	4,4
Tehollinen saapumistilassa	11,0	Typpi, N	0,1
Kloori Cl, mg/kg kuiva-aineessa	65	Rikki, S	0,04

Taulukko 8.5. 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'	
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%											
Haihtuvat aineet	6,7	61,1			64,2		68,4	61,4	59,6	61,6	
Tuhka	5,8	6,1	2,8	18	5,8	0,6	4,7	8,5	7,8	9,1	14,5
Hiihi, C	60,1	59,3			57,7		55,1	53,4	58,9	53,7	
Vety, H	5,5	5,6			6,7		6,1	6,0	5,5	6,0	
Typpi, N	1,0	1,1	0,17	0,80	1,6	0,25	1,6	1,6	1,2	1,6	1,13
Rikki, S	0,37	0,36	0,02	0,08	0,35	0,01	0,27	0,36	0,37	0,37	0,14
Happi, O (erotus)	27,2	27,5			27,7		32,1	29,9	26,1	29,0	
Kloori, Cl	0,06	0,07	0,06	0,00013	0,10	0,54	0,11	0,33	0,18	0,29	0,86
Kadmium, Cd			< 0,0001	0,0026		0,0006					1
Kromi, Cr			0,001	0,013		0,001					100
Kupari, Cu			< 0,001	0,0020		< 0,001					140
Elohopea, Hg			< 0,000005	< 0,0001		0,00009					0,12
Lyijy, Pb			0,003	0,0019		0,002					300
Tina, Sn			< 0,001	0,003		< 0,001					< 10
Sinkki, Zn			0,0020	0,023		0,015					500
LÄMPÖARVO, MJ/kg											
Kalorimetrinen, k.a.	23,0	22,7			24,0		22,0	21,6	22,5	21,9	
Tehollinen											
* kuiva-aineessa	21,8	21,5	19,6	31,8	22,6	26,5	20,7	20,3	21,3	20,6	18,6
* saapumistilassa			16,6	19,4		25,7					11,4

* Kosteuspitoisuus analysoitu märkäpainosta
 Ref. 1 = turve/kivihiihi/puuhakeseos
 PDF = pakkauksista saatu polttoaine
 LPB = nestepakkauskartonki, 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 = polyeteenitereftalaatti, kuluttajilta kerättyjä juomapulloja

Taulukko 8.6. Erilaisten pakkauspoltoaineiden ja pääkaupunkiseudulla kerätyn kuivajätteen ominaisuuksia (Vesterinen 1997, Manninen et al. 1994, Manninen 1996).

Ominaisuus	Ref.	LBP	LBP-Al	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'	
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%								
Haihtuvat aineet	68,6	89,6	82,7	75,7	73,7	75,7	57,7	
Tuhka	3,83	1,73	9,22	13,3	12,6	14,3	8,2	15,8
Hiili, C	55,8	49,3	51,3	49,6	45,6	48,7	59,5	
Vety, H	5,62	6,84	7,61	6,92	6,17	6,90	5,4	
Typpi, N	5,72	0,04	0,25	0,95	0,99	0,88	1,3	1,19
Rikki, S	0,16	0,07	0,08	0,15	0,20	0,2	0,40	0,17
Happi, O (erotus)	0,05	0,05	0,02	0,46	0,32	0,52	0,20	1
Kloori, Cl								0,0002
Kadmium, Cd								0,013
Kromi, Cr								0,007
Kupari, Cu								0,00019
Elohopea, Hg								0,026
Lyijy, Pb								< 0,001
Tina, Sn								0,067
Sinkki, Zn	0,05	0,05	0,02	0,46	0,32	0,52	0,20	1
LÄMPÖARVO, MJ/kg								
Kalorimetrinen, k.a.	22,6	20,3	25,1	20,9	18,6	21,7	22,8	
Tehollinen								
* kuiva-aineessa	21,3	18,9	23,4	19,3	17,4	20,4	21,6	18,6
* saapumistilassa								11,6

Ref. = turve

LBP = nestepakkauskartonki

LPB-Al = alumiinia sisältävä nestepakkauskartonki

Stormossen-REF = Stormossenin kierrätyspoltoaine

YTV 1 = YTV:n Nesteen kierrätyspoltoainetta

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

YTV 3 = YTV:n käsin lajiteltua pakkausjätettä murskattuna

YTV 4 = YTV:n käsin erotettua kotitalouden kuivajätettä

Suomen yhdyskuntajätteistä muovien osuus on noin 5 % erilliskerätyn jätteen kokonaismäärästä (painosta). Pakkauksia käytettiin vuonna 2013 lähes 717 000 tonnia, joista 58 % on kierrätetty. Paperi, pahvi, kartonki ja muovit muodostivat markkinoiden pakkauksista 53 % vuonna 2013 (Pirkanmaan ELY-keskus, www.ymparisto.fi). Käytön jälkeen pakkauksien materiaali voidaan hyödyntää joko raaka-aineena uusiin tuotteisiin tai energiana. Luontoon jätettynä muovit hajoavat hitaasti ja ovat esteettinen ongelma. Muovien raaka-aineena käytetään öljyä ja se koostuu yhdestä tai useammasta hiilivetypolymeeristä, mahdollisesta lujiteaineesta sekä erilaisista täyte- ja seosaineista. Muovien lämpöarvo on hyvin korkea (20–46,5 MJ/kg) (taulukko 8.7).

Yleisimmin käytetty pakkausmuovi on polyeteeni (PE). Lisäksi polypropeenä (PP), polystyreeniä (PS) ja polyeteenitereftalaattia (PET) käytetään merkittäviä määriä sekä jonkin verran myös polyamidia (PA) ja polyvinylkloridia (PVC). PVC on ongelmallinen muovi voimalaitoksien kattiloissa, sillä se sisältää klooria 57 % (Alakangas 1992).

Muovien tunnistaminen on vaikeaa ja eräänä tunnistamiskeinona käytetään polttokoetta. Polttokoekessa muovit voi tunnistaa mm. savun värin ja hajun perusteella. Polyeteeni sulaa, ennen kuin se syttyy ja sen savu on vaaleaa ja haju kynttilän hajua muistuttava. Polystyreenin ja polyeteenitereftalaatin palaessa muodostuu tummaa savua. PVC:n haju on pistävä ja savun väri on tummaa. Useissa muovipakkauksissa on merkintä, mikä helpottaa niiden tunnistamista (taulukko 8.7). Jätteisiin joutuessaan niiden tunnistaminen on vaikeaa.

Taulukko 8.7. 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-LD PE-HD	Heikko, vaalea	Suuri	Kyllä	46	320	350
Polypropeenä, PP  PP	Heikko, vaalea	Suuri	Kyllä	46,5	340	350
Kova polyvinyylikloridi, PVC  PVC	Normaali, harmaa	Heikko	Ei	20	400	450
Pehmitetty PVC	Voimakas, harmaa	Heikko	Ei	20–30	330–400	420–430
Polystyreeni, PS  PS	Voimakas, tumma	Suuri	Kyllä	42	350	490
Polyesterit	Normaali, tumma	Hartsit: suuri	Ei	6–18	32 (hartsit)	490 (hartsit)

Polyesterit: tyydyttymättömät polyesterihartsit

Hartsit: nestemäinen, kovettamaton polyesterihartsit

Yhdyskuntajätteen polttokelpoisista jätejakeista valmistetun polttoaineen (SRF, RDF) lämpöarvo on saapumistilassa 10–15 MJ/kg. Teollisuudesta kerätyn lähinnä pakkauksia sisältävän jätteen tehollinen lämpöarvo 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 %).

8.3 Jätepelletit

Pelletointi on suositeltava tapa, jolla irtojätteen (fluffin) haittoja voidaan poistaa. Pelletti takaa tasalaatuisen polttoaineen, jonka käsiteltävyys on rinnastettavissa hakkeeseen ja palaturpeeseen. Ewapower Oy:n jätepelletointilaitos Pietarsaareissa valmistaa polttoainepellettejä keittiöjätteestä erotellusta polttokelpoisesta jätteestä sekä myös teollisuuden polttokelpoisesta jätteestä (taulukko 8.8).

Taulukko 8.8. REF-pellettien ominaisuuksia (Ajanko et al. 2005, Vesterinen 1995 ja 1997).

Polttoaine	REF-pelletti Ajanko	REF-pelletti Vesterinen
Kosteus, %		2,5–4,5
LÄMPÖARVOT, MJ/kg		
Kalorimetrinen kuiva-aineessa		23–26
Tehollinen kuiva-aineessa		22–25
Tehollinen saapumistilassa		21–24
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%		
Tuhka		4–10
Hiili, C		52–58
Vety, H		6,5–8,5
Typpi, N	0,45	0,5–1,5
Rikki, S	0,11	0,10–0,20
Kloori, Cl	0,65	0,3–0,9
METALLIT KUIVA-AINEESSA, mg/kg		
Arseeni, As	8,7	1,7–2,7
Kadmium, Cd	1,3	0,1–4,0
Kromi, Cr	37	0,75–44
Kupari, Cu	82	45–51
Lyijy, Pb	47	50–100
Sinkki, Zn	270	140–290
Elohopea, Hg	0,07	
METALLIT KUIVA-AINEESSA, g/kg		
Alumiini (kokonais), Al		4,5–10
Magnesium, Mg		0,6–1,5
Kalium, K		1,2–2,5
Kalsium, Ca		8–21
Natrium, Na		2–3,5
Kalium + Natrium, K + Na	0,24	
Nikkeli, Ni	4,2	
Koboltti, Co	5,6	
Vanadiini, V	4,2	
Antimoni, Sb	12	
Tallium, Tl	< 1	
Mangaani, Mn	110	

8.4 Teollisuuden ja rakennustoiminnan jätteet

VTT on tutkinut monenlaisten teollisuuden ja yhdyskuntien jättepolttoaineiden ominaisuuksia. Seuraavissa taulukoissa on koottu niiden analyysituloksia (taulukot 8.9–8.12).

Taulukko 8.9. VTT:n julkaisemattomia kierrätyspolttoaineiden analyysituloksia erilaisista lähinnä teollisuudesta kerätyistä polttojakeista (Alakangas 2000).

Polttoaine	Teollisuuden palava jäte (pakkauksia)	Kotitalouden kuivajäte	Poltto- jake 1	Poltto- jake 2	Poltto- jake 3	Poltto- jake 4	Keskiarvonäyte edellisistä polttojakeista
Kosteus, %	19,5	29,3	6,73	13,3	22,7	18,5	18,3
LÄMPOÄRVOT, MJ/kg							
Kalorimetrinen kuiva- aineessa	24,9	23,3	18,3	21,3	21,0	21,1	21,7
Tehollinen							
* kuiva-aineessa	23,2	21,7	17,0	19,8	19,6	19,6	20,2
* saapumistilassa	18,2	14,6	15,7	16,9	14,6	15,5	15,9
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%							
Hilli, C	54,7	53,	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
Tuhka	5,53	13,8	6,22	5,36	9,06	5,89	7,64
METALLIT KUIVA-AINEESSA, mg/kg							
Arseeni, As	4,38	14,2	0,70	0,54	0,49	2,76	3,85
Kadmium, Cd	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 3	< 3	-
Kromi, Cr	7,66	62,4	8,57	5,74	< 20	< 20	21,1
Kupari, Cu	14,5	522	21,8	24,2	24	21	104,6
Lyijy, Pb	12,1	136	11,9	9,5	< 20	< 20	42,4
Sinkki, Zn	56,2	537	59,1	75,8	51	59	139,7
Elohopea, Hg	0,010	0,16	0,063	0,012	0,008	0,030	0,047
METALLIT KUIVA-AINEESSA, g/kg							
Alumiini, Al	2,95	11,0	7,04	4,70	7,06	2,58	5,89
Magnesium, Mg	0,98	1,74	1,60	1,11	1,09	0,78	1,22
Kalium, K	1,49	3,77	0,31	0,52	1,16	0,74	1,33
Kalsium, Ca	14,5	14,7	6,32	6,69	14,9	5,12	10,4
Natrium, Na	4,50	4,95	0,93	1,18	4,19	1,56	2,89

Taulukko 8.10. Kaupan ja teollisuuden erilliskerätyistä jätteistä valmistetun kierrätyspolttoaineen ominaisuuksia (Vesanto et al. 2007).

OMINAISUUS	Keskiarvo	Mediaani	Analyysitulosten lukumäärä, kpl
Kosteus, p-%	18,2 (5,9)	17,7	159
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	16,7 (2,3)	16,0	159
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%			
Tuhka	6,4 (2,2)	6,0	163
Kloori, Cl	0,28	0,20	163
Rikki, S	0,13	0,10	163
Typpi, N	0,71	0,66	163
Natrium + Kalium, Na + K	0,24	0,20	163
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, mg/kg			
Elohopea, Hg	0,06	0,02	152
Kadmium, Cd	0,63	0,24	152
Sinkki, Zn	360	310	37
Lyijy, Pb	59	37	40
Arseeni, As	5,3	3,3	21
Koboltti, Co	6,6	4,9	21
Kromi, Cr	110	68	21
Kupari, Cu	870	180	21
Nikkeli, Ni	41	29	21
Vanadiini, V	5,2	5,1	21
Antimoni, Sb	140	110	21
Tallium, Tl	0,8	0,5	21
Mangaani, Mn	105	99	21

Suluissa hajonnat.

Taulukko 8.11. Teollisuuden tuotantojätteistä valmistetun kierrätyspolttoaineen ominaisuuksia (Vesanto et al. 2007).

OMINAISUUS	Keskiarvo	Mediaani	Analyysitulosten lukumäärä, kpl
Kosteus, p-%	8,4 (4,0)	7,6	55
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	22,3 (3,5)	22,1	55
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%			
Tuhka	5,0 (1,9)	4,7	20
Kloori, Cl	0,06	0,04	55
Rikki, S	0,10	0,08	26
Typpi, N	0,88	0,83	22
Natrium + Kalium, Na + K	0,15	0,15	22
Elohopea, Hg, mg/kg	0,008	0,006	21
Kadmium, Cd, mg/kg	0,03	0,02	22

Suluissa hajonnat.

Taulukko 8.12. VTT:n analyysituloksia erilaisista rakennusjätteistä (Vesterinen 1995 ja 1997).

Polttoaine	Rakennusjäte	Ratapölkkyhake ¹⁾	Kyllästetty puu ²⁾	Laminaatti ³⁾	Kerrosrakenteellinen levy ³⁾
Kosteus, %	15–35	45,6	23,4	1,93	2,20
LÄMPÖÄRVOT, MJ/kg					
Kalorimetrinen kuiva-aineessa	20–21	21,1	20,2	17,4	20,4
Tehollinen					
* kuiva-aineessa	18,6–19,5	19,8	18,9	16,7	19,3
* saapumistilassa	11,2–15,6	9,6	13,9	16,3	18,8
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%					
Haihtuvat aineet		81,7	82,7	55,9	69,4
Tuhka	1,7–2,6	4,0	1,4	42,7	21,3
Hiili, C	49–51	52,3	50,4	39,2	51,7
Vety, H	6–6,5			3,4	5,0
Typpi, N	0,1–0,8	0,19	0,13	0,01	0,5
Rikki, S	0,01–0,2	0,07	0,02	0,0	0,0
Kloori, Cl	0,01–0,1	0,008	0,009	0,03	0,01
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, mg/kg					
Arseeni, As	0,8–70	5,5	3 214		
Elohopea, Hg		0,13	0,15		
Kadmium, Cd		< 0,1	0,31		
Koboltti, Co		1,97	< 0,2		
Kromi, Cr		21,8	5 272		
Kupari, Cu		6,1	1 911		
Lyijy, Pb		2,37	1,80		
Mangaani, Mn		115	81		
Nikkeli, Ni		7,79	3,55		
Sinkki, Zn		19	12,1		
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, g/kg					
Kalium, K	0,5–1,0	0,84	0,20		
Natrium, Na	0,5–1,0	0,72	0,068		

¹⁾ kreosiittikyllästetty

²⁾ kupari-kromi-arseenikyllästettyä lähinnä sähköpylväitä

³⁾ sisältää lasikuitua

Nasrullah (2015) on tutkinut kierrätyspolttoaineen valmistuksen materiaali- ja energiataseita, kun raaka-aineena on ollut kotitalouksista kerätty energijäte, kaupan ja teollisuuden jäte sekä rakennus- ja purkujätte. Näiden jäteraaka-aineiden ja niistä tehdyn kierrätyspolttoaineen ominaisuuksia on koottu taulukoihin 8.13 ja 8.14.

Taulukko 8.13. Eri jäteraaka-aineiden ja niistä valmistettujen kierrätyspoltoaineiden ominaisuuksia (Nasrullah 2015)

Ominaisuus	MSW → SRF		C&IW → SRF		C&DW → SRF	
	Koti- talouden energiajäte	Tuote	Kaupan ja teollisuus- den jäte	Tuote	Rakennus- ja purkujäte	Tuote
Kosteus, p-%	13,5	15,0	26,5	25,0	14,0	16,5
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%						
Tuhka (550 °C)	22,4	9,8	16,6	12,5	46,8	9,0
Hiili, C	47,0	53,0	48,0	57,4	30,0	50,0
Vety, H	6,2	7,4	7,0	8,0	4,0	6,4
Typpi, N	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	1,0
Rikki, S	0,2	0,2	0,2	0,3	0,7	0,3
Happi, O (erotus)	19,6	28,0	18,0	17,8	17,0	31,6
TEHOLLINEN LÄMPÖARVO, MJ/kg						
Saapumistilassa	16,7	20,2	13,0	18,0	9,8	18,0
Kuiva-aineessa	19,6	22,4	18,5	25,0	11,0	20,0

MSW = Municipal Solid Waste

C&IW = Commercial and Industrial Waste

C&DW = Construction and Demolition Waste

SRF = Solid Recovered Fuel

Taulukko 8.14. Eri jäteraaka-aineiden ja niistä valmistettujen kierrätyspolttoaineiden alkuainepitoisuuksia kuiva-aineessa (Nasrullah 2015).

	MSW → SRF		C&IW → SRF		C&DW → SRF	
	Koti- talouden energiajäte	Tuote	Kaupan ja teollisuus- jäte	Tuote	Rakennus- ja purkujäte	Tuote
PITOISUUDET, p-%						
Kloori, Cl	1,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4
Fluori, F	0,01	0,01	0,007	0,01	0,01	0,004
Bromi, Br	0,002	0,004	0,005	0,003	0,005	0,003
Rikki, S	0,2	0,2	0,2	0,3	0,7	0,3
PITOISUUDET, mg/kg						
Natrium, Na	7 920	1 590	2 990	3 460	8 370	1 470
Kalium, K	3 530	920	2 150	2 175	6 120	1 080
Kalsium, Ca	30 625	28 925	18 530	36 260	58 050	17 150
Magnesium, Mg	2 960	1 390	1 590	1 480	5 940	1 270
Fosfori, P	380	340	870	960	315	520
Alumiini, Al	12 400	6 260	7 300	8 200	18 090	4 800
Pii, Si	41 500	9 240	22 180	18 870	51 660	12 150
Rauta, Fe	6 680	1 390	4 400	4 840	7 560	1 275
Titaani, Ti	2 480	1 990	3 090	3 160	1 530	1 275
Kromi, Cr	150	370	290	50	135	35
Kupari, Cu	1 240	270	5 800	375	660	350
Mangaani, Mn	105	55	110	80	270	70
Nikkeli, Ni	50	11	20	20	38	8,0
Sinkki, Zn	560	230	4 120	335	400	175
Antimoni, Sb	70	540	7,2	50	42	84
Arseeni, As	3,4	0,7	5,0	1,8	15	6,6
Barium, Ba	468	280	290	290	260	138
Kadmium, Cd	1,0	0,7	1,2	0,6	1,5	4,4
Koboltti, Co	3,6	3,4	2,4	3,6	6,0	2,8
Lyijy, Pb	280	30	90	120	135	42
Molybdeeni, Mo	12,4	3,2	3,0	3,6	4,8	1,5
Seleeni, Se	1,2	0,5	0,5	0,5	1,8	2,7
Tallium, Tl	0,5	0,5	< 0,5	< 0,5	0,5	0,5
Tina, Sn	26	12	8,8	18,8	13,5	14,7
Vanadiini, V	20	8,0	6,0	5,3	23,4	4,0
Elohopea, Hg	0,15	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2

MSW = Municipal Solid Waste

C&IW = Commercial and Industrial Waste

C&DW = Construction and Demolition Waste

SRF = Solid Recovered Fuel

8.5 Autohajottamojäte ja rengasromu

VTT on tutkinut myös autohajottamojätteen ominaisuuksia ja sen soveltuvuutta kaasutukseen (Nieminen et al. 2006). Auton materiaalisällöstä keskimäärin 75 % on metallia, joka pystytään kierrättämään uusien tuotteiden raaka-aineeksi. Metallien jälkeen auton suurin materiaalityyppi on muovit, joita autossa on keskimäärin 9,1 %, sitten kumia noin 6 %. Muut materiaalityypit ovat liimat, maalit, lasi, tekstiilit, nesteet ja muut sekalaiset aineet. Autohajottamojätteen englanninkielinen termi on *Shredder Residue* (SR) tai *Automotive Shredder Residue* (ASR) sen alkuperästä riippuen.

Taulukossa 8.15 on esitetty keskimääräisiä autohajottamojätteen koostumuksia. Materiaalit ovat sekä kotimaiselta ja että ulkomaiselta toimijalta. Näytemäärä on kuitenkin liian vähäinen siihen, että analyysistä voisi vetää selkeitä johtopäätöksiä, mutta niistä käy silti ilmi se, kuinka ominaisuudet vaihtelevat riippuen jätteen alkuperästä ja sen prosessoinnista. Kuvassa 8.3 on keskimääräiset metallipitoisuudet kuiva-aineessa, p-%.

Taulukko 8.15. Autohajottamojätteen keskimääräisiä koostumuksia.

Jätteen alkuperä	Kotimainen SR	Ulkomainen ASR ¹	Ulkomainen normaali SR ³	Ulkomainen SR-2005 ⁵
Kosteus, p-%	3,9	3,1	8,3	12,9
Kuiva-aineessa, p-%				
Haihtuvat aineet	32,6	54,7	33,8	60,1
Kiinteä hiili	< 0,1	2,2	0,0	6,6
Tuhka	69,6	43,1	69,4 ⁴	33,4
Kuiva-aineessa, p-%				
Hiili, C	19,1	42,2	20,6	50,2
Vety, H	2,2	5,3	2,6	5,9
Typpi, N	0,6	1,4	0,7	1,3
Rikki, S	0,26	0,37	0,28	0,24
Happi, O (erotus)	8,2	7,7	6,6	9,1
Kuiva-aineessa, mg/kg				
Kloori, Cl	Ei analysoitu	17 000	9 000	25 000
Bromi, Br	Ei analysoitu	< 50 ²	260	2 100
Fluori, F	Ei analysoitu	270 ²	340	350
Elohopea, Hg	2,0	0,8 ²	1,3	1,6
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	8,5	14,9 ²	9,4	21,3

¹ Raaka-aine: 100 % ELV (End-of-Life Vehicles)

² Vain yksi näyte analysoitu

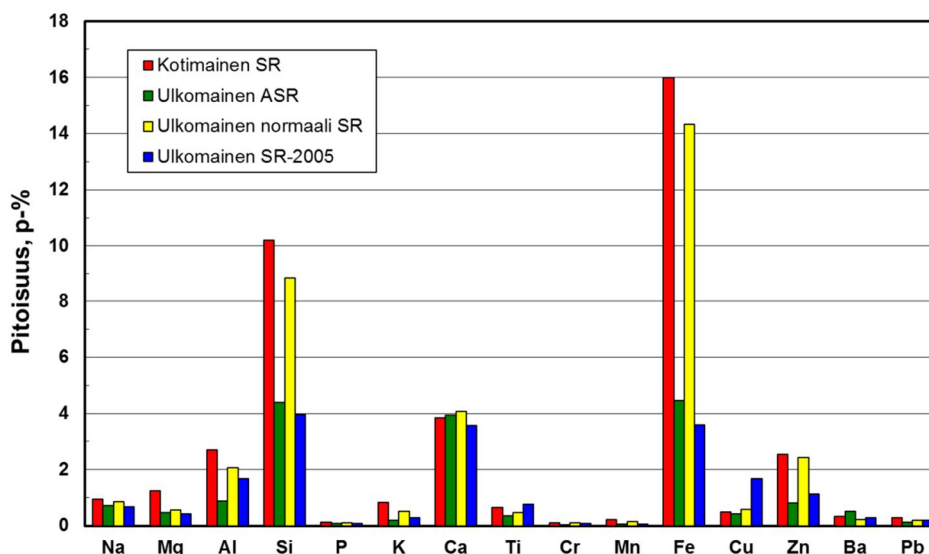
³ Raaka-aine: 20 % ELV + 80 % metallijäte

⁴ Korkea tuhkapitoisuus johtuu metallien hapettumisesta

⁵ Raaka-aine: 20 % ELV + 80 % metallijäte (*Advanced* prosessointi)

SR = Shredder Residue

ASR = Automotive Shredder Residue



Kuva 8.3. Autohajottamojätteen keskimääräisiä metallipitoisuuksia kuiva-aineessa, p-%. Kuva: VTT.

Rengasromua on varsin yleisesti käytetty sementtitiunien polttoaineena - joko kokonaisena tai murskattuna. Sementtitiunissa 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 paloittamojätteen 10–20 MJ/kg (Ranta 1999). Rengasromun ominaisuuksia on taulukossa 8.16.

Taulukko 8.16. Rengasromun polttoaineominaisuuksia (Ranta 1999).

Ominaisuus	Kumirouhe	Rengasmurske	Autonpurkujäte
Kosteus, %	0,5	1	6 (vaihteluväli 1–25)
Tiheys, kg/m ³	390	400	300–400
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	39	32	10–40 saapumistilassa
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%			
Tuhka	4,3	12	
Hiili, 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 seuraavanlainen (luvut ovat noin-arvoja): Al₂O₃ 5,8 %, Fe₂O₃ 0,3 %, TiO₂ 0,8 %, ZnO 48 %, CaO 1,8 %, K₂O 1,4 %, SiO₂ 30 % ja SO₃ 6,6 % (Teollisuusprosessien sivutuotteiden energiakäytön edellytykset 1988).

8.6 Kaatopaikkajätteen ominaisuuksia

VTT on tutkinut myös kaatopaikoille viedyn jätteen laatua kymmenen vuotta vanhalla ja 30 metriä korkealla kaatopaikalla (Kaartinen et al. 2013). Jätenäytteet, joiden ikä oli 5–10 vuotta, otettiin poraamalla kolmesta eri syvyydestä. Näytteen koko vaihteli 3,4–11,0 tonnia. Näytteet seulottiin ja lajiteltiin sekä käsin että mekaanisesti. Taulukkoon 8.17 on valittu yli 20 mm ja yli 70 mm näytteiden ominaisuuksia. Yli 20 mm jakeissa muovin osuus oli suurin, noin 24 % massasta. Vanhemmissa jätekertymissä muovin osuus oli pienempi. Manuaalisen lajittelun perusteella materiaalista 40–45 p-% on mahdollista polttojaetta. Käsinselonnassa 3–4 p-% oli metallia. Mekaanisessa seulonnassa saatiin magneettisia metalleja erotettua noin 1 p-%. Mekaanisella erottelulla saadaan noin 30 p-% polttojaetta.

Taulukko 8.17. Kaatopaikkajätteen ominaisuuksia (Kaartinen et al. 2013). Suluissa hajonnat.

Ominaisuus	Näytteet (palakoko yli 20 mm)		Näytteet (palakoko yli 70 mm)	
	Keskikerros	Alin kerros	Keskikerros	Alin kerros
Kuiva-ainepitoisuus, p-%	80 (3,5)	74 (3,5)	85	98
LÄMPÖARVO KUIVA-AINEESSA, MJ/kg				
Kalorimetrinen	24 (1,1)	24 (0,64)	26	21
Tehollinen	22 (1,0)	22 (0,62)	25	20
PITOISUUDET KUIVA-AINEESSA, p-%				
Alumiini, Al	1,5 (1,1)	2,2 (0,359)	1,2	1,5
Barium, Ba	0,03 (0,01)	0,02 (0,01)	0,06	0,005
Bromi, Br	< 0,01	0,02 (0,01)	0,01	< 0,01
Kalsium, Ca	3,0 (0,71)	3,8 (0,14)	3,8	3,9
Kloori, Cl	1,6 (1,2)	1,2 (0,0)	0,59	2,1
Kromi, Cr	0,01 (0,0)	0,01 (0,0)	0,01	0,02
Kupari, Cu	0,04 (0,04)	0,04 (0,03)	0,01	0,04
Fluori, F	< 0,01	0,06 (0,06)	< 0,01	< 0,01
Rauta, Fe	1,1 (0,80)	2,0 (0,28)	1,9	2,0
Kalium, K	0,52 (0,32)	0,48 (0,13)	0,52	0,52
Magnesium, Mg	0,40 (0,14)	0,41 (0,01)	0,35	0,34
Mangaani, Mn	0,03 (0,01)	0,04 (0,01)	0,04	0,04
Natrium, Na	0,71 (0,29)	0,60 (0,16)	0,52	0,45
Nikkeli, Ni	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01
Fosfori, P	0,10 (0,04)	0,01 (0,02)	0,08	0,1
Lyijy, Pb	0,03 (0,02)	0,03 (0,02)	< 0,01	0,03
Rikki, S	0,57 (0,01)	0,65 (0,04)	0,9	0,71
Antimoni, Sb	0,03 (0,02)	0,04 (0,04)	< 0,01	0,3
Seleeni, Se	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01
Pii, Si	5,0 (3,9)	4,1 (1,8)	3,6	3,8
Strontium, Sr	0,02 (0,01)	0,01 (0,0)	0,01	0,02
Titaani, Ti	0,44 (0,03)	0,36 (0,04)	0,55	0,45
Lyijy, Zn	0,10 (0,06)	0,06 (0,01)	0,09	0,07
Zirkonium, Zr	< 0,01	0,01 (0,0)	< 0,01	0,01
Kalium + Natrium, K + Na	1,2	1,1	1,0	0,97

9. 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. Yhdyskunta- ja metsäteollisuuden lietteitä syntyy 600 000–700 000 tonnia kuiva-ainetta vuodessa (Lohiniva et al. 2001). Suomessa yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoissa kertyi lietettä kuiva-aineksi laskettuna 142 700 tonnia vuonna 2010 (noin 1 miljoona tonni märkämpainona). Yhdyskuntaliete hyödynnetään maanparannuskäytössä (Häkkinen et al. 2014). Metsäteollisuuden lietteitä syntyi 537 000 tonnia vuonna 2014 ja tästä energiakäyttöä oli 332 000 tonnia.

Lietteiden sijoittamisen tavoitteena on löytää erilaisille lieteille mahdollisimman haitaton sijoittaminen. Ennen kaikkea suositaan 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. luku 12.4 Biokaasu) sähkön ja lämmön tuottamiseksi.

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 lietteissä 5–20 p-%. Kosteus on 60–65 p-% ja tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa 4–6 MJ/kg (Isännäinen & Huotari 1994).

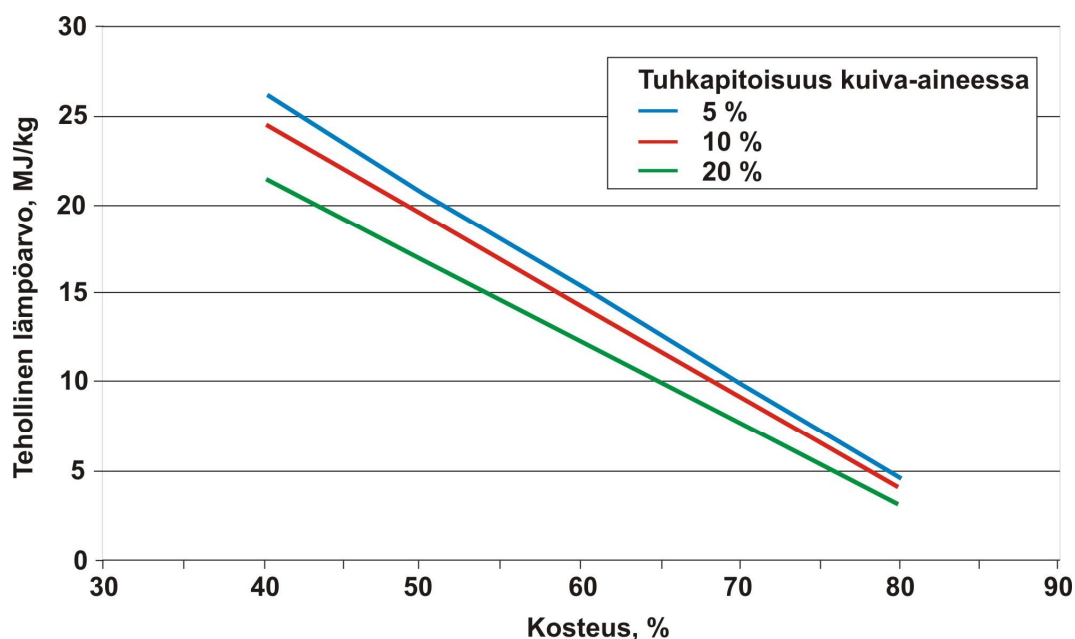
Bioliete eli aktiiviliete on jäteveden biologisessa puhdistuksessa syntyvää lietettä. Metsäteollisuuden biolietettä voi verrata yhdyskuntien puhdistamolietteeseen (ks. taulukko 9.1 ja 9.2). Siinä on mikrobimassan lisäksi myös puun uuteaineita, ligniiniyhdisteitä ja adsorboituneita klooriorgaanisia yhdisteitä. Biomassan osuus biolietteessä on aktiivimenetelmässä 65–75 p-% ja tuhkapitoisuus 5–50 p-%. Ravinnepitoisuudet ovat pienempiä kuin yhdyskuntien lietteissä. Ongelmallista on biolietteiden sisältämät epäpuhtaudet, jotka saattavat rikastua lipeäkiertoon (Isännäinen 1993, Vakkilainen 1993).

Kuorimossa syntyy monenlaisia lietteitä, mm. kuoriliete, hiekanerottimen hiekkaliete ja selkeyttimen liete. Kuori käsitellään kuoripuristimissa ja selkeyttimen liete vedenerottimissa. Näiden seos poltetaan kuorikattilassa tai joskus se viedään kaatopaikalle. Kuorilietteen määrä vaihtelee 0,5–8 kg/puu-m³. Määrä riippuu kuorimotyypistä, ajotavasta, puulajista ja puun varastoinnista (Isännäinen & Huotari 1994).

Siistauslietettä syntyy keräyspaperin siistaus- eli deinking-prosessissa, jossa jät-paperista poistetaan painomuste, täyteaineet ja päällysteet, jolloin jäljelle jää uusiokuitu. Siistauslietettä syntyy 50–205 kg/tonni tuotetta ja 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 sekä siistaustekniikasta. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on suurimmillaan vain 15 MJ/kg. Siistauslietteen kuiva-aineen natriumpitoisuus on 0,1–0,3 p-%, kaliumpitoisuus 0,2–0,5 p-% ja klooripitoisuus 0,2–0,6 % (taulukko 9.1). 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 luku 12.4).

Taulukko 9.1. Erilaisten lietteiden ominaisuuksia (Isännäinen 1993, Niittymäki 1993).

Ominaisuus	Sellu- tehtaan sekaliete	Primääri- liete	Paperi- tehtaan sekaliete	Bioliete	Siistaus- liete	Kuorimo- liete
Kosteus, p-%	75–80	70		85	60	70
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%						
Tuhka	16–21	0,4	12–20	16	30–60	2,5
Hiili, C	40–42	44	44–46	47	25–45	50
Vety, H	4,5–5,0	6	5,5–6,0	5,2	4–5,5	6
Rikki, S	0,4–0,9	0,1	0,05–0,1	1,2	0,1–0,3	0,02
Typpi, N	1,3–1,6	0,4	0,5–0,7	1,6	0,1–0,3	0,8
Happi, O	25–29	25		30	22	34
Kloori, Cl	0,1–0,6		0,0–0,1		0,2–0,6	
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	14–16	13,5		17,4	8–13	3,0
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	9,3	2,3		0,5	2,9	



Kuva 9.1. Lietteen lämpöarvo käyttökosteudessa (MJ/kg) lietteen kosteuden ja tuhkapitoisuuden funktiona (Lohiniva et al. 2001). Kuva: VTT.

Lietteitä voidaan polttaa rumpu-uuneissa, leijukerroskattiloissa, soodakattilassa, massapolttolaitoksissa ja arinakattiloissa tai kaasuttaa joko sekoitettuna pääpolttoaineeseen tai sellaisenaan. Metsäteollisuuden lietteitä poltetaan yleisesti leijukerroskattiloissa muiden polttoaineiden joukossa (yleensä alle 10 p-% polttoainetehosta). Biolietettä voidaan polttaa myös soodakattilassa. Mekaanisesti kuivattu bioliete sekoitetaan laihan mustalipeään ja konsentroidaan normaalisti haihdutuslaitoksella (Lohiniva et al. 2001).

Polttavuuteen vaikuttavat mm. lietteen tuhkapitoisuus sekä kosteus (kuva 9.1). Suomessa 60 % metsäteollisuuden lietteistä poltetaan. Polttamalla liete saadaan helpommin käsiteltävään muotoon ja pienempään tilaan. Lietteiden poltossa ei yleensä saada energiaa talteen. Kosteus ja lietteiden koostumus vaikuttavat palamiseen. Pystyäkseen ylläpitämään palamista tulee polttoaineen tehollisen lämpöarvon olla vähintään tasolla 5 MJ/kg, joten liete vaatii käytännössä lähes aina tukipolttainetta. Tyyppinen tukipolttainetta on kuori. Jos lietteiden kuiva-ainepitoisuus saadaan riittävän suureksi, on lietteiden poltto mahdollista ilman tukipolttainetta. Polttomenetelmästä riippuen palaminen vaatii 30–50 % kuiva-ainepitoisuuden.

Kuiva-ainepitoisuutta voidaan nostaa mekaanisella vedenerotuksella. Suotonauhapuristimella päästään 10–50 %, lingoilla 10–30 % ja ruuvipuristimilla 20–40 % kuiva-ainepitoisuuteen. Suotonauhapuristimilla päästään metsäteollisuuden primäärilietteilä 20–50 % ja biolietteilä 10–20 % kuiva-ainepitoisuuteen. Imusuodattimella pystytään primääri- ja yhdistelmälietteitä kuivaamaan 15–25 % kuiva-ainepitoisuuteen (Isännäinen 1993, Lohiniva et al. 2001). Lietteiden polttoon ja lämpöarvoon vaikuttavia tekijöitä on esitetty taulukossa 9.2

Taulukko 9.2. Metsäteollisuuden lietteiden ominaisuuksia (Kyllönen et al. 2010).

Ominaisuus	WAS 1	WAS 2	WAS 3	WAS jätevesipuhdistamolta	Tertiääriliete metsäteollisuudesta
Kuiva-ainepitoisuus, p-%	3,7	1,4	0,8	0,4	1,2
pH	7,0	7,9	8,0	7,2	6,5
Keskimääräinen palakoko, D50, mm	0,053	0,069	0,063	0,066	0,034
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%					
Tuhka	25,0	20,0	40,0	30,0	37,0
Hiili, C	40	43	31	27	36
Vety, H	5,2	5,6	3,8	4,6	4,9
Typpi, N	3,8	5,1	3,8	5,2	4,9
Rikki, S	1,2	1,7	3,6	1,7	3,7
Natrium, Na	0,7	1,3	9,6	1,9	3,8
Fosfori, P	0,5	0,5	0,5	1,8	0,6
Alumiini, Al	2,8	0,9	0,3	1,4	3,1
Kloori, Cl	0,1	0,1	8,0	1,2	1,2
Rauta, Fe	0,4	0,2	0,4	14,0	2,0

WAS = Waste Activated Sludge (aktiiviliete eli bioliete)

Metsäteollisuuden lietteiden raskasmetallipitoisuudet ovat yleensä melko pieniä yhdyskuntalietteisiiin verrattuna eikä patogeenisia mikrobeja yleensä esiinny (taulukot 9.3–9.4). Ne sisältävät sitä vastoin erilaisia valkaisuolosuhteissa syntyviä klooriyhdisteitä, joiden määrästä ja laadusta ei ole tarkkaa tietoa. Kloorittomaan valkaisuun siirryttäessä lietteiden klooriyhdisteiden määrä ja mahdolliset haitat vähenevät ja ovat nykyisin huomattavasti aikaisempaa vähäisempiä. Metsäteollisuuden jätevesien orgaanisten klooriyhdisteiden määrä (AOX) oli vuonna 2014 keskimäärin 0,12 kg valkaistua sellutonnin kohti, kun se vuonna 1999 oli 1,12 kg. Lietteissä klooriyhdisteiden määrä on vähentynyt vastaavasti (Isännäinen 1993, Lohiniva et al. 2001, www.metsateollisuus.fi/tilastot).

Lietteiden tuhkapitoisuudet ja tuhkaa muodostavien mineraalien pitoisuudet vaihtelevat laajasti riippuen käytetystä prosessista (taulukko 9.5). Esimerkiksi tuhkaa muodostavien mineraalien korkeat pitoisuudet siistauslietteessä ovat usein peräisin siistausprosessista (paperin täyteaineista). (Lohiniva et al. 2001.)

Taulukko 9.3. Erilaisten lietteiden keskimääräiset raskasmetallipitoisuudet, mg/kg kuiva-aineessa (Isännäinen 1993, Lohiniva et al. 2001).

Ominaisuus	Primääri- liete	Bioliete	Sellutehtaan sekaliete	Siistaus- liete	Karjan- lanta	Yhdys- kuntaliete
Kadmium, Cd	0,0–2,5	0,6–0,9		0,03–0,1	0,3	2,9–4,3
Kromi, Cr		16–22	38,4	17–116	5,3	102–150
Kupari, Cu	3,4–31	15–43	22,9	38–253	40	300–319
Elohopea, Hg	0,0–0,2	0,6	0,09	< 1,0	0,1	1,4–2,2
Nikkeli, Ni	7,0–26,7	6–11		10–231	7,5	55–80
Lyijy, Pb	0,0–15,5	0,3–4,3	13,5	1,2–5,5	6,5	

Taulukko 9.4. Metsäteollisuuden kuorikattilan tuhkan, viherlipesakan ja biolietteen raskasmetallipitoisuuksia, mg/kg (Thun & Korhonen 1999).

Aine	Arseeni, As	Kadmium, Cd	Kupari, Cu	Kromi, Cr	Nikkeli, Ni	Lyijy, Pb	Sinkki, Zn
Puutuhka	5–33	90–320	90–320	70–560	45–390	5–140	900–3 000
Viherlipesakka	< 5	3,5–22	110–250	170–520	100–330	5–30	1 400–2 200
Bioliete	< 5	0,5–4	9,3–60	17–65	7–40	5–13	90–510

Taulukko 9.5. Erilaisten lietteiden tuhkien ominaisuuksia (Lohiniva et al. 2001).

Liete	Yhdys- kuntaliete	Siistaus- liete	Siistaus-, bio- ja kuituliete	Bio-/ kuituliete	Kuori
PITOISUUS TUHKASSA, p-%					
P ₂ O ₅	13,1	0,37	0,6		1,3
SiO ₂	19,4	32,7	38,1		50,9
Fe ₂ O ₃	18,0	5,8	1,3		2,3
Al ₂ O ₃	6,3	16,3	22,1	2,6	7,7
CaO	20,6	33,4	28,1	2,0	22,1
MgO	1,5	4,0	4,6	7,4	2,6
Na ₂ O	0,5	0,7	0,3	7,1	1,3
K ₂ O	0,7	1,0	0,8	2,9	5,0
TiO ₂	-	-	0,6		0,5
Rikki, S	1,3		0,3	1,1	0,5
Kloori, Cl	0,07		0,10	0,60	0,0
Pehmenemislämpötila, ST, °C			1 150	1 170	1 190
Puolipallolämpötila, HT, °C			1 230	1 210	1 265
Sulalämpötila, FT, °C			1 290	1 220	1 340

10. Kivihiili

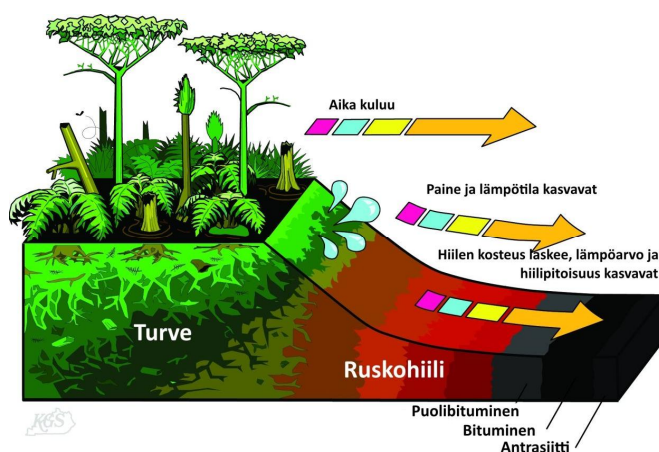
10.1 Hiilen synty ja luokittelu

Kivihiili on osittain hajonneesta orgaanisesta aineksesta, lukuisista mineraaleista ja vedestä koostuvaa sedimenttikiveä. Kivihiilen muodostuminen alkoi maapallolla satoja miljoonia vuosia sitten soiden hautauttua syvälle maakerrosten alle luonnonmullistusten vuoksi. Ensimmäisessä vaiheessa kasviaineksesta syntyi hapettomissa olosuhteissa turvetta. Ajansaatossa maakerrosten alle jäänyt turve muuttui paineen ja lämpötilan vaikutuksesta kemiallisten ja fysikaalisten prosessien kautta hiileksi (engl. coalification).

Se, kuinka pitkälle kasvimateriaalin muuntuminen hiileksi on edennyt, riippuu kuhunkin esiintymään kohdistuneista olosuhteista (paine, lämpötila) sekä esiintymän iästä. Ensimmäisessä vaiheessa turve muuttuu ruskohiileksi, joka on rakenteeltaan vielä melko pehmeää. Väriltään ruskohiili voi vaihdella mustasta ruskean eri sävyihin. Lämpötilan ja paineen vaikutuksesta ruskohiilessä tapahtuu vuosimiljoonien kuluessa lisää muutoksia ja se muuttuu ensin puolibitumiseksi hiileksi, sitten bitumiseksi hiileksi ja sopivissa olosuhteissa lopulta antrasiitiksi (kuva 10.1). Prosessin edetessä hiilen kosteus- ja happipitoisuudet laskevat ja hiilipitoisuus sekä lämpöarvo vastaavasti kasvavat. Samalla hiili muuttuu rakenteeltaan kovemmaksi ja tummemmaksi.

Mitä pidemmälle em. hiiltymisprosessi on edennyt, sitä korkeampi on hiilen ”laatuluokka” tai ”arvo” (engl. coal rank). Termi ”coal rank” kuvaa siis orgaanisen aineksen muuntumisastetta. Suomen kielessä tätä kuvaa parhaiten termi hiiltymisaste. Tyypilliset tuhkatoman kuiva-aineen hiilipitoisuudet laatuluokaltaan korkeimmasta matalimpaan ovat antrasiitti > 90 %, bituminen ja puolibituminen hiili 70–90 % ja ruskohiili < 70 %.

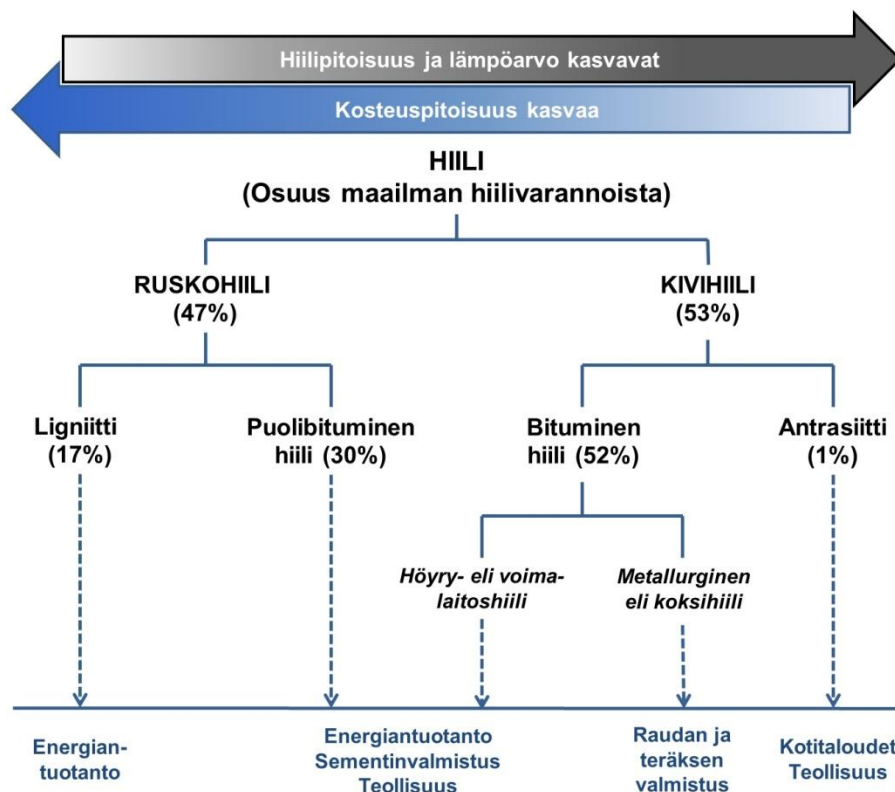
Suurin osa hiilivarannoista syntyi hiilikaudella 360–290 miljoonaa vuotta sitten.



Kuva 10.1. Kivihiilen muodostuminen (Stephen Greb 2015, Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, muokattu).

Käsitettä hiili käytetään yleisnimenä kiinteille, runsaasti hiiltä sisältäville polttoaineille, joiden ominaisuudet voivat kuitenkin erota merkittävästi toisistaan. Tästä syystä hiilet jaotellaan tilastoissa tavallisesti kahteen pääluokkaan: kivihiiliin (engl. hard coal) ja ruskohiiliin (engl. brown coal).

Kivihiiliin luetaan bituminen hiili sekä antrasiitti. Bituminen hiili voidaan jakaa vielä käyttötarkoituksen mukaan höyryhiileen ja metallurgiseen hiileen. Metallurgisella hiilellä tarkoitetaan hiiltä, josta valmistetaan koksia teollisuuden käyttöön. Höyryhiiltä käytetään höyryn tuottamiseen voimalaitoksissa ja teollisuuden kattiloissa. Höyryhiiltä kutsutaan Suomessa yleisesti kivihiileksi tai voimalaitoshiileksi. Ruskohiiliin luetaan puolibituminen hiili ja ligniitti. Jaottelu on havainnollistettu kuvassa 10.2, jossa on esitetty myös eri hiililajien osuus maailman varannoista sekä tyypillisimmät käyttökohteet. Maailman hiilivarannot jakautuvat melko tasan kahden pääluokan, kivihiilten ("kovien hiilten") ja ruskohiilten, välille. Pääosa kivihiilestä on bitumista hiiltä, sillä antrasiitin osuus vain noin 1 % kokonaishiilivarannoista.



Kuva 10.2. Hiililajien jaottelu, osuudet maailman hiilivarannoissa sekä käyttökohteet (suomennettu lähteestä World Coal Institute 2005).

Edellä esitettyä tilastollista jaottelua tarkempia hiilen luokittelujärjestelmiä on käytössä useita. Näistä osa on kansallisia ja osa kansainvälisiä. Eroavien ryhmittelyjen lisäksi käytetyt luokitteluparametrit ja raja-arvot tiettyyn luokkaan kuulumiseen vaihtelevat järjestelmästä toiseen. Tyypillisesti luokittelussa käytetään parametreina lämpöarvoa, haihtuvien aineiden ja kiinteän hiilen määriä sekä koksautuvuutta. Vaikka ominaisuudet kuten tuhka-, rikki-, ja raskasmetallipitoisuudet vaikuttavat hiilen markkina-arvoon, ei näitä käytetä hiilen luokittelussa eri kategorioihin (IEA 2015). Esimerkki eri luokittelujärjestelmistä ja niiden välisistä eroista on esitetty kuvassa 10.3, jossa on vertailtu Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission (UNECE), Yhdysvaltojen ja Saksan luokitteluja yksinkertaistetusti. Kuvasta selviää raja-arvot hiililajien kosteuspitoisuuksille, lämpöarvoille (tuhkaton), haihtuvien aineiden määrille (tuhkattomassa kuiva-aineessa) sekä vitriiniin heijastuskertoimille. Vitriiniin heijastuskertoimen on hiilen petrografinen ominaisuus, joka kuvaa hiiltymisastetta.

Kivihiilen ja turpeen luokittelu			Kosteus, p-%	Lämpöarvo, kJ/kg tuhkaton	Haihtuvat aineet tuhkatomassa kuiva-aineessa, p-%	Vitriniitin heijastus öljyssä, %
UNECE	USA ASTM	Saksa (DIN)				
Peat (Turve)	Peat (Turve)	Torf	75	6,700		
Ortho-Lignite	Lignite (Ligniitti)	Weichbraunkohle		35	16,500	0.3
Meta-Lignite		Mattbraunkohle	Steinkohle	25	19,000	0.45
Sub-bituminous Coal	Sub-bituminous Coal	Glanzbraunkohle		Hartkohle	10	25,000
		Flammkohle	40		0.75	
Bituminous Coal (Bituminen hiili)	High Volatile Bituminous Coal	Gasflammkohle	Steinkohle	36,000		35
		Gaskohle		Hard Coking Coal	28	1.0
	Medium Volatile Bituminous Coal	Fettkohle			19	1.2
	Low Volatile Bituminous Coal	IEBkohle		14	1.6	
Anthracite (Antrasiitti)	Semi-Anthracite	Magerkohle	3	36,000	10	1.9
	Anthracite	Anthrazit				2.2

Kuva 10.3. Hiilen luokittelujärjestelmien yksinkertaistettu vertailu (EURACOAL 2013, osin suomennettu).

Voimalaitoshiilestä analysoidaan pääasiassa samoja ominaisuuksia kuin muistakin kiinteistä polttoaineista: lämpöarvo, kosteus, haihtuvien aineiden määrä, kemiallinen koostumus (hiili, vety, typpi, rikki), tuhkan kemiallinen koostumus ja sulamiskäyttäytyminen sekä raekokojakauma. Lisäksi pölypolttolaitoksissa oleellista on myös jauhautuvuuden analysointi. Jauhautuvuutta kuvataan Hardgrove-indeksillä, jossa vertailuhiilen, suhteellisen pehmeän laadun, jauhautuvuus on asetettu sadaksi. Mitä huonommin jauhautuvaa hiili on, sitä pienempi on sen Hardgrove-indeksi.

Hiilen karakterisoinniseksi on käytössä myös petrografiaksi kutsuttu mikroskooppinen analyysimenetelmä. Petrografisten ominaisuuksien perusteella on mahdollista täydentää kemiallisten analyysien tuloksia ja erottaa kaupan olevat hiilierät toisistaan. Menetelmässä määritetään hiilen ns. maseraalikoostumus sekä vitriiniin heijastuskerroin. Maseraaleilla tarkoitetaan kivihiilen toisistaan erottuvia osasia ja niitä voidaan pitää analogisina kivilajien sisältämille mineraaleille. Maseraalit ryhmitellään neljään luokkaan: vitriiniitti, inertiniitti, liptiniitti (eksiniitti) ja mineraaliaine. Vitriniitin heijastuskertoimen on todettu korreloivan monien kivihiilien muiden ominaisuuksien kanssa paremmin kuin muut ominaisuudet keskenään. Menetelmää käytetään erityisesti kartoitettaessa kivihiiliesiintymiä tai valittaessa laatuja metallurgisen koksen valmistusprosessia varten. (Raiko et al. 2002.)

10.2 Hiilen käyttö Suomessa

Käyttömäärältään merkittävin hiilituote on voimalaitoshiili, jonka tuontimäärä on vaihdellut viime vuosina 2,8–5,9 miljoonaa tonnia vuodessa. Lisäksi Suomeen tuodaan metallurgista kivihiililtä (1,1–1,3 miljoonaa tonnia vuodessa) ja koksia (0,32–0,44 miljoonaa tonnia vuodessa). Pääosa voimalaitoshiilestä käytetään sähkön- ja lämmöntuotantoon rannikkoseudun pölypolttovoimalaitoksissa. Tulevaisuudessa kivihiilen käyttö tulee laskemaan vanhojen hiilivoimalaitosten korvautuessa monipolttoainevoimalaitoksilla (Naantali, Lahti). Lisäksi hallituksen tavoitteena on, että Suomi luopuu kivihiilestä energiantuotannossa kokonaan 2020-luvulla.

Suomessa käytettävä voimalaitoshiili on yksinomaan bitumista hiiltä, josta valtaosa tuodaan Venäjältä. Venäläisen kivihiilen osuus tuonnista on viime vuosina (2011–2014) ollut noin 90 %. Seuraavaksi eniten hiiltä on tuotu Puolasta 1–8 % ja Kazakstanista 2–4 %. Vielä vuonna 2010 kivihiiltä tuotiin merkittäviä määriä myös Kolumbiasta (9 %) ja Yhdysvalloista (4 %), mutta vuoden 2012 jälkeen tuonti näistä maista on lakannut.

Metallurgista kivihiiltä käytetään SSAB:n (aikaisemmin Ruukki) Raahen terästehtaalla, jossa on Suomen ainoa koksamo. Metallurginen kivihiili tuodaan pääasiassa Yhdysvalloista, Kanadasta ja Australiasta. Koksauksessa käytetään usean kivihiilen seosta, jotta koksille saadaan halutut ominaisuudet (Tilastokeskus, Energian tuonti ja vienti alkuperämaittain).

Merkittävä osa maahantuodusta koksista käytetään Outokummun Tornion terästehtaalla ferrokromin valmistuksessa.

10.3 Suomessa käytettävien kivihiilten ominaisuudet

Kivihiilen analyysituloksia pyydettiin suoraan Suomen merkittävimmiltä kivihiilen käyttäjiltä. Metallurginen kivihiili ja koksi rajattiin kuitenkin raportin ulkopuolelle, sillä ne ovat ensisijaisesti raaka-aineita (pelkistimiä) ja vasta toissijaisesti polttoaineita. Voimalaitoksilta saadut analyysitulokset esitetään hiilen alkuperämaittain laitospöytäkirjojen esityksen sijaan, jotta tulosten anonymisyys säilyy paremmin. Analyysituloksia saatiin venäläisestä, puolalaisesta ja kazakstanilaisesta hiilestä. Saatujen analyysitulosten määrässä heijastui käyttömäärä: selvästi eniten tuloksia oli saatavissa venäläisestä hiilestä. Erään laitoksen käyttämä venäläinen hiili erosi niin merkittävästi muista laitoista, että venäläinen hiili jaettiin kahteen luokkaan: tyyppi 1 edustaa tavanomaista ja tyyppi 2 poikkeavaa tapausta.

Taulukossa 10.1 on esitetty vertailu venäläisen, puolalaisen ja kazakstanilaisen hiilen keskimääräisistä ominaisuuksista. Kazakstanilainen hiili sisältää selvästi vähiten tuhkaa. Tyypin 2 venäläisessä hiilessä tuhkaa on selvästi eniten ja haihtuvia aineita vähiten. Puolalaisen hiilen rikkipitoisuus on korkein, mutta tyyppipitoisuus puolestaan alhaisin. Puolalainen hiili sisältää eniten myös klooria. Tuhkan sulamiskäyttötymisessä ei ole suuria eroja eri hiilten välillä.

Taulukoissa 10.2–10.4 on esitetty kullekin hiilityypille keskiarvojen lisäksi ominaisuuksien vaihtelua kuvaavia tilastollisia tunnuslukuja. Mediaania ja keskiarvoa laskettaessa alle määrittäjärajan jääneet tulokset on jätetty huomioimatta. Taulukossa 10.5 on esitetty lisäksi venäläisen hiilen (tyyppi 1) osalta myös metallipitoisuuksia. Muiden hiilten osalta metallipitoisuus- tai tuhkan koostumusanalyysijä ei ollut saatavilla. Taulukossa 10.6 on esitetty eräällä laitoksella käytettyjen hiiliseosten metallipitoisuuksia.

Pääosa uusista analyysituloksista on viime vuosilta ja kaikki tältä vuosikahdeksältä. Koska tämän raportin aiemman version (Alakangas 2000) aineisto oli merkittävästi nyt saatua laajempi, myös vanhempia alkuperämaakohtaisia analyysituloksia on esitetty liitteessä H. Lisäksi aiempia analyysituloksia (tiheysfraktioiden vaikutukset polttoaineominaisuuksiin) on jätetty täydentämään aineistoa (taulukot 10.7 ja 10.8).

Taulukko 10.1. Eri maista tuotujen kivihiiltien keskimääräisten ominaisuuksien vertailua.

Ominaisuus	Venäläinen 1	Venäläinen 2*	Puola- lainen	Kazaksta- nilainen
PERUSANALYYSIT				
Kosteus, p-%	10,9	10,0	8,2	14,4
Haihtuvat aineet, p-% k.a.	36,5	12,1	29,0	43,3
Tuhkapitoisuus (815 °C), p-% k.a.	12,5	25,2	17,0	4,4
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	29,17	25,98	28,61	29,90
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	28,15	25,36	27,61	28,82
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	24,65	22,59	25,19	24,32
ALKUAINEKOOSTUMUS KUIVA-AINEESSA, p-%				
Hiili, C	66,19	66,96	70,23	73,58
Vety, H	4,73	2,91	4,26	4,89
Typpi, N	2,12	1,76	1,16	1,36
Rikki, S	0,38	0,33	0,68	0,46
HALOGEENIT KUIVA-AINEESSA, p-%				
Kloori, Cl	0,007	-	0,155	0,058
Fluori, F	0,010	-		
TUHKAN SULAMISKÄYTTÄYTYMINEN				
<i>Hapettava atmosfääri</i>				
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 273	-	1 240	1 260
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 314	-	1 290	1 370
Puolipallolämpötila HT, °C	1 335	-	1 340	1 400
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 371	-	1 400	1 430
<i>Pelkistävä atmosfääri</i>				
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 212	-	1 190	1 180
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 242	-	1 210	1 210
Puolipallolämpötila HT, °C	1 274	-	1 250	1 270
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 336	-	1 310	1 350
MUUT TUNNUSLUVUT				
Hardgrove-indeksi	56	-	57	59
Paisumisluku (free swelling index, FSI)	1,3	-	1,5	0,5

* Poikkeava venäläinen hiili: eräällä laitoksella käytetty venäläinen hiili poikkesi ominaisuuksiltaan merkittävästi muista venäläisistä hiillistä, joten se esitetään erikseen.

Taulukko 10.2. Venäläisen kivihiilen (tyyppi 1) ominaisuuksien vaihtelu.

PERUSANALYYSIT	Keski-arvo	Minimi	Maksimi	Lukumäärä	Mediaani
Kosteus, p-%	10,9	8,6	13,1	53	11,0
Haihtuvat aineet, p-% k.a.	36,5	30,9	40,0	55	36,8
Tuhkapitoisuus (815 °C), p-% k.a.	12,5	8,6	17,4	60	12,3
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	29,17	27,83	29,92	14	29,32
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	28,15	26,82	28,89	14	28,29
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	24,65	23,49	25,73	7	24,81
ALKUAINEMASSAKOOSTUMUS KUIVA-AINEESSA, p-%					
Hiili, C	66,19	60,00	73,60	60	64,35
Vety, H	4,7	4,3	5,0	58	4,7
Typpi, N	2,12	1,90	2,40	58	2,1
Rikki, S	0,38	0,26	0,71	60	0,35
HALOGEENIT KUIVA-AINEESSA, p-%					
Kloori, Cl	0,007	0,002	0,023	52	0,005
Fluori, F	0,010	0,006	0,013	6	0,010
TUHKAN SULAMISKÄYTTÄYTYMINEN					
<i>Hapettava atmosfääri</i>					
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 273	1 200	1 450	28	1 269
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 314	1 220	1 480	28	1 310
Puolipallolämpötila HT, °C	1 335	1 270	1 400	26	1 337
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 371	1 290	1 430	26	1 378
<i>Pelkistävä atmosfääri</i>					
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 212	1 160	1 251	3	1 224
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 242	1 210	1 276	3	1 241
Puolipallolämpötila HT, °C	1 274	1 260	1 300	3	1 261
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 336	1 323	1 355	3	1 330
MUUT TUNNUSLUVUT					
Hardgrove-indeksi	56	48	64	45	56
Paisumisluku (free swelling index, FSI)	1,3	0,5	3,5	46	1,0

Taulukko 10.3. Puolalaisen kivihiilen ominaisuuksien vaihtelu.

PERUSANALYYSIT	Keski-arvo	Minimi	Maksimi	Lukumäärä	Mediaani
Kosteus, p-%	8,2	7,0	9,0	12	8,1
Haihtuvat aineet, p-% k.a.	29,0	27,8	31,2	12	29,2
Tuhkapitoisuus (815 °C), p-% k.a.	17,0	13,7	18,6	12	17,2
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	28,61	29,32	28,16	12	28,59
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	27,61	28,17	27,21	4	27,52
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	25,19	25,66	24,54	12	25,25
ALKUAINEMASSA KUIVA-AINEESSA, p-%					
Hiili, C	70,23	69,20	72,20	12	70,05
Vety, H	4,26	4,10	4,40	12	4,30
Typpi, N	1,16	1,10	1,20	12	1,20
Rikki, S	0,68	0,62	0,84	12	0,665
HALOGEENIT KUIVA-AINEESSA, p-%					
Kloori, Cl	0,155	0,128	0,231	12	0,151
Fluori, F	-	-	-	-	-
TUHKAN SULAMISKÄYTTÄYTYMINEN					
<i>Hapettava atmosfääri</i>					
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 240			1	
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 290			1	
Puolipallolämpötila HT, °C	1 340			1	
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 400			1	
<i>Pelkistävä atmosfääri</i>					
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 190			1	
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 210			1	
Puolipallolämpötila HT, °C	1 250			1	
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 310			1	
MUUT TUNNUSLUVUT					
Hardgrove-indeksi	57	54	62	12	56
Paisumisluku (free swelling index, FSI)	1,5	1,0	2,5	12	1,3

Taulukko 10.4. Kazakstanilaisen kivihiilen ominaisuuksien vaihtelu.

PERUSANALYYSIT	Keski-arvo	Minimi	Maksimi	Lukumäärä	Mediaani
Kosteus, p-%	14,4	13,3	15,7	18	14,4
Haihtuvat aineet, p-% k.a.	43,3	42,1	44,5	18	43,2
Tuhkapitoisuus (815 °C), p-% k.a.	4,4	3,5	5,6	18	4,6
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	29,90	29,49	30,25	18	29,94
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	28,82	28,45	29,12	18	28,88
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	24,32	23,71	24,83	18	24,28
ALKUAINEKOOSTUMUS KUIVA-AINEESSA, p-%					
Hiili, C	73,58	72,60	74,30	18	73,70
Vety, H	4,89	4,70	5,00	18	4,90
Typpi, N	1,36	1,10	1,60	18	1,35
Rikki, S	0,46	0,40	0,55	18	0,46
HALOGEENIT KUIVA-AINEESSA, p-%					
Kloori, Cl	0,058	0,043	0,070	6	0,061
Fluori, F	-	-	-	-	-
TUHKAN SULAMISKÄYTTÄYTYMINEN					
<i>Hapettava atmosfääri</i>					
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 260			1	
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 370			1	
Puolipallolämpötila HT, °C	1 400			1	
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 430			1	
<i>Pelkistävä atmosfääri</i>					
Muodonmuutoslämpötila DT, °C	1 180			1	
Pehmenemislämpötila ST, °C	1 210			1	
Puolipallolämpötila HT, °C	1 270			1	
Juoksevuuslämpötila FT, °C	1 350			1	
MUUT TUNNUSLUVUT					
Hardgrove-indeksi	59	52	64	18	60
Paisumisluku (free swelling index, FSI)	0,5	0,5	0,5	18	0,5

Taulukko 10.5. Venäläisen kivihiilen (tyyppi 1) metallipitoisuuksia kuiva-aineessa.

PITOISUUS, mg/kg	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Lukumäärä	Mediaani
Alumiini, Al	13 257	9 200	24 000	7	12 000
Fosfori, P	337	220	480	7	340
Kalium, K	1 957	1 400	2 400	7	2 000
Kalsium, Ca	3 643	2 800	5 000	7	3 500
Magnesium, Mg	1 357	1 100	1 800	7	1 300
Natrium, Na	854	540	1 041	7	910
Pii, Si	28 429	20 000	38 000	7	28 000
Rauta, Fe	4 343	3 200	6 200	7	4 200
Titaani, Ti	561	450	650	7	570
Arseeni, As	4,1	3,0	6,7	7	3,9
Barium, Ba	216	160	240	7	220
Elohopea, Hg	0,065	< 0,10	0,065	7	0,065
Kadmium, Cd	0,076	< 0,20	0,076	7	0,076
Koboltti, Co	3,8	3,2	4,7	7	3,8
Kromi, Cr	11,1	10,0	13,0	7	11,0
Kupari, Cu	6,48	5,40	7,80	7	6,35
Lyijy, Pb	4,36	3,30	5,40	7	4,10
Mangaani, Mn	48,1	38,0	59,0	7	49,0
Nikkeli, Ni	10,3	9,30	11,0	7	10,0
Sinkki, Zn	17,7	13,0	20,0	7	19,0
Strontium, Sr	143	110	170	7	140
Vanadiini, V	13,7	11,0	16,0	7	13,0
Tuhka*, p-%	10,6	9,0	13,0	7	10,6

* Tuhkapitoisuus on ilmoitettu, jotta voidaan arvioida pitoisuuksia tuhkassa.

Taulukko 10.6. Eräällä laitoksella käytettyjen kivihiiliseosten metallipitoisuuksia kuiva-aineessa.

PITOISUUS, mg/kg	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Lukumäärä	Mediaani
Alumiini, Al	16 372	12 173	22 228	31	16 936
Fosfori, P	291	201	401	31	301
Kalium, K	2 786	1 743	3 900	31	2 821
Kalsium, Ca	3 663	2 073	4 574	31	3 716
Magnesium, Mg	1 988	904	2894	31	1 930
Natrium, Na	1 180	401	1 929	31	1 187
Pii, Si	31 740	18 230	51 417	31	30 850
Rauta, Fe	7 057	3 917	9 092	31	6 994
Titaani, Ti	727	503	1 019	31	719
Antimoni, Sb	-	< 2,6	< 2,6	31	-
Arseeni, As	5,1	< 2,6	7,6	31	4,9
Barium, Ba	282	210	550	31	270
Beryllium, Be	-	< 2,6	< 2,6	31	-
Boori, B	38,8	23,0	71,0	31	36,5
Elohopea, Hg	0,10	< 0,05	0,35	31	0,06
Kadmium, Cd	-	< 0,5	< 0,5	31	-
Koboltti, Co	5,4	3,1	9,6	31	5,3
Kromi, Cr	17,1	10,0	27,0	31	17,0
Kupari, Cu	15,5	6,7	24,0	31	16,0
Lyijy, Pb	10,3	5,2	20,0	31	10,0
Mangaani, Mn	-	-	-	-	-
Molybdeeni, Mo	8,2	< 2,6	8,2	31	8,2
Nikkeli, Ni	20,8	9,3	37,0	31	20,0
Sinkki, Zn	34,8	26,0	100	31	32,0
Tina, Sn	9,0	< 2,6	9,0	31	9,0
Vanadiini, V	26,5	16,0	42,0	31	25,0
Tuhka*, p-%	13,0	10,3	15,1	31	13,3

* Tuhkapitoisuus on ilmoitettu, jotta voidaan arvioida pitoisuuksia tuhkassa.

Taulukko 10.7. Erikokoisten hiilijakeiden ominaisuuksia ilmakeivatussa tilassa (Taipale 1996).

Näyte	Raekoko, μm	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	30,0	54,0	23,59
	106–125	3,7	10,9	30,9	54,5	25,31
Hiili 2	45–63	1,8	36,0	17,0	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	40,0	21,84
	75–90	10,2	4,0	44,5	41,3	22,55
	106–125	10,5	2,6	45,4	41,5	22,74

Taulukko 10.8. Jauhetun kivihiilen seitsemään tiheysfraktioon jaetun sekä jakamattoman näytteen tuhkan koostumus ja sulamiskäyttäytyminen (Singer 1982).

	Tiheysfraktio, kg/dm ³							KOKO
	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	
Osuus, p-%	62,8	32,3	1,6	1,1	0,6	0,4	1,0	–
Tuhkapitoisuus, p-%	6,1	6,4	21,8	39,9	82,6	84,0	68,3	11,9
SULAMISKÄYTTÄYTYMINEN, °C								
Muodonmuutoslämpötila, DT	1 221	1 238	1 227	1 266	1 193	1 288	1 210	1 166
Pehmenemislämpötila, ST	1 254	1 299	1 282	1 304	1 221	1 336	1 232	1 188
Puolipallolämpötila, HT	1 266	1 310	1 316	1 332	1 249	1 366	1 304	1 210
Juoksevuuslämpötila, FT	1 282	1 327	1 443	1 399	1 327	1 387	1 388	1 266
TUHKAN KOOSTUMUS, p-%								
SiO ₂	41,1	43,7	54,5	53,4	51,0	37,0	6,8	50,2
Al ₂ O ₃	18,5	24,2	25,7	20,7	10,3	3,0	0,7	16,9
TiO ₂	0,8	0,8	0,6	0,8	0,4	0,3	0,3	0,8
Fe ₂ O ₃	3,2	2,0	7,1	5,9	3,5	3,7	79,0	8,9
CaO	19,6	16,1	7,0	8,2	11,9	22,8	3,9	11,5
MgO	5,1	4,3	1,4	1,0	0,6	0,8	0,3	3,5
Na ₂ O	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	1,8
K ₂ O	0,3	0,3	0,4	0,2	0,4	0,4	0,2	1,7
SO ₃	9,5	7,7	2,7	6,5	9,6	11,0	6,2	4,3
P ₂ O ₅	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,3	0,2	–

11. Polttoöljyt

11.1 Raskaat ja kevyet polttoöljyt

Öljy on fossiilinen energialähde, joka on syntynyt sedimentin alle hautautuneista esihistoriallisista kasveista ja muinaisista meren eliöistä vuosimiljoonien kuluessa. Kuumuus ja paine ovat muuttaneet jäännökset nestemäisiksi ja kaasumaisiksi hiilivedyiksi. Öljy on keräytynyt maapallolla huokosiin kiviin ja onkaloihin, joista se voidaan kerätä talteen pumppaamalla. Barreli (tynnyri) on öljyalalla käytetty tilavuusmittayksikkö, ja se on 159 litraa. Raakaöljy muodostuu pääasiassa parafiinisista, nafteenisista ja aromaattisista hiilivedyistä, joiden suhteellinen osuus vaihtelee huomattavasti öljyn alkuperän mukaan. Raakaöljy sisältää lisäksi muita alkuaineita kuten rikkiä, typpeä, happea ja jonkin verran metalleja. Raakaöljyn laatua mitataan tiheydellä (kevyestä raskaaseen) ja rikkipitoisuudella (vähärikkisestä runsasrikkiseen). Tiheyttä luokittelee American Petroleum Institute (API). API-asteen määrittely perustuu öljyn käänteiseen tiheyteen 15,6 °C lämpötilassa. Mitä korkeampi raakaöljyn API-aste on, sitä kevyempi raakaöljy on kyseessä. Kevyiden raakaöljyjen API-aste on tyypillisesti yli 38 ja raskaiden raakaöljyjen enintään 22. Raakaöljyjä, joiden API-aste on 22–38, kutsutaan yleisesti keskiraskaiksi raakaöljyiksi. 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. Suomessa on kaksi öljynjalostamoa, Porvoossa ja Naantalissa.

Öljynjalostus on petrokemiallinen teollisuusprosessi, joka alkaa raakaöljyn sisältämien suolojen ja muiden epäpuhtauksien poistolla. Seuraavaksi raakaöljy jaetaan tislamalla jakeiksi eli eri lämpötiloissa höyrystyvät hiilivedyt erotellaan niiden kaasuuntumislämpötilan perusteella toisistaan. Tislauksessa raakaöljy esikuumennetaan putkiuuneissa 355–370 °C:ssa, jolloin noin 80 % raakaöljystä höyrystyy. Varsinainen tislauksen tapahtuu kymmeniä metrejä korkeissa kolonneissa. Niitä kuumennetaan, jolloin bensiini ja sitä kevyemmät jakeet höyrystyvät. Ne johdetaan pois kolonnin yläosasta. Jalostuksen ensimmäisessä vaiheessa syntyy myös nestekaasua.

Bensiiniä raskaammat keskitislejakeet eli petroli ja kaasuöljy (= kevyt polttoöljy ja dieselöljy) lauhtuvat ja ne otetaan pois kolonnin sivu-ulosotoista. Raskaammat jakeet eli raskas polttoöljy, bitumi ja pohjaöljy johdetaan pois kolonnin pohjalta. Jakeiden kemiallisia rakenteita muutetaan ja niiden jalostusarvoa nostetaan erilaisten jalostusoperaatioiden ja prosessien avulla. Tärkeimmät niistä ovat tislauksen ohella rikinpoisto, reformointi ja krakkaus. Nykyaikaisissa jalostamoissa on lukuisia erilaisia jatkojalostusyksiköitä.

Öljynjalostuksessa syntyy monipuolinen valikoima erilaisia öljytuotekomponentteja. Osa niistä, esimerkiksi nestekaasuina käytettävät butaani ja propaani sekä lentopetroli, myydään sellaisenaan.

Rikkipitoisuus luokitellaan yleisesti siten, että vähärikkisen raakaöljyn rikkipitoisuus on alle 0,5 % ja runsasrikkisen yli 0,5 %.

Polttoöljyt jaetaan käyttöominaisuuksien mukaan raskaisiin ja kevyisiin öljyihin. Raskaat polttoöljyt sopivat kohteisiin, joissa tarvittava kattilateho on vähintään 500–1 000 kW. Kevyt polttoöljy on helposti juokseva ja palava tisle. Tämän vuoksi kevytpolttoöljy soveltuu laitteisiin, joiden teho on alle 1 000 kW.

Pääosa kevyestä polttoöljystä käytetään teollisuudessa, rakennustoiminnassa ja maa- ja metsätaloudessa. Teollisuus käyttää kevyttä polttoöljyä kuivaus-, sulatus- ja polttouuneissa sekä tilapäisissä ja siirrettävissä lämmitys- ja kuivauslaitteissa. Maa- ja metsätalouden ja rakennustoiminnan koneissa ja laitteissa kevyttä polttoöljyä käytetään lähinnä dieselmoottoreiden polttoaineena tiealueen ulkopuolella. (Öljy- ja biopolttoaineala, internetsivusto)

Taulukko 11.1. Raskaiden polttoöljyjen tyypilliset ominaisuudet (Neste ja St1, internetsivustot).

Ominaisuus	Laaturajat*	Vähärikkiset								Rikillinen
		PORL 40	PORL 60	St1 80/ PORL80	St1 100/ PORL100	PORL 180	PORL 220	St1 300 PORL300	St1 420/ PORL420	PORH 2000
Rikki S, p-%	1 1,4–2,7	0,8	0,85	0,90	0,9	0,9	0,9	0,95	0,95 / 0,06	2,3
Leimahduspiste, °C	≥ 65 ≥ 75	70	70	70	70	80	99	90	100 / 110	110
Tiheys (15 °C), kg/m ³ (min-max)	900–1 000	985	985	990	990	990	1 000	998	998 / 1005	1 010
Viskositeetti (80 °C), mm ² /s eli cSt	8,3–16,4 18–25,3 23–26 35–43 38–60 48–79 248	14	20	24	27	41	46	58	65 / 67	210
Viskositeetti (50 °C) laskettu, mm ² /s (cSt)	20–50 60–90 80–100 140–180 160–300 220–420 2 050	45	65	85	95	170	205	290	320 / 345	1 690
Hiiltojäännös, p-%	< 14 < 15 < 17 < 23	9	9	10	10	10	10	12	12 / 12	18
Asfalteenit, p-%		3	4	4	4	4	4	4	4 / 5	7
Jähmepiste, °C	15	< 5	5	≤ 5	5	5	5	10	10 / 12	10
Vesi, p-%	≤ 0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1 / 0,15	0,1
Kokonaissedimentti, p-%	≤ 0,15	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04 / 0,15	
Tuhka, p-%	≤ 0,15 ≤ 0,25	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
Vety H, p-%	≥ 9,0									10
Tehollinen lämpöarvo (mitattu), MJ/kg	≥ 39,2 ≥ 40,1	41,5	41,4	41,4	41,3	41,0	40,5	40,9	40,9 / 40,5	40,3
Hiili C, p-%	ilmoit.	-						87,6	87,6 / 87,5	
Typpi N, p-%	ilmoit.					0,6		0,4 0,6	0,4 / 0,5	
Vanadiini V, mg/kg	≤ 100 ≤ 200	40	40	40 40	40 40	40	40	40 40	40	180
Nikkeli Ni, mg/kg	≤ 50 ≤ 60 ≤ 100	20	20	20 20	20 20	20	20	20 20	20/24 20	33

Raskaiden polttoöljyjen tyypilliset ominaisuudet laaturajoihin on esitetty taulukossa 11.1. Rikillisen raskaan polttoöljyn natriumpitoisuus on yleensä 27 mg/kg (raja-arvo ≤ 50 mg/kg).

Kevyet polttoöljyt lämmitys- ja moottorikäyttöön eroavat toisistaan lähinnä kylmäkestävyyden ja viskositeetin eli juoksevuuden osalta. Näiden rikkipitoisuus on alle 10 mg/kg ja tuhkapitoisuus alle 0,001 % (taulukko 11.2). Dieselöljyjen laatuvaatimukset on määritelty standardissa SFS-EN 590:2013. Liitteessä D on lueteltu sekä mineraali- että nopeapyrolyysiöljyjen ominaisuuksien analysointiin käytettävät standardit.

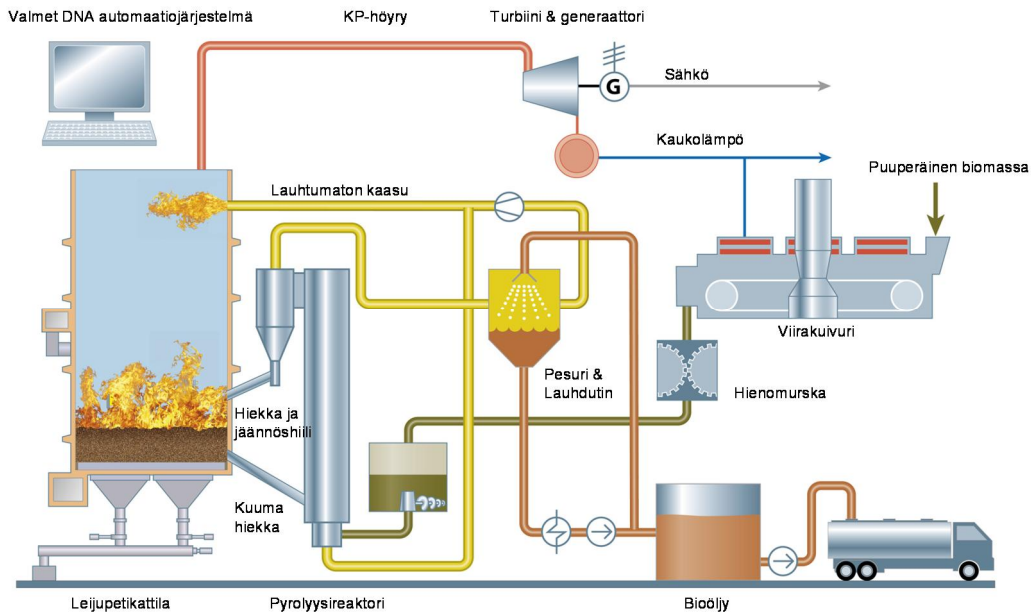
Lämmityskäyttöön tarkoitettujen esteröidyn FAME (RME, Rapeseed Methyl Ester) -bioöljyn laatuvaatimukset esitetään standardissa SFS-EN 14213. FAME (Fatty Acid Methyl Ester) on orgaanisesta raaka-aineesta tehty metyyliesteri, joka voidaan valmistaa esteröimällä kasviöljyä tai eläinrasvoja.

Taulukko 11.2. Kevytpolttoöljylaatujen tyypillisiä ominaisuuksia (Neste Oy ja Teboil Oy, internetsivustot).

Ominaisuus	Laaturaja	Talvilaatu -29/-34 (Neste)	Talvilaatu -29/-34 (Teboil)	Kesälaatu PÖ-5 (-5/-15) (Neste)	Kesälaatu (Teboil)
Rikki, mg/kg	≤ 10	6	6	6	6
Tislaus (180 °C), til-% haihtunut	≤ 10	1	1	1	
250 °C	≤ 65			32	26
340 °C	≥ 85	99	97	94	96
95 % tislautunut, °C	≤ 360	311	320	351	340
Leimahduspiste, °C	60	59	65	63	65
Tiheys (15 °C), kg/m ³	820–845 800–840	820	830	835	840
Teholl. lämpöarvo, MJ/litra (laskettu)		35,3	35,4	36,0	36,0
Viskositeetti (40 °C), mm ² /s (cSt)	2,00	2,0	2,00	3,00	3,20
Samepiste, °C, (kesälaatu jaettu kahteen aikajaksoon: 1.5.–31.8. ja 1.9.–30.4.)	-29 (talvilaatu) 0 -5	-29	-29	-0 (1.5.–31.8.) -5 (1.9.–30.4.)	< 0 (1.5.–31.8.) - 6 (1.9.–30.4.)
Suodatettavuus, °C, (kesälaatu jaettu kahteen aikajaksoon: 1.5.–31.8. ja 1.9.–30.4.)	-34 (talvilaatu) 0 -15	-34	-34	-10 (1.5.–31.8.) -15 (1.9.–30.4.)	-10 (1.5.–31.8.) -15 (1.9.–30.4.)
Setaani-indeksi	46,0	48,0	48,0	55	54
Setaaniluku	51,0	52,0	52,0	54	53
Hiiltojäännös, p-% (10 % pohjasta)	≤ 0,3	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,01
Kuparikorroosio	1	1	1	1	1
Vesi, mg/kg	≤ 200	70	50	53	60
Tuhka, p-%	≤ 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Sedimentti (kiinteät epäpuhtaudet), mg/kg	≤ 24	1	5	3	5
Hapetuskestävyys, g/m ²	≤ 25	3	< 5	2	< 5
Polyaromaatit, p-%	≤ 8	2	3	2	3
Voitelevuus, HFRR (high frequency reciprocating rig), µm	≤ 460	356	350	300	320

11.2 Nopeapyrolyysiöljy

Nopealla pyrolyysillä valmistettu nestemäinen polttoaine on arvioitu teknistaloudellisesti kannattavimmaksi biopoltonesteeksi korvaamaan fossiilisia lämmitysöljyjä. Nopeapyrolyysissä biomassaa, esim. puu, lämmitetään hyvin nopeasti (alle 2 sekuntia) korkeaan lämpötilaan (noin 500 °C) hapettomassa ilmakehässä, jolloin pääosa puuaineesta muuttuu kaasuiksi ja aerosoleiksi, jotka nesteytetään lauhduttimessa. Nopeapyrolyysiöljyn saanto on noin 76 % kuivan puun painosta. Muut tuotteet, lauhtumattomat kaasut ja hiiltojäännös, käytetään yleensä prosessin energiaksi (Oasmaa et al. 1997). Kuvassa 11.1 on esitetty bioöljyn tuotanto CHP (Combined Heat and Power) -laitoksella integroidun pyrolyysin avulla.



Kuva 11.1. Bioöljyn tuotanto CHP-laitoksella integroidun pyrolyysin avulla. Kuva: Valmet Oy.

Nopeapyrolyysiöljy on ominaisuuksiltaan täysin erilaista kuin fossiiliset polttonesteet, muut bioöljyt tai hitaan pyrolyysin terva. Nopeapyrolyysiöljy on ruskeaa hapanta tervanhajuista nestettä, joka liukenee polaarisiin liuottimiin, kuten alkoholeihin, mutta ei hiilivetyihin, kuten mineraaliöljyt. Nopeapyrolyysiöljyn lämpöarvo on kaksinkertainen puuhun verrattuna. Tuoteneesteessä on tyypillisesti noin 25 p-% kemiallisesti liuenutta vettä ja noin 45–50 p-% happea. Nopeapyrolyysiöljyn tiheys on korkea ja lämpöarvo matala, viskositeetti on raskaan ja kevyen polttoöljyn välissä.

Nopeapyrolyysiöljy sisältää satoja kemiallisia yhdisteitä. Öljyssä ei ole juuri lainkaan hiilivetyjä, vaan pääyhdisteet ovat veden lisäksi orgaaniset hapot (etikka- ja muurahaishappo), aldehydit, ketonit, fenolijohdannaiset, sokerityyppiset yhdisteet ja muut erilaiset hiilihydraattien pilkkoutumistuotteet. Sen lisäksi öljyssä on merkittävä osa (tyypillisesti 25 p-%) raskaita (lähinnä ligniiniperäisiä) molekyylejä.

Pyrolyysiöljy ei ole yhtä stabiilia kuin mineraaliöljyt, mikä näkyy esimerkiksi viskositeetin kasvamisena ajan kuluessa ja erityisesti lämmitettäessä (Oasmaa et al. 2015a).

Taulukossa 11.3 on vertailtu tyypillisen nopeapyrolyysiöljyn ominaisuuksia suomalaisiin mineraaliöljyihin (Lehto et al. 2013, Oasmaa et al. 2015b). Eri raaka-aineista valmistettujen nopeapyrolyysiöljyjen koostumuksesta löytyy yksityiskohtaisempaa tietoa mm. Oasmaa & Peacocke 2010 ja Oasmaa et al. 2010 ja taulukossa 11.4.

Biopolttoaineiden on täytettävä EU:n kestävyyskriteerit ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteet, jotta ne voidaan laskea mukaan bioelvoitteisiin ja jotta ne voivat saada verohyötyä vähäpäästöisyydestään valmisteverotuksessa. Vaatimusten täyttämistä seurataan tarkasti. Toimijat, jotka tuovat polttoaineet markkinoille, raportoivat jäsenvaltioille, jotka raportoivat puolestaan EU-komissiolle. Pääsääntönä on, ettei biopolttoainetta saa valmistaa raaka-aineesta, joka on saatu luonnoltaan monimuotoiselta alueelta (suojelualueet, aarniometsät jne.) tai maasta, johon on sitoutunut paljon hiiltä (suot, kosteikot, tietyn tyyppiset metsät). Lisäksi biopolttoaineiden käytöllä on saatava aikaan kasvihuonekaasupäästöjen vähenemä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Uusiutuvan energian direktiivin mukaan päästövähennyksen on oltava vähintään 35 %. Lähivuosina tätä kriteeriä tiukennetaan entisestään, kun biopolttoaineiden epäsuoria maankäytön muutoksia koskeva nk. ILUC (Indirect Land Use Change) -direktiivi (2012/0288(COD)) saataan lopullisesti voimaan ja samalla tarvittavat muutokset päivitetään sekä polttoaineiden laadudirektiiviin (FQD-direktiivi 98/70/EC) että uusiutuvan energian direktiiviin (RES-direktiivi 2009/28/EC).

Taulukko 11.3. Tyypillisten nopeapyrolyysiöljyjen (bioöljyt) koostumus ja vertailu mineraaliöljyihin (Lehto et al. 2013, Oasmaa et al. 2015b).

Ominaisuus	Standardi (ks. Liite D)	Tyypilliset bioöljyt	Raskas polttoöljy 180/420	Kevyt polttoöljy
Kiintoaines, %	ASTM D 7579	< 0,5		
pH	ASTM E 70	2–3		
Vesipitoisuus, p-%	ASTM E 203	20–30	~ 0	~ 0
Viskositeetti (40 °C), mm ² /s (cSt)	EN ISO 3104, ASTM D 445	15–35 ¹	max 180 / 420 50 °C	2,0–4,5
Tiheys (15 °C), kg/dm ³	EN ISO 12185, ASTM D 4052	1,10–1,30 ¹	max 0,99 / 0,995	max 0,845
Kokonaishappoluku (TAN), mg KOH/g	ASTM D 664	70–100		
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg	DIN 51900, ASTM D 240	13–18 ¹	min 40,6	42,6
Tuhka, p-%	EN ISO 6245	0,01–0,1 ²	max 0,08	max 0,01
Hiiltojäännös (MCR, CCR), p-%	ASTM D 4530, ASTM D 189	17–23		
C, p-% k.a.	ASTM D 5291	50–60		
H, p-% k.a.	ASTM D 5291	7–8		
N, p-% k.a.	ASTM D 5291	< 0,4	0,4	0,02
S, p-% k.a.	EN ISO 20846, ASTM D 5453	< 0,05	max 1,0	max 0,001
O, p-% k.a.	laskennallinen	35–40		
Na+K+Ca+Mg, p-% k.a.	EN ISO 16476	< 0,06		
Cl, ppm	ISO 8754, ASTM D 4294	< 75		
Leimahduspiste, °C	EN ISO 2719, EN ISO 9038, ASTM D 93B	40–110 ³	min 65	min 60
Jähmepiste, °C	EN ISO 3016, ASTM D 97	-36...-9	max 15	min -5

¹ Riippuu vesipitoisuudesta.

² Metallit hapettuvat tuhkatessa, mikä voi johtaa liian suuriin tuhkapitoisuuksiin (eli tuhkapitoisuus suurempi kuin kiintoaineksen määrä)

³ Leimahduspisteen määrittäminen ei sovi pyrolyysiöljylle. Lisätietoa: Oasmaa et al. 2012.

Taulukko 11.4. Nopeapyrolyysiöljyn ominaisuuksia eri raaka-aineista (Oasmaa et al. 2010).

Ominaisuus	Mänty		Hakkuutähde, ruskea, varastoitu		Hakkuutähde, vihreä, tuore		Ohran olki		Timotei		Ruokohelpi	
	Raaka-aine	Öljy	Raaka-aine	Öljy	Raaka-aine	Öljy	Raaka-aine	Öljy	Raaka-aine	Öljy	Raaka-aine	Öljy
Kosteus, p-%	9,5	23,9	4,9	26,7	8,1	25,5	8,8	51,1	3,9	39,3	10,9	27,4
OMINAIUUDET SAAPUMISTILASSA, p-%, raaka-aineet ilmoitettu kuiva-aineessa.												
Kiintoaines	-	0,01		0,17		0,09		0,43		0,01		0,15
Tuhka*	0,1	0,03	3,8	0,3	2,1	0,1	5,8		3,2	0,004	1,1	
Haihtuvat	84,0		73,2		76,7		73,9		76,7		81,3	
Hilli, C	50,5	40,6	51,1	41,4	51,4	41,2	48,8	26,5	47,6	32,1	45,7	39,3
Vety, H	6,4	7,6	5,9	7,4	6,0	8,0	5,9	9,0	6,1	8,5	5,6	7,7
Typpi, N	< 0,1	< 0,1	0,5	0,3	0,5	0,3	0,8	0,9	0,7	0,6	0,9	0,6
Happi, O (erotus)	43	52	43	51	42	51	45	63	46	59	48	52
Rikki, S		0,01		0,03		0,02						
Kloori, Cl		0,006		0,002		0,004						
OMINAIUUDET SAAPUMISTILASSA, ppm												
Natrium, Na		< 5				8						
Kalium, K		34		110		89						
OMINAIUUDET KUIVA-AINEESSA (k.a.) tai SAAPUMISTILASSA (ar), MJ/kg												
Kalorimetrinen lämpöarvo, k.a.	20,4		20,5		20,8		18,5		19,1		19,7	
Kalorimetrinen lämpöarvo, ar		16,9		16,9		16,7		11,1		13,3		16,0
Tehollinen lämpöarvo, k.a.	19,0	20,1	19,3	20,9	19,5	20,4	17,2	18,6	17,8	18,4	18,5	19,7
Tehollinen lämpöarvo, ar	17,0	15,3	18,2	15,3	17,7	15,2	15,5	9,1	17,0	11,5	16,2	14,3
Viskositeetti (40 °C), mm ² /s (cSt)		17		17		24				5		
Tiheys (15 °C), kg/dm ³		1,206		1,194		1,210				1,150		
Leimahduspiste, °C		53		42		65						
Jähmepiste, °C		-36		-12		-27						
pH		2,7		3,2				3,7		3,4		3,6

* Öljyn tuhka 775 °C:ssa.

Öllyille ilmoitetaan ominaisuudet yleensä saapumistilassa.

12. Kaasumaiset polttoaineet

12.1 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 jatko-prosessointiin. Maakaasua on käytetty Suomessa vuodesta 1974 asti.

Kaasumaisille polttoaineille yhteisiä ominaisuuksia ovat korkea syttymislämpötila, suuri palamisnopeus ja kapeasyttymisalue.

Suomeen tuotava maakaasu on pääasiassa metaania (98 %) sekä pieniä määriä etaania, propaania, butaania ja typpeä sisältävä kaasuseos. Siperiasta Suomeen tuotavan maakaasun koostumus on esitetty taulukossa 12.1, jossa on myös eri komponenttien tiheydet ja moolimassat. Tällainen maakaasu sopii hyvin polttoon. Suhteellisella tiheydellä on merkitystä esim. suutinvirtauksia mitoitettaessa tai arvioitaessa kaasun käyttäytymistä vuototapauksissa. Maakaasun tiheys on likimain puolet ilman tiheydestä (1,293 kg/m³, ilman suhteellinen tiheys on 1,00) (Maakaasukäsikirja 2014). Kaasun tiheys (normaalioloissa) voidaan laskea jakamalla moolimassa moolin tilavuudella 22,414 litraa.

Taulukko 12.1. Suomeen tuotavan maakaasun koostumus (Maakaasukäsikirja 2014).

	Maakaasun koostumus	Moolimassa, g/mol	Tiheys*, kg/m ³	Suhteellinen tiheys
Metaania CH ₄	> 98 %	16,04	0,72	0,56
Etaania C ₂ H ₆	0,8 %	30,07	1,35	1,05
Propaania C ₃ H ₈	> 0,2 %	44,10	2,01	1,56
Butaania C ₄ H ₁₀	0,02 %	58,12	2,71	2,10
Typpeä, N ₂	0,9 %	28,01	1,27	0,97
Hiilidioksidia CO ₂	0,1 %			

* kaasumaisena normaalioloissa (lämpötila 0 °C, paine 1,01325 bar)

Metaani on hajuton ja väritön hiilivety. Metaanin tehollinen lämpöarvo on 50,0 MJ/kg (taulukko 12.3). Kaasun havaittavuuden parantamiseksi siihen sekoitetaan ennen siirtoputkistosta jakeluverkostoon luovuttamista hajustetta, yleisemmin tetrahydrotiofeenia tai merkaptania. Hajusteaineet ovat samoja kuin mitä nestekaasussa yleisesti käytetään. Tetrahydrotiofeenia (C₄H₈S) sekoitetaan kaasuun noin 15 mg/m³. Hajustettu maakaasu on aistittavissa, kun sitä on ilmassa vähintään 0,05–0,2 %. Kaasun rikkipitoisuus on alle 1 mg/m³. Hiilivetytuotetta pidetään rikkittömänä, kun rikkipitoisuus on enintään 100 mg/m³_n.

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.

Metaanin kiehumispiste on $-161,5\text{ °C}$, jonka alle jäädyttämällä maakaasu voidaan nesteyttää. Nesteytettyinä maakaasun (LNG = Liquefied Natural Gas) tilantarve on noin 1/600 alkuperäisestä kaasumaisen olomuodon vaatimasta tilavuudesta.

Maakaasun keskeiset ominaisuudet on lueteltu taulukossa 12.2 ja taulukossa 12.3 sitä on vertailtu nestekaasuihin.

Taulukko 12.2. Maakaasun yleisiä ominaisuuksia (Maakaasuyhdistys ry 1987, Maakaasukäsikirja 2014).

Ominaisuus	Maakaasu
Moolimassa (M)	16,0 g/mol
Tiheys normaaliolotilassa (0 °C ja 1,01325 bar)	0,72 kg/m ³
Suhteellinen tiheys	0,56 (ilma = 1)
Sulamispiste	-182 °C
Kiehumispiste	-161,5 °C
Kriittinen lämpötila	-82 °C
Höyrystymislämpö	549 kJ/kg (-161,5 °C:ssa)
Tiheys nestemäisenä	421 kg/m ³ (-161,5 °C:ssa)
Tilavuussuhde	587 (tiheyksien suhde)
Kaasumaisen tuotteen kompressibiliteettikerroin	$k = 1,0016 - (P_{\text{abs}}/476 \text{ bar})$ Esim. 10 bar paineessa $k = 0,98$
Kastepiste (40 bar paineessa)	Talvella korkeintaan -5 °C Kesällä korkeintaan $+0\text{ °C}$
Ominaislämpökapasiteetti (0 °C)	$C_p = 2,15 \text{ kJ/kg K}$ $C_v = 1,63 \text{ kJ/kg K}$
Lämpökapasiteettisuhde	$C_p / C_v = 1,3$
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 $16,7 \times 10 \text{ m}^2/\text{s}$

12.2 Nestekaasut

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

Nestekaasuja ovat propaani (C₃H₈) ja butaani (C₄H₁₀). Nestekaasut ovat useampien kevyiden hiilivetyjen (myös olefiinien ja parafiinien) seoksia, mutta sellaisissa suhteissa, että seos vastaa käytännössä propaania tai butaania.

Maakaasun ja nestekaasujen ominaisuuksien vertailu on esitetty taulukossa 12.3. Suomessa käytetty maakaasu kuuluu H-ryhmään (korkean lämpöarvon maakaasu). Samassa kaasulaitteessa tai -polttimissa voidaan käyttää vain Wobbe-indeksiltään samansuuruisia kaasuja.

Taulukko 12.3. Maakaasun ja nestekaasun fysikaalisia lukuarvoja (Maakaasun koostumus ja ominaisuudet 1987, Maakaasukäsikirja 2014).

Ominaisuus	Maakaasu	Propaani	Butaani
Moolimassa, g/mol	16,04	44,10	58,12
Tiheys, kg/m ³	0,72	2,01	2,71
Suhteellinen tiheys kaasumaisena	0,555–0,700	1,56	2,08
Kiehumispiste, °C	-161,5	-42,1	-0,5
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/m ³ _n	39,8	101,2	133,0
MJ/kg	55,3	50,3	49,1
Tehollinen lämpöarvo, kWh/m ³	10,0	28,8	34,0
kWh/kg	13,9	12,8	12,65
MJ/m ³	36,0	93,0	122,8
MJ/kg	50,0	46,0	45,7
Syttymisrajat, kaasua til.-% ilmassa	5,0–15,0	2,1–9,3	1,8–8,4
Syttymislämpötila, °C	650	510	490
Kinemaattinen viskositeetti, m ² /s	14,5	3,7	2,6
Wobbe-indeksi*, MJ/m ³ _n	50,4 – 56,9	75,0	85,8
	47,6		
Teoreettinen palamislämpötila ilmassa, °C (Ilmakerroin λ = 1)	1 915	1 925	1 900
Palamisnopeus ilmassa, cm/s	41	45	42
Palamisilman tarve (ilmakerroin λ = 1,0) m ³ _n / m ³ _n kaasua	9,6	24,3	32,0

* Ylempi Wobbe-indeksi (lämpötila 15 °C ja paine 1013,25 mbar), joka lasketaan lämpöarvon ja tiheyden avulla.

12.3 Jalostamo-, koksamo- ja masuunikaasu

Raakarauta valmistetaan Suomessa masuuneissa, joissa raudan oksidit pelkistetään raakaraudaksi hähkä- ja vetykaasujen avulla. Niitä syntyy, kun kivihiilestä valmistettu koksi ja öljynjalostuksen sivutuotteena saatava erikoisraskas pohjaöljy palavat masuunissa. Masuuni on jatkuvatoiminen kuilu-uuni, jossa valmistetaan rautaa. Syntyvää masuunikaasua hyödynnetään masuuniin puhallettavan ilman esilämmityksessä, muissa tehtaan prosesseissa sekä sähköntuotannossa. Koksi valmistetaan kivihiilestä tehtaan koksamossa.

Kaasu koostuu pääasiassa vedystä, erilaisista hiilivedyistä, tpeestä, hiilimonoksidista ja hiilidioksidista. Ammoniakkia syntyy noin 8 g/m³. 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 teräksiksi. Se tapahtuu happikonverterissa, jossa sula raakarauta mellotetaan happikaasulla. Myös tästä prosessista voidaan ottaa talteen energiasisällöltään merkittäviä kaasuja (Energia Suomessa 2004).

Öljyn jalostuksen eri vaiheissa syntyy polttokelpoisia kaasuja eli ns. jalostamokaasuja, joiden ominaisuudet vaihtelevat. Kaasut sisältävät pääasiassa vetyä, hiilimonoksidia, etaania ja metaania. Taulukossa 12.4 on erilaisten prosessikaasujen tärkeimmät ominaisuudet.

Taulukko 12.4. Jalostamokaasun, koksamokaasun ja masuunikaasun ominaisuuksia (Arasto et al. 2013).

Ominaisuus	Jalostamokaasu	Koksamokaasu	Masuunikaasu
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	6,4	38,4	2,6
Koostumus, til-%			
Metaani, CH ₄	0,0	23,1	0,0
Etaani, C ₂ H ₆	0,0	0,7	0,0
Eteeni, C ₂ H ₄	0,0	2,0	0,0
Vety, H ₂	0,0	57,9	5,3
Typpi, N ₂	15,0	6,9	45,1
Hiilidioksidi, CO ₂	2,2	1,8	13,0
Hiilimonoksidi, CO	69	5,1	23,1
Happi, O ₂	0,0	0,0	0,2

12.4 Biokaasu

Biokaasua muodostuu erilaisten mikrobin hajottaessa orgaanista aineesta hapettomissa olosuhteissa. Biokaasu on orgaanisen aineksen mädäntymisen seurauksena syntyvä kaasu, joka koostuu pääosin metaanista (55–70 %) ja hiilidioksidista (30–45 %). Hajoamisessa välituotteena muodostuu vetyä, jonka mikro-organismit käyttävät yleensä metaanin tuotantoon. Prosessiolosuhteet voidaan säätää myös niin, että osa orgaanisesta aineksesta voidaan hajottaa vedyksi. Vedyn ja metaanin tuotanto voidaan toteuttaa kaksivaiheisena prosessina, jolloin lopputuotteena on sekä vetyä että metaania. Vedyn tuotanto on lähinnä tutkimusvaiheessa laboratorio- ja pilotmitassa, eikä toistaiseksi ole täydenmittakaavan sovelluksia. (Tähti & Rintala 2010.)

Metaani ja hiilidioksidi ovat kumpikin väröttömiä ja hajuttomia kaasuja. Lähteestä riippuen kaasussa on pienempinä pitoisuuksina rikkivetyä (0–2 %), typpeä (0–25 %) sekä kloori- ja fluoriyhdisteitä. Biokaasun lämpöarvo on 4–6 kWh/m³_n (14,4–21,6 MJ/m³_n). Sellaisenaan poltettavaksi ja myös moottorin polttoaineksi soveltuvan biokaasun tuotannossa on kyse sekä energiantuotannosta että ympäristönsuojelusta kasvihuonekaasujen ja hajuhaittojen vähenemisen muodossa.

Biokaasun raaka-aineksi soveltuvat varsin erilaiset orgaaniset massat. Koska metaanibakteerit toimivat parhaiten vesipitoisessa ympäristössä, menetelmä soveltuu erityisen hyvin lietemäisten jätteiden käsittelyyn. Tällaisia jätteitä muodostuu maatilataloudessa (lietelanta), kunnallisissa jätevedenpuhdistamoissa, elintarviketeollisuudessa jne. Orgaanisen aineksen syöttöä voidaan tehostaa lisäämällä lietteisiin esimerkiksi kiinteää kasvimassaa siten, että seoksen kuiva-ainepitoisuus nousee lähelle 10 % tai jopa hieman sen yli. Teoreettinen metaaninsaanto on suurin rasvoista (1 014 l/kg VS), sitten proteiineista (496 l/kg VS) ja hiilhydraateista (415 l/kg VS). VS tarkoittaa orgaanista aineesta. Taulukoissa 12.5 ja 12.6 on eri syötteiden metaanintuottopotentiaaleja sekä orgaanisen aineen pitoisuuksia. Taulukossa 12.7 on biohajoavien jätteiden ja kasvien kuiva-aineen pitoisuudet (TS) sekä orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineesta (VS/TS) (Tähti & Rintala 2010).

Taulukko 12.5. Esimerkkejä eri syötteiden metaanintuottopotentialista (Lehtomäki & Rintala 2006).

Syöte	m ³ CH ₄ /t orgaanista ainetta	m ³ CH ₄ /t märkäpaino
Teurastamojäte	570	150
Biojäte	500–600	100–150
Energiakasvit	300–500	30–150
Jätevesiliete	310–640	8–16
Lanta	100–400	7–20

Taulukko 12.6. Syötteiden orgaanisen aineen pitoisuuksia ja metaanintuottopotentiaaleja (Latvala 2009, Lehtomäki & Rintala 2006).

Syöte	Kuiva-ainepitoisuus, TS, %	Orgaanisen aineen osuus, VS, %	VS/TS-suhde	VS kokonaispainosta, kg/t	CH ₄ tuotto, l/kg VS	CH ₄ tuotto, m ³ /t
Puhdistamoliete	5	3	60	30	150	5
Lehmän lanta	6,5	5,3	82	53	175	9
Biojäte	40	28	70	210	550	116
Nurmi	30	27,9	93	279	400	112
Sokerijuurikas	20	17,9	89	179	229	41

Taulukko 12.7. Biohajoavien jätteiden ja kasvien kuiva-aineen pitoisuudet (TS) sekä orgaanisen aineksen (VS) osuus kuiva-aineesta (VS/TS). Ominaisuuksista on esitetty keskiarvo sekä vaihteluväli suluissa (Tähti & Rintala 2010).

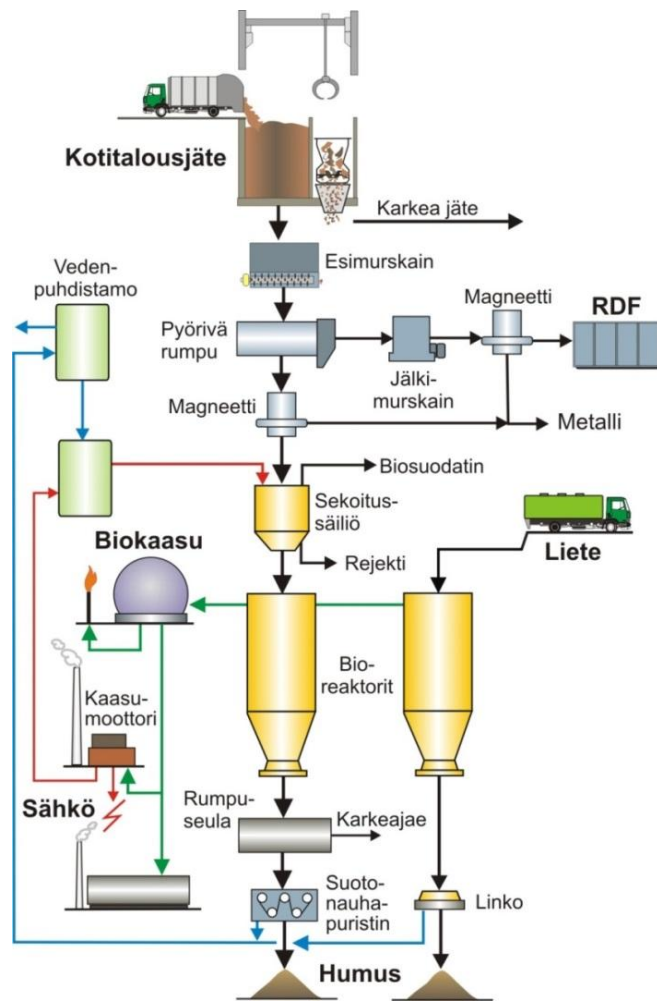
Jätteet	Kuiva-aine, TS, %	Orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineesta, VS/TS %
Teurasjäte	26,4 (20,0–31,0)	90
Kasvisjäte	11,3 (7,12–19,0)	92
Yhdyskuntien biojäte	34,5 (33,5–35,0)	74
Yhdyskuntien puhdistamolietteet*	18,5 (3,0–50,0)	70
Elintarviketeollisuuden puhdistamolietteet	10,0 (2,0–30,0)	70
Metsä- ja paperiteollisuuden puhdistamolietteet	2,5 (2,0–3,0)	70
Olki	89,8 (89,6–90,0)	92
Nurmi	24,0 (17,4–43,7)	92
Naatit	11,6 (-)	85

* Lietteiden kuiva-ainepitoisuuksissa on suuri vaihtelu, koska VAHTI-järjestelmässä, josta luvut on otettu, lietteiden kuiva-ainepitoisuuksista osa on ilmoitettu raakalietteille ja osa kuivatuille lietteille.

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.

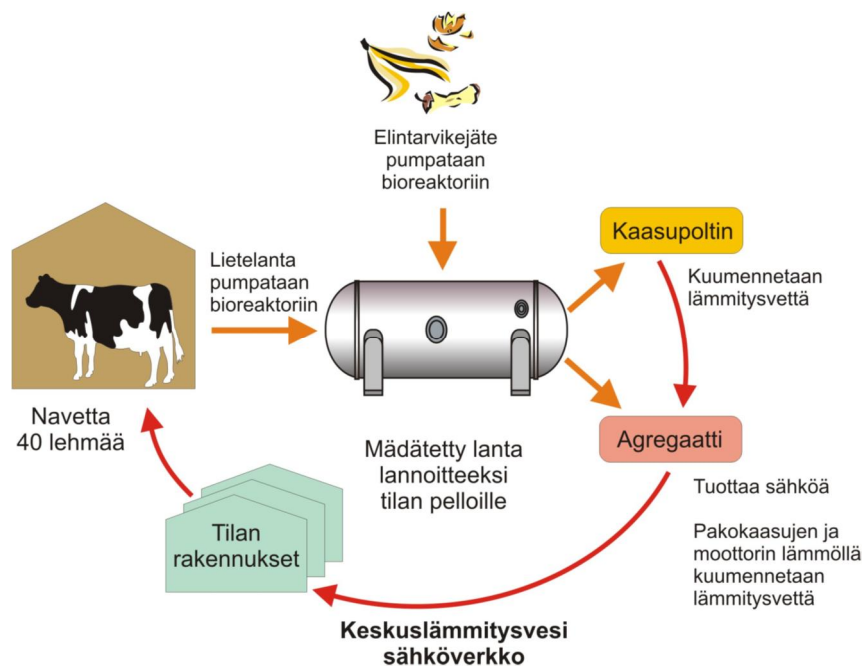
Maatilakohtaisia biokaasulaitoksia oli toiminnassa 13 paikassa. Kiinteitä yhdyskuntajätteitä käsiteltiin 14 biokaasulaitoksessa. Vuonna 2014 reaktorilaitoksissa tuotettiin biokaasua 61,5 miljoonaa m³ ja sitä hyödynnettiin lämpö- ja sähköenergiana yhteensä 309,6 GWh. Biokaasua kerättiin talteen 40 kaatopaikkalai-

tokselta yhteensä 94,0 miljoonaa m³. Pumpatusta biokaasusta 74,7 miljoonaa m³ käytettiin sähkön ja lämmön tuotantoon ja energiaa tuotettiin 303,7 GWh. Yhteensä biokaasua tuotettiin 155,5 miljoonaa m³ (Huttunen & Kuittinen 2015). Suomessa viedään kaatopaikoille vuosittain 0,5 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä. Kaatopaikoilla muodostuvan biokaasun määräksi on arvioitu noin 200 miljoonaa m³ vuodessa. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013) kieltää orgaanisen jätteen sijoittamisen kaatopaikoille vuodesta 2016 lähtien (Huttunen & Kuittinen 2015, Häkkinen et al. 2014). Kuvassa 12.1 on biokaasulaitoksen periaatekuva.



Kuva 12.1. Biokaasulaitoksen periaatekuva. Kuva: VTT.

Biokaasutus karjan – esimerkiksi naudan tai sian – lietelannasta tuo merkittävän avun maatalouden kannattavuuteen (kuva 12.2). Kotieläinten jätteiden tuotanto lietelantana on Suomessa yli 17 miljoonaa m³ eli 2,25 miljoonaa tonnia kuiva-ainetta. Lantojen teknistaloudellinen potentiaali on 1,4 TWh/a (0,9–1,8 TWh/a). Nautojen, sikojen ja siipikarjan talteenkerätystä lannasta arvioidaan voitavan hyödyntää 60 % ja lampaiden lannasta 10 % (Tähti & Rintala 2010). Energiapotentiaali voidaan laskea, kun märkápainot muutetaan kuiva-aineksi (TS) ja orgaaniseksi aineeksi (VS) käyttäen taulukon 12.8 arvoja. Materiaalin energiapotentiaali on massa (t) x metaanin tuotto (m³/tTS) x metaanin lämpöarvo (10 kWh/m³) (taulukko 12.8).



Kuva 12.2. Biokaasun tuotanto maatilalla. Kuva: VTT.

Taulukko 12.8. Eläinten tuottamat vuosittaiset lantamäärät (m^3) kuivikelantana sisältäen kuivikkeet (sekä lietelannan pesuvesien kanssa, joiden arvot ovat suluisissa), lannan tiheys (t/m^3), kuiva-ainepitoisuus (TS) sekä orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineesta (VS/TS) (Tähti & Rintala 2010).

Kotieläin	Keskiarvo, m^3 /eläin/a	Tiheys, t/m^3	Kuiva-ainepitoisuus (TS) %	Orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineesta (VS/TS), %
Lypsylehmä	24 (24)	0,78 (0,99)	21,5 (5,5)	80
Emolehmä	15 (15)	0,78 (0,99)	21,5 (5,5)	80
Hiehot ja sonnit	15 (15)	0,78 (0,99)	21,5 (5,5)	80
Vasikat, alle 1 v	4 (4)	0,78 (0,99)	21,5 (5,5)	80
Karjut, emakot ja lihasiat yli 50 kg	2,4 (2,4)	0,64 (1,00)	29,3 (3,5)	75
Muut siat 20–50 kg ja porsaatt alle 20 kg	1,2 (1)	0,64 (1,00)	29,3 (3,5)	75
Uuhet yli 1 v, karitsoineet ja tiineet uuhet alle 1 v, muut lampaat ja vuohet	1,5	0,59	34	
Hevoset	12	0,53	31	88
Minkki ja hilleri	0,25	0,74	47	
Kettu ja supi	0,5	0,53	31	88
Munivat kanat vähintään 20 viikkoa, kukot ja broileriemot	0,05	0,62	48	75
Kananpoikaset alle 20 viikkoa, broilerit	0,015	0,62	48	75
Kalkkuna	0,03	0,62	48	75

Yhdestä kuutiometristä lietelantaa syntyy kaasua noin 20 m³ vastaten noin 6,5 kWh energiaa ja yksi kotieläinliete-m³ sisältää 5–7 % orgaanista kuiva-ainetta (taulukot 12.9 ja 12.10).

Hoidetuilla, viljelemättömillä pelloilla ja viherkesannoilla muodostuu mittava määrä biomassaa, jota voitaisiin käyttää myös biokaasun tuotantoon. Huomioiden satovaihtelu (1,33–10,3 tonnia kuiva-ainetta hehtaaria kohti) vuotuinen potentiaali olisi noin 4,7 TWh (Pahkala & Lötjönen 2015).

Taulukko 12.9. Biokaasun saanto maatalousjätteistä (Sankari 1994, Alakangas 2000).

Perusaine	Saanto, m ³ /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
Sinimailanen	0,77*
Järviruoko	0,44*
Energiapaju	0,49*
Karjan lanta	0,4–0,7

* biokaasu m³/kg orgaanista ainetta (tuhkaton ja vedetön aines)

Taulukko 12.10. Eläinten tuottamat orgaanisen jätteen määrät (Suomen biokaasuyhdistys, Alakangas 2000).

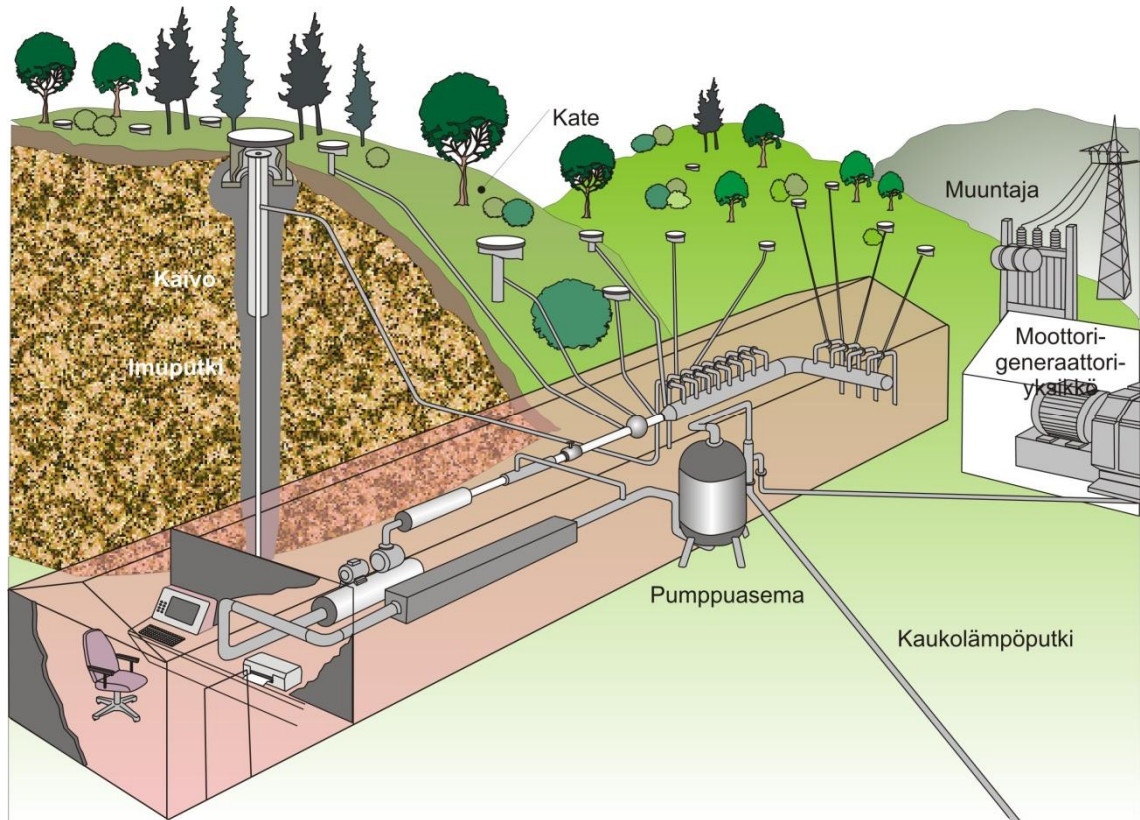
Eläin	Lantamäärä, kg _{k.a} /a	Biokaasua, m ³ /a	Sähköä, kWh
Lehmä	1 600	640–1 120	3 392–5 936
Sika	104	42–73	223–387
Emakko	336	136–235	721–1246
Kettu	18	7–13	37–69
Supi	20	8–14	42–74
Minkki	7,5	3–5	16–27
Kana	6,2	2–4	13–23

Yksi keskikokoinen suomalaisen kaupungin kaatopaikka tuottaa metaanikaasua noin 200–400 m³/h. Yhdyskuntajätetönnin hajoamisessa muodostuu biokaasua 100–200 m³. Biokaasua tuottava anaerobinen hajoaminen alkaa 2–4 vuoden kuluttua läjittämisestä ja jatkuu useita vuosikymmeniä. Vuoden 2016 alusta Suomen kaatopaikoille ei saa enää viedä biohajoavaa jätettä, joten kaatopaikkakaasun tuotanto vähenee.

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 m³ jätevettä. Kaatopaikkakaasu sisältää lähinnä metaania CH₄ (25–64 %) ja hiilidioksidia CO₂ (35–45 %). Kaasussa esiintyy lisäksi pieninä pitoisuuksina useita kloori- ja fluorihilivetyjä sekä rikkiyhdisteitä, jotka aiheuttavat kaatopaikkakaasulle ominaisen epämiellyttävän hajun.

Ulkoilmaan päästessään kaatopaikkakaasu on herkästi syttyvää, haisevaa ja ympäristöä saastuttavaa. Lisäksi metaanikaasu CH₄ edistää kasvihuoneilmiötä monin verroin tehokkaammin kuin hiilidioksidi. Metaani on vapaasti ilmakehään päästessään yli 20 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu. 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 12.3). 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 12.3. Kaatopaikkakaasun keräys ja käyttö moottorin polttoaineeksi. Kuva: VTT.

Suomessa toimi vuoden 2014 lopussa yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla 16 biokaasureaktorilaitosta. Teollisuuden jätevesiä käsiteltiin anaerobisesti kolmessa eri laitoksessa. Taulukossa 12.11. on esitetty jätevedenpuhdistamoiden biokaasun koostumuksia.

Kaupungeissa ja asutustaajamissa viemärlaitosten yleistyessä oli välttämätöntä ryhtyä tehostamaan myös jätevesien puhdistamista. Orgaanisten 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 m³ käsiteltyä lietetonnia kohti. Muodostuvan biokaasun metaanipitoisuus on 60–70 % ja sen lämpöarvo on 6–6,5 kWh/m³. Puhdistamon koosta ja paikallisista olosuhteista riippuen tuotettu biokaasu voidaan käyttää joko pelkän lämmön tai sekä lämmön että sähkön tuotantoon tai se voidaan jatkojalostaa metaanipitoisuutta korottamalla liikenteen polttoaineeksi tai maakaasuverkkoon syötettäväksi.

Vaasan alueella Mustasaaren kunnassa toimii Suomen vanhin kiinteiden yhdyskuntajätteen komposti- jaetta (biojätteitä) ja mekaanisesti kuivattua yhdyskuntalietettä yhteismädättävä Stormossenin laitos. Laitokselle tuleva jäte käsitellään mekaanisesti ja biologisesti. Laitos tuottaa biokaasua reilut 2 miljoonaa m³, josta hyödynnetään 1,8 miljoonaa m³. Suomessa on 14 yhteismädätyslaitosta, jotka tuottivat yli 30 miljoonaa m³ biokaasua vuonna 2014. Biokaasun metaanipitoisuus on 58–70 %.

Taulukko 12.11. Jätevedenpuhdistamoiden biokaasun tyypilliset komponentit ja vaihteluvälit (Latvala 2009).

Komponentti	Vaihteluväli, %	Komponentti	Vaihteluväli, mg/m ³
Metaani, CH ₄	55–70	Ammoniakki, NH ₄	< 0,2
Hiilidioksidi, CO ₂	30–45	Orgaaniset piiyhdisteet	0,2–32
Happi, O ₂	< 0,5	Hiukkaset	< 5
Typpi, N ₂	< 1	Fluori, F	< 0,2
Kosteus, H ₂ O	2–4	Kloori, Cl	< 2
Komponentti	Vaihteluväli, ppm		
Rikkivety, H ₂ S	10–40		
Metyylimerkaptani, CH ₃ SH	< 0,005		
Dimetyylisulfidi, CH ₃ SCH ₃	< 0,005		
Metyylidisulfidi, CH ₃ SSCH ₃	< 0,01		

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

Biokaasusta voidaan tuottaa puhdistuksen jälkeen lämpöä ja sähköä tai jalostuksen jälkeen liikennepolttoainetta. Biokaasua voidaan jalostaa metaanipitoisuutta korottamalla maakaasun kaltaista polttoainetta. Jos kaasu jalostetaan ja syötetään kaasuverkkoon, niin päästään eroon mm. biokaasun varastointiongelmasta. Myös biokaasun käyttömahdollisuudet lisääntyvät merkittävästi. Maakaasun jakeluverkostosta ja ajoneuvojen tankkausasemilta saatava biokaasu on jalostettua kaasua (95 % metaania). Jalostetun biokaasun tehollinen lämpöarvo on 10 kWh/m³ eli maakaasun luokkaa. Biokaasua, jonka metaanipitoisuutta ei ole korotettu, käytetään biokaasun tuotantolaitoksen läheisyydessä ja jakelu rajoittuu pääasiassa yritysasiakkaille. Jalostamattoman biokaasun ominaisuudet vaihtelevat tuotantolaitoksittain. Maakaasuverkkoon tuotetaan biokaasua vuodessa noin 50 GWh (Gasum Oy).

LABIO Oy:n Kujalan biokaasulaitoksessa käsitellään erilliskerätty biojäte, haravointijätteet ja puhdistamolietteet mädättämällä. Jätteistä syntyy raakabiokaasua, jonka Gasum jalostaa koostumukseltaan maakaasua vastaavaksi biokaasuksi. Kaasu johdetaan Gasumin maakaasuverkkoon ja se soveltuu esimerkiksi liikenteen polttoaineeksi. Myös HSY:n jätevedenpuhdistamon laitos Espoossa tuottaa biokaasua maakaasuverkkoon.

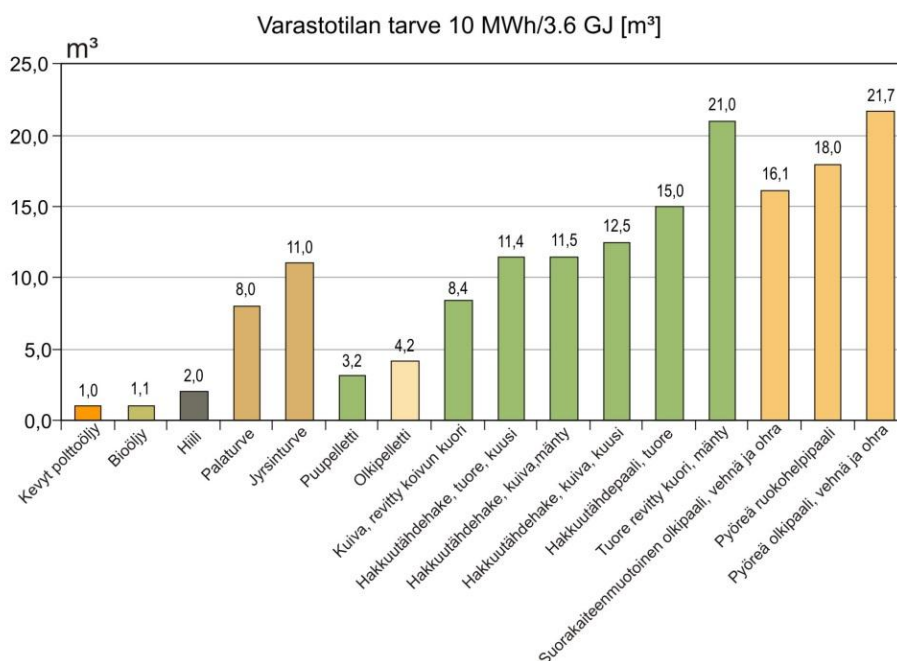
Biokaasutuksen jälkeen otetaan talteen jäljelle jäävä ravinteikas orgaaninen aines, jota käytetään joko lietteenä tai kuivattuna lannoitteeksi. Biokaasutuksen ansiosta raaka-aineiden ikävä haju ja taudinaiheuttajabakteerit ovat hävinneet ja menetelmä vähentää näin ollen jätteen aiheuttamaa pinta- ja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

13. Polttoaineiden ominaisuudet ja energiantuotanto

13.1 Polttoaineominaisuuksien yhteys polttoon

Polttoaineen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo kuvaa täysin kuivan polttoaineen palamisessa vapautuvaa energiamäärää olettaen, että polttoaineen sisältämästä vedystä muodostuneen vesihöyryn latenttia lämpöä ei saada talteen. Vesihöyryn latenttilämpö voidaan ottaa talteen savukaasunlauhduttimella. Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa huomioi polttoaineen sisältämän kosteuden lämpöarvoa alentavan vaikutuksen. Lämpöarvon alentamisen lisäksi kosteus lisää savukaasuvirtaa ja heikentää kattilan hyötysuhdetta. Lisäksi kostea polttoaine jäätyy helpommin talvella ja voi aiheuttaa ongelmia polttoaineen syöttölaitteistoissa.

Energiatiheys kuvaa energiasisältöä tilavuusyksikköä kohti. Energiatiheys vaikuttaa mm. tarvittaviin polttoaineen varastointi-, käsittely- ja syöttölaitteistojen kapasiteetteihin sekä kuljetuskustannuksiin. Kuvassa 13.1 on vertailtu eri polttoaineiden energiatiheyksiä tilantarpeen näkökulmasta.



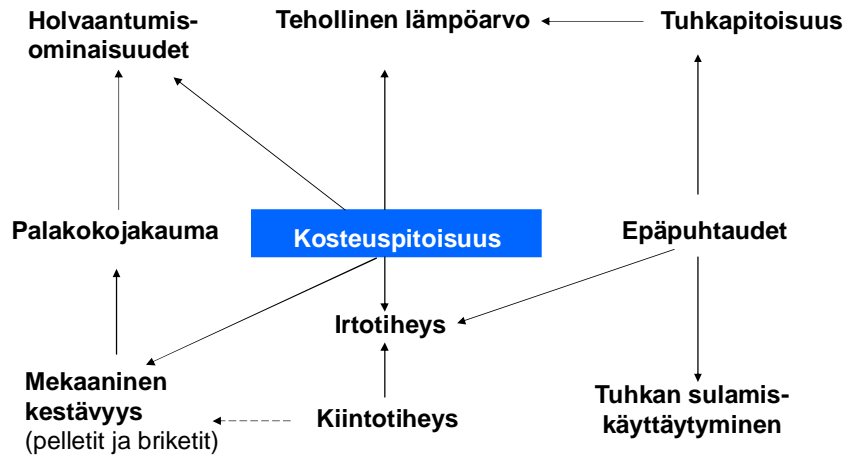
Kuva 13.1. Eri polttoaineiden tilantarve, kun energiamäärä on 10 MWh. Kuva: VTT.

Vaadittava polttoaineen palakoko(jakauma) vaihtelee polttotekniikoittain ja -aineittain. Palakokojakauma vaikuttaa itse palamisprosessin lisäksi myös kuljetus- ja käsittelylaitteistojen toimintaan, esimerkiksi hol-

vaantumiskäyttämiseen. Hakkeen palakoko on homogeenisempi kuin murskeen ja hakkeella on paremmat käsiteltävyysominaisuudet kuin pidempiä kappaleita sisältävällä murskeella.

Tuhkapitoisuus mm. alentaa polttoaineen lämpöarvoa ja vaikuttaa tuhkan käsittelylaitteistoilta vaadittavaan kapasiteettiin. Epäpuhtaudet kuten maa-aines, lasit, kivet ja metallit nostavat bio- ja jäteperäisten polttoaineiden tuhkapitoisuutta.

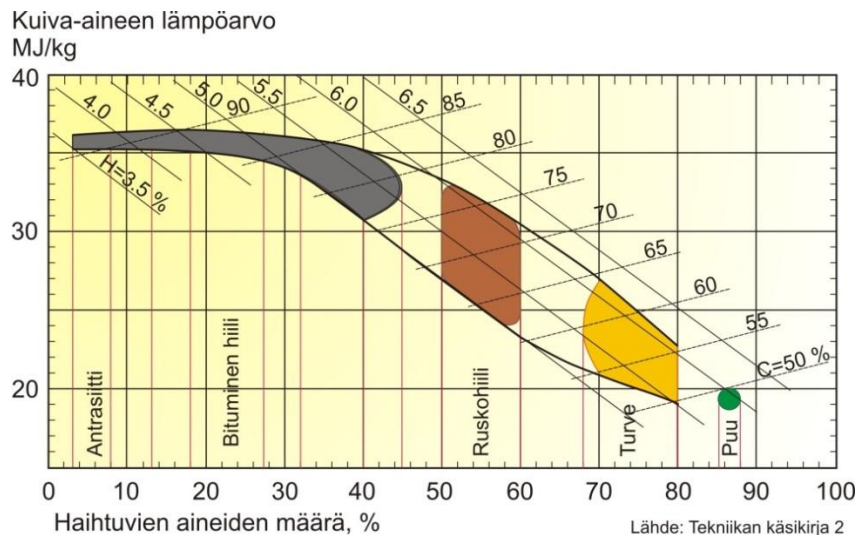
Kuvassa 13.2 on havainnollistettu edellä kuvattujen ominaisuuksien riippuvuutta toisistaan.



Kuva 13.2. Polttoaineiden ominaisuuksien riippuvuus toisistaan. Lähde: Hartmann 2007. Kuva: VTT.

Haihtuvien aineiden osuus vaikuttaa mm. palamisprofiiliin, reaktiivisuuteen ja päästöjen muodostumiseen. Pölypoltossa haihtuvien aineiden määrän lisääntyminen helpottaa syttymistä ja stabiloi liekkiä. Biopolttoaineilla haihtuvien aineiden osuus kuiva-aineesta on korkea ja kivihiillillä alhainen.

Hiili ja vety ovat palamisessa vapautuvan energiamäärän kannalta oleelliset alkuaineet. Kuvassa 13.3 on esitetty tyypillisiä hiili- ja vetypitoisuuksia sekä haihtuvien aineiden määriä ja lämpöarvoja eri polttoainetyypeille (Kurki-Suonio 1981).



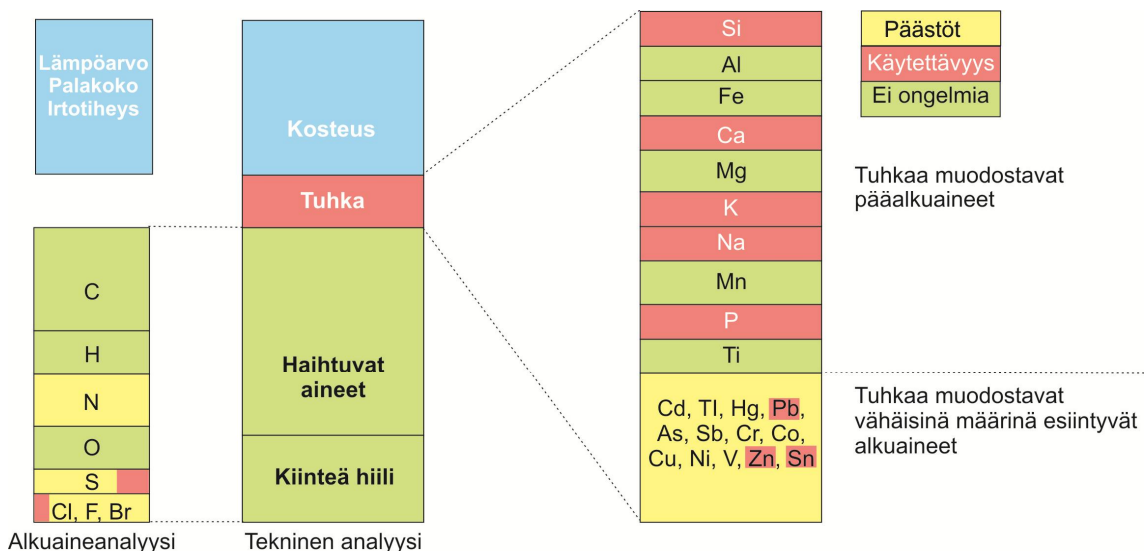
Kuva 13.3. Eri polttoainetyyppien hiili- ja vetypitoisuudet, haihtuvien aineiden määrät ja kuiva-aineen lämpöarvot. Kuva: VTT.

Polttoaineen sisältämästä typestä suurin osa muuntuu alkuainetypeksi, mutta silti merkittävä osa muodostaa haitallisia typenoksidipäästöjä, joista typpimonoksidin (NO) osuus on suurin. Typpimonoksidi hapettuu ilmakehässä nopeasti typpidioksidiksi, joka veden kanssa reagoi muodostaen typpihappoa ja typpihapoketta, jotka molemmat happamoittavat sadevesiä.

Rikkipitoisuus on oleellinen sekä päästöjen (SO₂) että tuhkakemian kannalta kuumakorroosion estämisessä. Osa rikistä voi kuitenkin myös muodostaa rikkihappoa, josta voi aiheutua kastepistekorroosiota savukaasukanavan 'kylmässä päässä', mikäli lämmönsiirtopintojen lämpötilat ovat liian alhaiset. Rikkihapon kastepistekorroosio on suuri ongelma myös kanavistossa ja laitteissa kuten sähkösuotimessa, kun rakenteen lämpötila on rikkihapon kastepisteen alapuolella (erityisesti kylmäsiilat). Kloori on tärkein tulistimien kuumakorroosion aiheuttaja bio- ja jäteperäisten polttoaineiden poltossa ja oleellinen myös päästöjen (HCl, PCDD/F) kannalta.

Tuhkan koostumus määrittää polton ns. tuhkakemiaa (likaantumis-, kuonaantumis-, korroosio- ja petihiekan agglomeraatiomekanismit). Esimerkiksi alkalimetallit (K, Na) vaikuttavat kattilan likaantumiseen, tuhkan sulamiseen, korroosioon (yhdessä kloorin kanssa) ja leijupetihiekan agglomeraatioon eli petihiekakajyvasten yhteenliimautumiseen. Raskasmetallit vaikuttavat ilmaan joutuviin päästöihin, tuhkan hyötykäyttöön sekä korroosio mekanismeihin (erityisesti lyijy Pb ja sinkki Zn). Näitä vaikutuksia on kuvattu tarkemmin seuraavissa luvuissa.

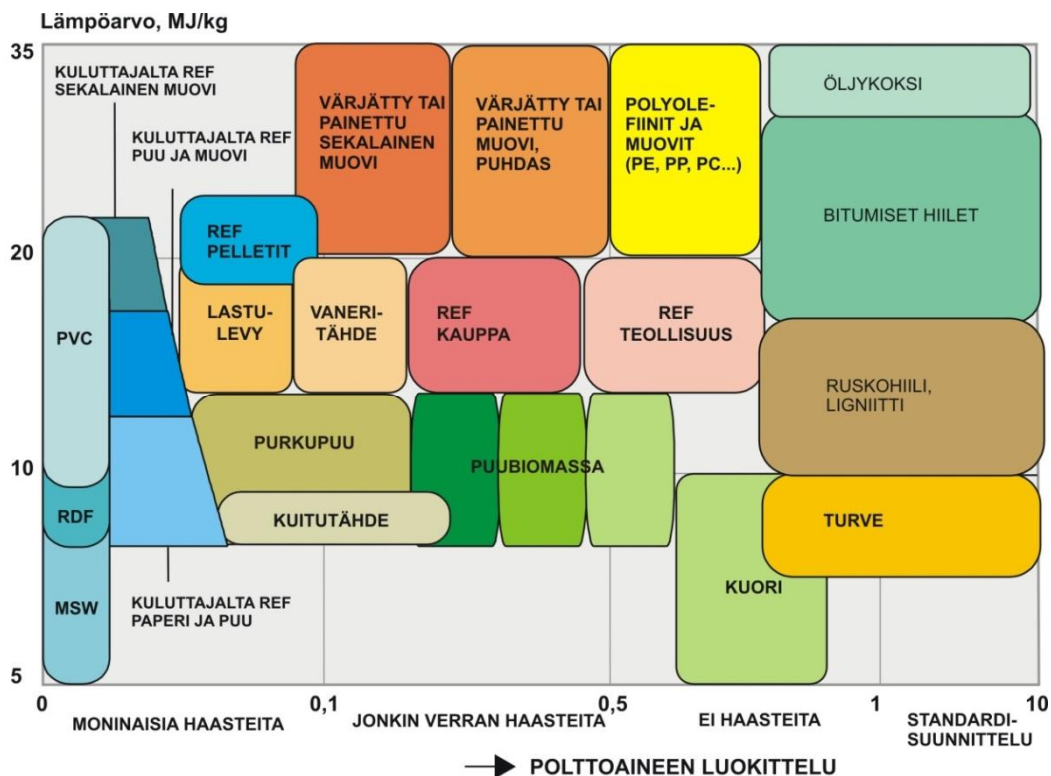
Kuvassa 13.4 on havainnollistettu polttoaineen kemiallisten ominaisuuksien vaikutusta poltossa esiintyviin haasteisiin Valmet Oyj:n näkemyksen mukaan.



Kuva 13.4. Polttoaineanalyysin tulosten yhteys polttoon. Lähde: Valmet Oyj.

13.2 Polttoaineet ja niiden asettamat haasteet polttoprosessille

Polttoaineet eroavat ominaisuuksiltaan merkittävästi toisistaan, joten ne asettavat laitoksille eriasteisia vaatimuksia ja haasteita (taulukko 13.1 ja 13.2). Kuvassa 13.5 on esitetty Amec Foster Wheelerin laatima polttoaineiden laatuluokittelu lämpöarvon ja poltossa esiintyvien ongelmien mukaan. Parhaimmat polttoaineet eli ne, joilla on korkea lämpöarvo ja jotka eivät aiheuta poltossa ongelmia, löytyvät kuvaajan oikeasta yläkulmasta. Huonoimmat eli paljon ongelmia aiheuttavat, matalan lämpöarvon polttoaineet löytyvät vasentaavasti vasemmasta alakulmasta. Ongelmat voivat liittyä esimerkiksi kattilassa esiintyviin haittailmiöihin, kuten likaantumiseen, kuonaantumiseen, korroosioon ja tuhkan sulamiseen. Haasteet voivat liittyä myös polttoaineen syötettävyyteen, hygieniaan tai päästöihin.



Kuva 13.5. Polttoaineiden haastavuus kattilasuunnittelun kannalta. Kuva muokattu Amec Foster Wheelerin kuvasta. Haastavuusasteikko on suhteellinen ja mukautettu tilan mukaan.

Haasteellisempia polttoaineita ovat erilaiset jätoperäiset materiaalit. Ongelmat ovat pääosin lähtöisin korkeista kloori- ja alkalipitoisuuksista, mutta myös raskasmetalleista. Poltossa muodostuvat alkalikloridit lisäävät riskiä tulistinputkien kuumakorroosioon erityisesti silloin, kun höyryn tulistuslämpötila on yli 450–480 °C. Lisäksi jätepolttoaineista muodostuvat sinkki- ja lyijy-yhdisteet aiheuttavat korroosiota myös tätä alemmissa lämpötiloissa (noin 350–400 °C), jolloin myös höyrystinputket (tulipesän paneliseinät) ovat alttiina korroosiolle. Tästä syystä jätettä pääpolttoaineena käyttävissä kattiloissa painetaso (ja siten myös keittopintojen metallilämpötila) on alempi kuin tavanomaisia polttoaineita käytettäessä. Jätepolttoaineet voivat sisältää myös bromia, jolla on havaittu klooria vastaava – tai mahdollisesti jopa merkittävämpi – haittavaikutus (Vainikka 2011), mutta bromipitoisuudet ovat usein lähes merkityksettömät klooripitoisuuksiin verrattuna. Jätepolttoaineissa voi olla myös metallista alumiinia, joka voi aiheuttaa likaantumista ja ääritapauksessa jopa koko kattilan tukkeutumisen. Raskasmetallit voivat aiheuttaa ongelmia päästöjen ja tuhkien loppukäytön osalta. Lisäksi jätoperäisten materiaalien käsittely ja syöttö on usein haasteellista ja niiden käyttöön liittyy aina terveys-, haju- ja hygieniariskejä.

Käsittelemättömän yhdyskuntajätteen (MSW) käyttöä rajoittaa palakoko ja palamattomien vieraskappaleiden (lasi, keramiikka, metallit yms.) suuri määrä, minkä vuoksi yhdyskuntajäte soveltuu sellaisenaan vain arinakattiloihin. Syntypaikkalajittelemattomasta jätteestä voidaan valmistaa palakooltaan myös esimerkiksi leijupetikattiloihin sopivaa ja vähemmän vieraskappaleita sisältävää kierrätyspolttoainetta (RDF). Leijupetikattiloissa on kuitenkin tärkeää varmistaa ylisuurten kappaleiden tehokas poisto pedistä. Muilta osin haasteet kattilalle ovat samaa luokkaa kuin yhdyskuntajätteellä.

Myös monenlaiset kuluttajalähtöiset pakkausjätteet (PDF) ovat haastavia polttoaineita, kuten myös syntypaikkalajittelusta jätteestä valmistetut polttoaineet (REF tai SRF). Ongelmat ovat lähtöisin samoista syistä kuin RDF:llä, mutta ovat lievempiä esilajittelun vuoksi. Jätoperäisillä polttoaineilla pätee trendi, jonka mukaan ongelmallisimpia ovat kuluttajalähtöiset jätteet, sitten kaupalliset ja vähiten ongelmia aiheuttavat

teollisuuden jätteet. Teollisuuden ja kaupan jätteet ovat usein huomattavan paljon tasalaatuisempia ja sisältävät vähemmän vieraskappaleita ja haitallisia aineita, kuten klooria.

Purkupuu, lastulevy ja vaneritähde ovat joissain tapauksissa haasteellisia polttoaineita. Vanerinsyrjä sisältää runsaasti liimoista peräisin olevaa natriumia ja sen on havaittu aiheuttavan leijupetikattiloissa vakavaa pedin agglomeraatiota, mikäli sitä poltetaan ilman suojaavaa polttoainetta tai erityistä agglomeraatiota estävää petihiekkaa (esim. Silvennoinen 2002 & 2003). Purkupuu voi sisältää betonia, nauvoja sekä myrkyllisiä aineita esimerkiksi maaleista, lakoista ja kyllästeistä. Kyllästetyssä puussa arseeni-, kromi- ja kuparipitoisuudet ovat korkeat. Siksi käytöstä poistetulle puulle on kehitetty oma laatuluokittelu (ks. luku 4.9, Alakangas 2014).

Myös metsähakkeiden poltto voi olla haasteellista, mikäli voimalaituskattiloissa poltetaan pelkästään puupolttoaineita tai mikäli niiden osuus on erittäin suuri. Näin on erityisesti, jos kattila ei ole suunniteltu suurille metsähakeosuuksille. Tällöin riskinä on tulistimien likaantuminen ja kuumakorrosio. Ongelmat aiheutuvat puun sisältämistä kloorista ja alkaleista (käytännössä kalium). Vaikka kalium- ja erityisesti klooripitoisuudet ovat metsähakkeessa verrattain alhaiset, aiheutuu näistä ongelmia, sillä puusta puuttuu esimerkiksi turpeesta ja kivihiilestä löytyviä kattilaa suojaavia yhdisteitä. Mikäli seospolttoaineena käytetään kivihiiltä tai turvetta, ongelmat poistuvat usein kokonaan. Seospoltosta on kerrottu tarkemmin luvussa 13.3. Polton kannalta on eduksi, jos havupuiden neulaset irtoavat ennen polttoa, jolloin erityisesti kloori- ja kaliumipitoisuudet laskevat merkittävästi viherainesta sisältävään puubiomassaan verrattuna. Tämä perustuu siihen, että alkali- ja klooripitoisuudet ovat korkeammat neulasissa.

Olki on joiltain osin samankaltainen polttoaine kuin puu: sen pääalkuainekoostumus (C, H, N) ja kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo ovat lähellä puuta ja molemmat sisältävät paljon haihtuvia yhdisteitä. Oljen alhaisempi energiatiheys ja erityisesti korkeampi tuhkan määrä ja ominaisuudet tekevät siitä kuitenkin puupolttoaineita huomattavasti haastavamman polttoaineen. Oljet sisältävät paljon likaantumista aiheuttavia alkaleita ja korrosio-ongelmia aiheuttavaa klooria, ja lisäksi niiden tuhkien sulamispisteet ovat alhaiset. Leijupoltossa pedin agglomeraatio on erityisen voimakasta käytettäessä olkea eikä se siten sovi ainoaksi polttoaineeksi leijupetikattiloihin. Kemiallinen koostumus ja siten myös poltto-ominaisuudet vaihtelevat luonnollisesti eri kasvilajien välillä. Lisäksi kasvuolosuhteet (lannoitus, maaperä, sääolosuhteet) vaikuttavat kasviperäisiin peltobiomassojen koostumukseen. Korjuuajankohdalla voidaan vaikuttaa merkittävästi oljen haitallisten yhdisteiden pitoisuuksiin. Esimerkiksi myöhään korjatun oljen (harmaa olki) klooripitoisuus voi sateen vaikutuksesta olla useita kertoja alhaisempi kuin aikaisin korjatun oljen (keltainen olki) (ks. luku 7).

Muovit olisivat periaatteessa hyviä polttoaineita korkean lämpöarvonsa vuoksi, mutta ongelmana on PVC-muovin riski (ks. luku 8.2). Puhtaassa PVC-muovissa on peräti 57 p-% klooria. Mikäli muovit ovat puhtaita eivätkä ne sisällä lainkaan PVC:tä, ei niiden poltossa tavallisesti esiinny merkittäviä ongelmia.

Kivihiilen tai suomalaisen turpeen poltossa ei yleensä esiinny ongelmia.

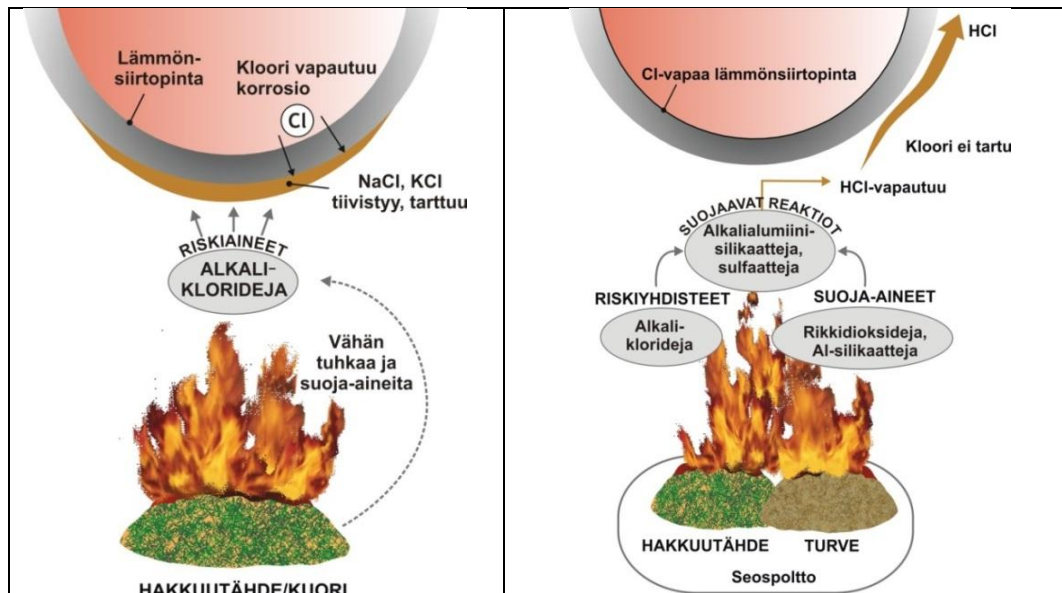
13.3 Biopolttoaineiden ja turpeen/kivihiilen seospoltto

Biopolttoaineiden asettamat haasteet voimalaituskattiloille ovat siis pääosin peräisin kloorista ja alkaleista. Poltossa näistä muodostuu korrosiivisia ja likaavia alkaliklorideja ja lisäksi alkalit reagoivat leijupetipoltossa petimateriaalin kanssa aiheuttaen petijyvästen kasvua ja yhteenliimautumista. Seospoltto ns. suojaolttoaineiden kanssa on kustannustehokas tapa välttää edellä kuvattuja ongelmia.

Seospoltolla tarkoitetaan useamman polttoaineen samanaikaista polttoa kattilassa. Kattilatyypin vaikuttaa merkittävästi seospolttomahdollisuuksiin. Kerrosleiju(BFB)- ja erityisesti kiertoleiju(CFB)kattilat voivat hyödyntää joustavasti erilaisia polttoaineita, kun taas arina- ja etenkin pölypolttolaitokset asettavat selvästi tiukemmat ehdot seospoltolle.

Suojaolttoaineet sisältävät nimensä mukaisesti yhdisteitä, jotka suojaavat kattilaa vaurioilta tai häiriöiltä. Tärkeimmät suoja-aineet ovat rikki ja alumiinisiliikaatit, jotka kykenevät muuttamaan alkalikloridit vaaratomaan muotoon sekä sitomaan alkaleita. Kivihiili ja turve ovat esimerkkejä yleisimmistä suojaolttoaineista. Myös joillakin lietteillä, kuten yhdyskunta- ja kuitulietteillä, on havaittu vastaava suojaava vaikutus. Suomessa lähes kaikissa voimalaitoskokoaluokan leijupetikattiloissa on käytössä seospoltto – tavallisimmin poltetaan turvetta ja erilaisia puupolttoaineita.

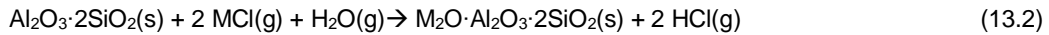
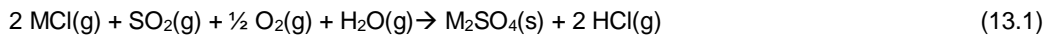
Kuvassa 13.6 on havainnollistettu seospolton vaikutusta tulistinputkien likaantumiseen ja korroosioon. Pelkkää biopolttoainetta käytettäessä poltossa muodostuneet, höyryfaasissa olevat alkalikloridit tiivistyvät savukaasuja viileämmille tulistinputkipinnoille aiheuttaen likaantumista edistävän ja korrosiivisen kerrostuman. Kun sekaan lisätään turvetta (tai kivihiiltä), alkalikloridit muuntuvat suoja-aineiden vaikutuksesta alkalisulfaateiksi ja alkalialumiinisilikaateiksi, jolloin kloori vapautuu vetykloridina (HCl, suolahappo) ja poistuu savukaasujen mukana aiheuttamatta tulistinkorroosiota.



Kuva 13.6. Yksinkertaistettu kuvaus tapahtumista tulipesässä, jos polttoaineseos ei sisällä tarpeeksi suoja-aineita estämään kloorin kerrostumista (vasen) ja jos toinen polttoaine seospoltossa luovuttaa näitä kloorin kerrostumista estäviä suoja-aineita (oikea). Lähde: Aho et al. 2008. Kuva: VTT.

Suojamekanismit on esitetty reaktioyhtälöissä 13.1 ja 13.2, joista ensin mainittu kuvaa rikin ja jälkimmäinen erään alumiinisilikaatin vaikutusta. Jotta rikin reaktio alkalikloridien kanssa on riittävän nopea, on rikin muodostettava ensin rikkitrioksidia (SO_3). Poltossa pääosa rikistä muodostaa rikkidioksidia (SO_2) ja vain pieni osa hapettuu edelleen rikkitrioksidiksi, joka voi reagoida edelleen alkalikloridien kanssa. Turpeen tapauksessa suojaava vaikutus perustuu pääasiassa reaktioon 13.1. Kivihiilellä kummallakin reaktiolla on tyypillisesti merkittävä vaikutus. Yleisesti ottaen kivihiilen suojavaikutus on turvetta parempi, jolloin haasteellisen polttoaineen osuus voidaan nostaa korkeammaksi kuin turvetta käytettäessä. Kivihiili soveltuu tavallisesti kuitenkin huonosti kerrosleijukattiloiden polttoaineeksi. Kerrosleijukattilat soveltuvat parhaiten kosteille ja paljon haihtuvia aineita sisältäville polttoaineille (puu, turve, lietteet). Esimerkiksi puuta, turvetta ja kivihiiltä käyttävä kiertoleijukattila voidaan suunnitella toimimaan tarvittaessa millä tahansa seossuhteella mukaan lukien 100 % kivihiili. Tutkimustuloksia eri polttoaineiden suojavaikutuksista löytyy mm. lähteistä Aho 2001, Aho & Silvennoinen 2004, Aho & Ferrer 2005, Aho et al. 2015 ja Yrjas et al. 2005.

Seospolton lisäksi rikkipitoiset suoja-aineet voidaan tuoda kattilaan esimerkiksi alkuainerikin (Hedman et al. 2012) tai erilaisten sulfaattiliuosten muodossa (Aho et al. 2008, Roppo 2012, Henderson et al. 2006). Alumiinisilikaatteja on kokeiltu paperinvalmistuksen täyteaineenakin käytetyn kaoliinin muodossa (Öhman & Nordin 2000). Em. kemikaalien käyttö voimalaitoksissa on toistaiseksi kuitenkin ollut melko vähäistä. Esimerkkinä kaoliinin kaupallisesta käytöstä voidaan mainita Puolassa sijaitseva Polaniecin 100 % biomassaa käyttävä CFB-laitos, jossa 20 % polttoaineesta on olkea, auringonkukan tähdettä ja muita pelto-biomassoja.



jossa M = kalium (K) tai natrium (Na).

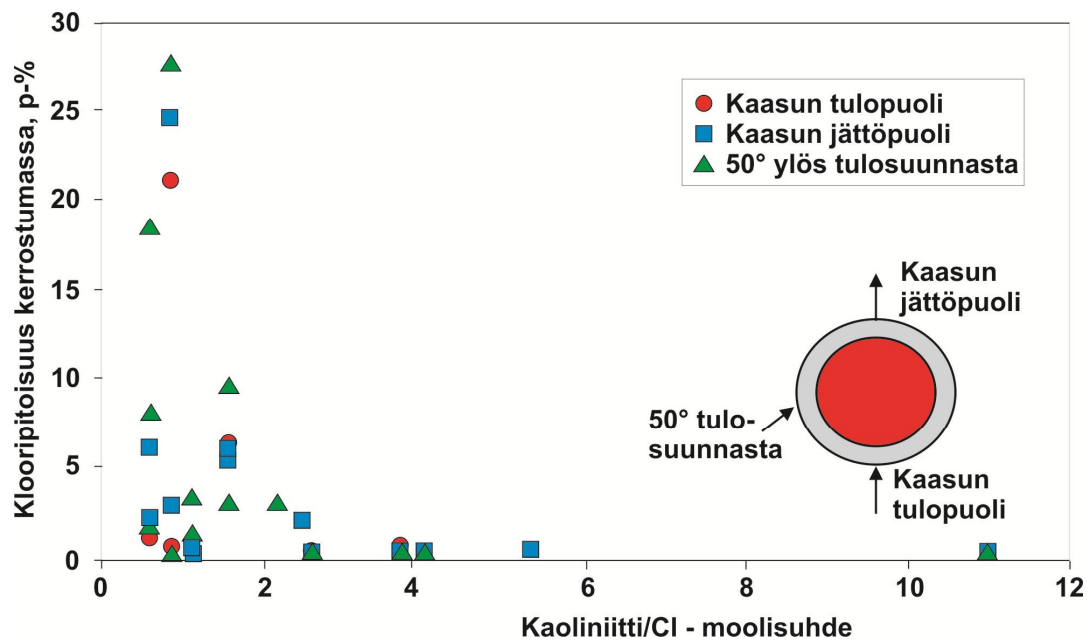
Biopolttoaineiden ja turpeen (tai kivihiilen) seospoltolla on muitakin etuja. Vaikka esimerkissä käsiteltiin vain tulistinaluetta, vähentävät suoja-aineet samanaikaisesti myös petijyvästen kasvua ja yhteenliimautumisriskiä sekä pienhiukkaspäästöjä sitomalla alkaleita. Lisäksi biopolttoaineiden alkali- ja maa-alkalipitoinen (lähinnä K ja Ca) tuhka auttaa vähentämään turpeen ja kivihiilen polton korkeita SO_2 -päästöjä. Seospoltossa hyödynnetään siis synergioita eri polttoainelaatujen välillä. Merkittävin seospolton heikkous on mahdolliset muutokset tuhkan hyötykäyttömahdollisuuksissa.

Polttoaineiden ja polttoaineseosten tulistimien kuumakorroosioriskitasoja on mahdollista arvioida karkeasti polttoaineanalyyysien avulla. Oleellisia määritettäviä alkuaineita ovat alkalit (natrium ja kalium), kalsium, rikki ja kloori. Alumiinisilikaattien määrä voidaan analysoida röntgendiffraktiolla (XRD) tai niiden pitoisuus voidaan arvioida karkeasti myös tuhkan koostumuksen perusteella huomioimalla mahdollisten ei-aktiivisten alumiinisilikaattien määrä. Polttoaineiden kemiallisella fraktioinnilla voidaan selvittää tuhkaa muodostavien alkuaineiden sitoutumista ja siten mm. niiden höyrystymisherkkyttä ja reaktiivisuutta, jolloin polttoaineiden ominaisuuksista saadaan tarkempi kuva (Zevenhoven et al. 2010 & 2012, Aho et al. 2015, Alakangas et al. 2011). Kemiallisessa fraktioanalyysissä polttoaineen sisältämät yhdisteet jaetaan useaan eri fraktioon uuttamalla polttoaineet käyttäen eri liuottimia aloittaen heikoimmasta.

Tulistinputkien korroosioriskiä turpeen ja puun seospoltossa voi arvioida seoksen molaarisella S/Cl-suhteella. Tarkkaa lukua vaadittavalle suhteelle on mahdotonta antaa, mutta se voidaan arvioida olevan luokkaa 4–5, mikä tarkoittaa noin 15–35 % turveosuutta polttoainelaaduista riippuen (Aho et al. 2015). On kuitenkin huomattava, että kyseessä on yksinkertaistus ja esimerkiksi korkeat kalsiumpitoisuudet voivat heikentää rikin suojaavaa vaikutusta ja siten nostaa vaadittavaa S/Cl-suhdetta.

Kuvassa 13.7 on esimerkki polttoaineseoksen kaoliniitin (yleisin kivihiilen sisältämä alumiinisilikaatti) ja kloorin moolisuhteen vaikutuksesta kuumakorroosioriskitasoon kivihiilen ja RDF:n seospoltossa (Ferrer et al. 2005). Tulokset perustuvat pilotluokan (100 kW_{pa} ja 4 MW_{pa}) kiertoleijukoelaitteilla saatuihin tuloksiin. Kokeissa tutkittiin kahta erityyppistä hiiltä. Korroosioriskin indikaattorina on tulistinputkia simuloiville holkeille kerättyjen kerrostumien klooripitoisuus. Kun kaoliniitti/kloori-moolisuhde oli yli 3, klooria ei enää käytännössä kerrostunut, jolloin myös kuumakorroosioriski poistui.

Biopolttoainekattiloiden valmistajat ilmoittavat yleensä korkeimman sallitun reaktiivisen eli liukenevan kaliumin ja natriumin yhteenlasketun pitoisuuden ($\Sigma\text{K}+\text{Na}$) polttoaineen kuiva-aineessa. Kun tämä summa ylittää 0,3 p-% (3 000 mg/kg), aiheutuu tästä yleensä ongelmia, ellei tätä ole huomioitu kattilan suunnittelussa (Alakangas et al. 2011).



Kuva 13.7. Tulistinputkia simuloiville holkeille kerrostuneen kloorimäärän riippuvuus kaoliniitti/kloorimoolisuhteesta kivihiilen ja RDF:n seospolton pilotkokeissa. Kaoliniitti sitoo alkalin ja estää kloorin kuljetuksen testiholkille (Ferrer et al. 2005, muokattu).

13.4 Kiinteiden polttoaineiden laatuvaatimukset eri käyttäjäryhmille

Taulukossa 13.1 on koottu kiinteiden polttoaineiden laatuvaatimuksia eri käyttäjäryhmille ja eri teknologioille. Taulukkoon on valittu ne teknologiat, jotka ovat Suomessa käytössä. Ominaisuuksien merkitystä on käsitelty luvussa 13 sekä kunkin polttoaineen omissa luvuissaan tarkemmin. Taulukoissa 13.2 ja 13.3 on eri polttoaineiden keskeisten ominaisuuksien vertailu.

Taulukko 13.1. Kiinteiden polttoaineiden keskeiset laatuvaatimukset eri käyttäjäryhmille eri tekniikoilla.

Käyttäjäryhmä	Polttoaine	Käytetty teknologia	Polttoaineen tärkeimmät laatuvaatimukset
Kotitaloudet (< 50 kW)	Puupelletit	Pellettikattilat ja -takat	Hyvä mekaaninen kestävyys (97,5 p-%) ja alhainen tuhkapitoisuus (< 0,7 p-%)
	Polttopuu, puubriketit	Tulisijat Halkokattilat	Alhainen tuhkapitoisuus (< 0,7 p-%) briketeille ja alhainen kosteus 15–20 p-% polttopuulle
	Karsittu rankahake	Stokerikattilat	Alhainen kosteus < 35 p-% ja homogeeninen palakoko, 30–45 mm
Maatilat, isot kiinteistöt (< 1 MW)	Kokopuu- tai rankahake, palaturve	Stokerikattilat Arinapoltto	Alhainen kosteus < 35 p-% ja homogeeninen palakoko, 30–45 mm
	Olkipaalit	Arinapoltto, myös kokonaiset paalit	Tasalaatuiset paalit, alhainen kosteus < 18 p-%
	Puupelletit	Pelletti- ja stokerikattilat	Hyvä mekaaninen kestävyys (97,5 p-%) ja alhainen tuhkapitoisuus (< 0,7 p-%)
Kaukolämpölaitokset (< 5 MW _{th}) tai pienet CHP-laitokset	Metsätähde- tai kokopuu- tai palaturve	Arinapoltto Leijupoltto	Kosteus < 40 p-% arina- ja leijupoltoon
	Erittäin hyvät, puhtaat polttoaineet	Myötävirtakaasutus (< 2 MW)	Kosteus < 25 p-%, palakoko 10–100 mm, tuhkapitoisuus < 1 p-%, korkea tuhkan sulalämpötila, suuri irtotiheys > 200 kg/m ³
Lämpö- ja CHP-laitokset (5–10 MW)	Metsätähde-, kokopuu- tai rankahake	Arinapoltto (Leijukerrospoltto)	Kosteus < 50 p-%, (alkalit ja kloori)
	Suhteellisen laaja polttoainepohja	Vastavirtakaasutus (< 10 MW)	Palakoko 10–100 mm, kosteus < 50 %
	Puu- ja olkipelletit	Stokeripoltto, pölypoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Olki- tai mm. peltobiomassa-paalit	Arinapoltto (Leijukerrospoltto)	Isot paalit, kosteus < 20 p-%, Tuhkan sulamisominaisuudet ja korkeat alkali- ja klooripitoisuudet huomioitava kattilasunnittelussa.
Lämpö- ja CHP-laitokset (10–50 MW)	Metsätähdehake, kantomurske, sahanpuru, kuori, jyrshinturve ja peltobiomassat	Leijupoltto	Kosteus 40–60 p-%. Selvitettävä alkuainepitoisuudet erityisesti alkali ja kloori. Seospoltossa polttoaineseoksen ominaisuudet ratkaisevat, ei yksittäisten polttoaineiden.
	Kierrätyspuu (C-laatu)	Leijupoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Joustava polttoaineiden suhteen: myös vaikeat biomassat ja jätepolttaineet	Kupliva/kiertoleijukaasutus (20–100 MW)	Palakoko < 30–50 mm, kosteus < 50 p-%. Kaasun puhdistustarve määräytyy polttoaineen epäpuhtauksien ja kattilatyyppin mukaisesti.
Voima- ja CHP-laitokset (> 50 MW)	Metsätähde- ja rankahake, kantomurske, sahanpuru, kuori, kierrätyspolttoaineet, jyrshinturve, lietteet	Leijupoltto	Kosteus < 50 p-%. Selvitettävä alkuainepitoisuudet erityisesti kloori, alkali, raskasmetallit (jätepolttaineet), tuhka. Seospoltossa polttoaineseoksen ominaisuudet ratkaisevat, ei yksittäisten polttoaineiden.
	Yhdyskuntajäte (MSW)	Arinapoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Kivihili, puupelletit, sahanpuru	Pölypoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
	Kierrätyspuu	Leijupoltto	Kattilakohtaiset laatuvaatimukset
Joustava polttoaineiden suhteen: myös vaikeat biomassat ja jätepolttaineet	Kupliva/kiertoleijukaasutus (20–100 MW)	Palakoko < 30–50 mm, kosteus < 50 p-%. Kaasun puhdistustarve määräytyy polttoaineen epäpuhtauksien ja kattilatyyppin mukaisesti.	
Teollisuuden prosessiuunit (mm. meesauuni)	Metsätähde- ja rankahake, kantomurske, sahanpuru, kuori	Kiertoleijukaasutus (20–100 MW)	Palakoko < 30–50 mm, kuivattava < 15 p-%. Selvitettävä tuhkan alkuainepitoisuudet (kuorma uunille rajoittaa)

Taulukko 13.2. Polttoaineiden tuhkapitoisuuden, lämpöarvon, kosteuden ja irtotiheyden vertailu.

Polttoaine	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo $q_{p,net,d}$, MJ/kg	Kosteus M_{ar} , p-%	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa $q_{p,net,ar}$, MJ/kg	Irtotiheys BD, kg/irto- m^3	Energiatiheys E_{ar} , MWh/irto- m^3	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa A_d , p-%
Kivihilli	27,0–28,8	8–14	24,3–25,1	-	-	4,4–17,0
Raskas polttoöljy	40,5–41,5	< 0,1	40,5–41,5	985–1 020	-	0,02–0,05
Kevyt polttoöljy	35,2–35,9 MJ/litra	0,01–0,02	35,2–35,9 MJ/litra	820–840	-	< 0,001
Pyrolyysiöljy	18,4–20,1	20–30	13,0–18,0	1100–1300		0,01–0,1
Jyrsinturve (keskiarvo)	20,6	47	9,8	330	0,91	6,3
Palaturve (keskiarvo)	21,3	35	11,9	385	1,30	3,5
Turvellit	19,7–21,0	14–18	15,1–18,7	680–750	3,0–3,7	2,0–6,0
Sahanpuru	19,0–19,2	45–60	2,2–10,0	250–350	0,45–0,70	0,4–0,5
Koivunkuori	21,0–23,0	45–55	8,0–11,0	300–400	0,60–0,90	1,0–3,0
Havupuun kuori	18,5–20,0	50–65	5,0–9,0	250–350	0,50–0,70	1,0–3,0
Vanerimurske	19,0–19,2	5–15	16,0–18,0	200–300	0,9–1,1	0,4–0,8
Puupelletit	18,9–19,5	6–9	7,0–18,2	600–650	2,8–3,3	0,1–0,5
Rankahake	18,5–20,0	40–55	7,0–11,0	250–350	0,7–0,9	0,5–2,0
Polttopuu	18,5–19,0	20–25	13,4–14,5	240–320	1,35–1,70 MWh/pino- m^3	0,5–1,2
Hakkuutähdehake	18,5–20,0	50–60	6,0–9,0	250–400	0,7–0,9	1,0–3,0
Kokopuuhake	18,5–20,0	45–55	7,0–10,0	250–350	0,7–0,9	1,0–2,0
Kantomurske	17,2–20,9	12–45	6,8–15,5	250–300	0,7–1,2	0,5–20,0 (keskimäärin 4,0)
Pajuhake	18,6	51–53	8,1–8,5	300–440	0,3–0,4	0,4–1,1
Ruokohelpi (kevätkorj.)	17,3–18,7	10–25	12,6–16,6	60–80	0,3	1,0–8,0
Energiajyvä	17,3	11	15,5	600	2,6	2,0
Olki, silputtu	17,4	17–25	12,4–14,0	80	0,3–0,4	5,0
Kierrätyspolttoaine, SRF	17,0–37,0	15–35	13,0–35,0	150–250	0,7–1,0	3,0–7,0
Kotitalouden kuivajäte	18,5–23,4	25–36	11,7–16,9	150–200	0,7–1,0	5,3–16,1

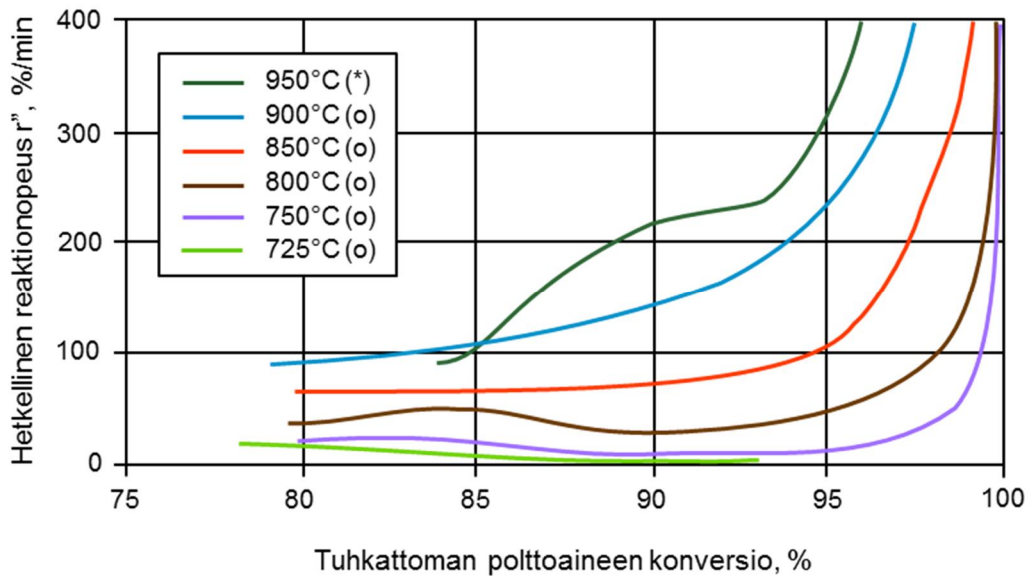
Taulukko 13.3. Polttoaineiden kemiallisten ominaisuuksien vertailu (p-% kuiva-aineessa).

Polttoaine	Hiili, C	Vety, H	Rikki, S	Typpi, N	Kloori, Cl	Natrium, Na	Kalium, K
Kivihilli	66–74	3,5–5,0	< 0,7	1,2–2,1	< 0,005	< 0,010	< 0,003
Raskas polttoöljy	88,4	10,1	0,8–0,95	0,3–0,4	-	< 0,0004	-
Kevyt polttoöljy	86,2	13,7	0,1	0,01–0,03	-	-	-
Pyrolyysiöljy	50–60	7,0–8,0	< 0,05	< 0,4	0,07	< 0,008	< 0,001
Polttoturve	52–56	5,0–6,5	0,05–0,3	1,0–3,0	0,02–0,06	0,007	0,02
Sahanpuru	48–52	6,2–6,4	< 0,05	0,3–0,4	0,01–0,03	0,001–0,005	0,02–0,15
Kuori	48–52	6,2–6,8	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,05	0,007–0,020	0,1–0,5
Vanerimurske	48–52	6,2–6,4	< 0,05	0,1–0,5	< 0,05	0,25–0,50	0,7
Puupelletit	49–50	6,0–6,1	< 0,007	< 0,16	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Polttopuu	48–52	6,0–6,5	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Rankahake	48–52	5,4–6,0	< 0,06	0,3–0,5	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Hakkuutähdehake	48–52	6,0–6,2	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,04	0,075–0,0300	0,1–0,4
Kokopuuhake	48–52	5,0–6,0	< 0,05	0,3–0,5	0,01–0,03	0,001–0,002	0,02–0,15
Kantomurske	47–54	5,6–6,5	< 0,05*	0,1–1,1*	ei saatavilla	ei saatavilla	ei saatavilla
Pajuhake	47–48	6,1	< 0,025	0,2	< 0,04	< 0,005	0,2
Ruokohelpi (kevätkorjattu)	45–50	5,4–6,2	0,04–0,17	0,3–2,0	0,01–0,09	< 0,002–0,04	< 0,08–0,6
Energiajyvä	45	6,5	0,14	2,0	0,04	0,002–0,005	0,4–1,0
Olki, silputtu	45–47	5,8–6,0	0,01–0,13	0,4–0,6	0,14–0,97	0,01–0,6	0,69–1,30
Kierrätyspolttoaine (SRF)	45–56	5–9	0,05–0,20	0,2–0,9	0,1–0,9	0,001–0,005	0,001–0,002
Kotitalouden kuivajäte	47,1–53,5	6,1–7,2	0,08–0,22	0,67–1,07	0,2–1,5	0,001–0,005	0,001–0,004

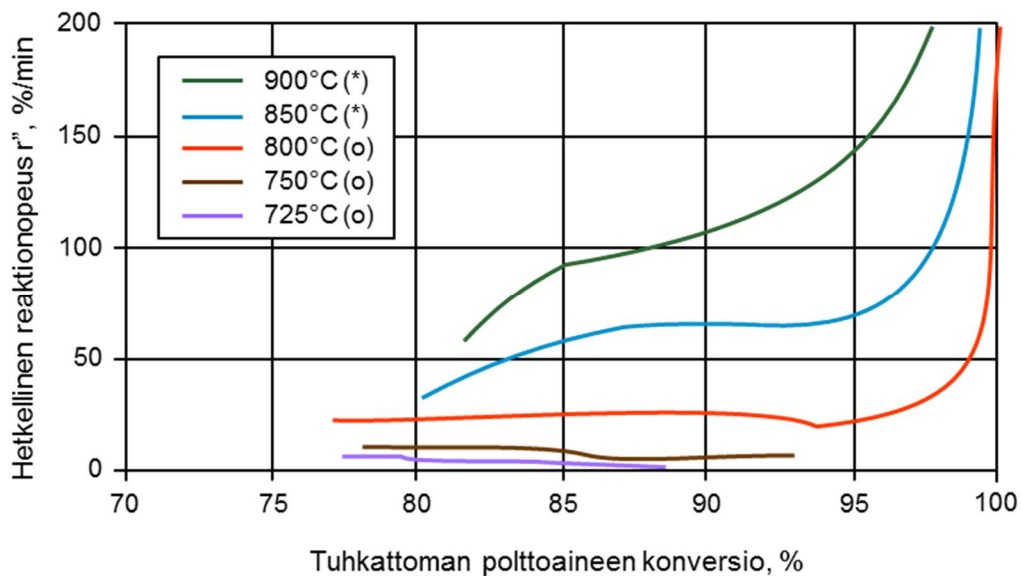
* maa-aines nostaa tasoa.

13.5 Polttoaineen reaktiivisuuden vaikutus kaasutukseen

VTT on tutkinut lukuisten eri biomassojen reaktiivisuutta kaasutusta varten (Moilanen 2006, Kurkela et al. 2006, Nasrullah 2009, Nasrullah & Moilanen 2009, Moilanen et al. 2009, Moilanen & Nasrullah 2011, Kurkela et al. 2014, Kurkela 2015) ja tulokset vaihtelevat suuresti. Biomassan alkuaineanalyysi, tuhkan koostumus tai sen sulamiskäyttäytyminen eivät yksistään riitä sen arvioimiseen, kuinka kyseinen biomassa on kaasutettavissa. Eri kaasutusolosuhteiden – lämpötilan, paineen ja kaasukehän – vaikutusta biomassan reaktiivisuuteen ja tuhkan sintraantumiseen on tutkittu järjestelmällisesti kuusen kuorella, joka on Suomessa yleinen biomassa. Näitä tuloksia esitetään kuvissa 13.8–13.11 (Nasrullah 2009). Sintraantumisaste ilmoitetaan tähtinä (VTT:n menetelmä, Moilanen 2006) luvussa 2.9 kuvatulla menetelmällä.

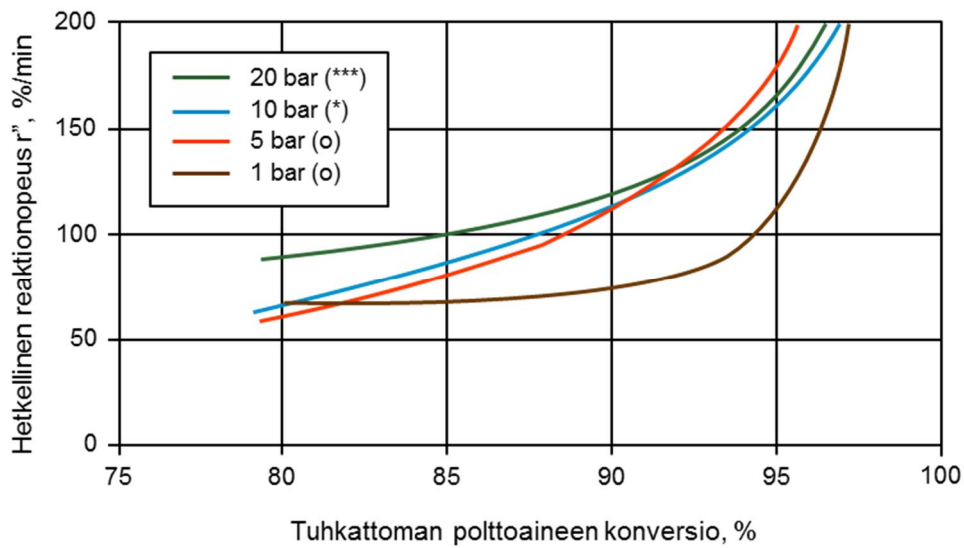


Kuva 13.8. Lämpötilan vaikutus kuusen kuoren reaktiivisuuteen 100 % vesihöyrykaasutuksessa (1 bar).
Kuva: VTT.



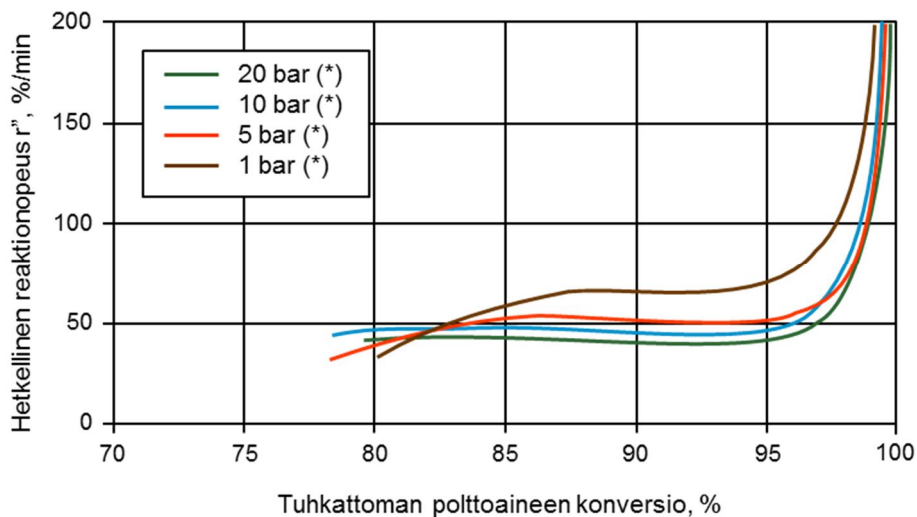
Kuva 13.9. Lämpötilan vaikutus kuusen kuoren reaktiivisuuteen 100 % CO₂-kaasutuksessa (1 bar).
Kuva: VTT.

Kaasutuslämpötilan kasvaessa myös biomassan reaktiivisuus kasvaa. Hiilen (char) konversio on parempi korkeammassa lämpötilassa kuin alhaisemmassa. Tuhkan sintraantuminen on jo mahdollista korkeammassa lämpötilassa, mutta kuusen kuorella sitä tapahtui vesihöyrykaasutuksessa heikosti vasta 950 °C:ssa ja CO₂-kaasutuksessa 850–900 °C:ssa.



Kuva 13.10. Paineen vaikutus kuusen kuoren reaktiivisuuteen 100 % vesihöyrykaasutuksessa (850 °C).
Kuva: VTT.

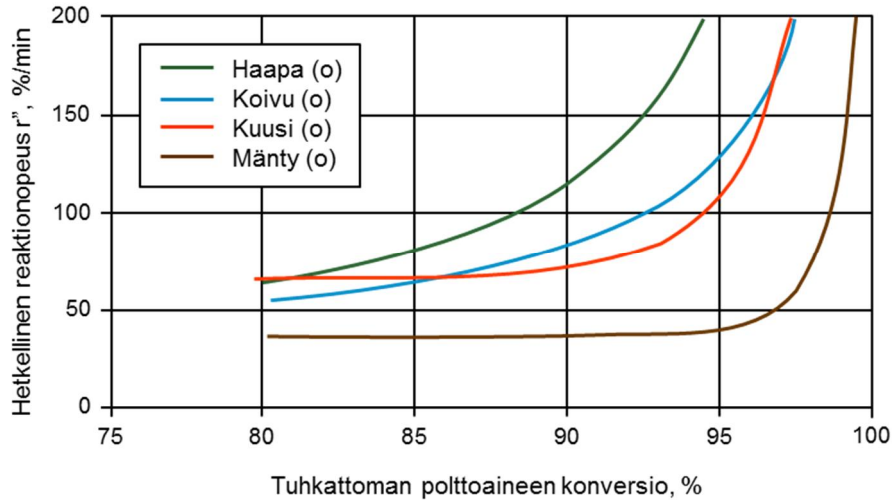
Kuvassa 13.10 on esitetty paineen vaikutus kuusen kuoren reaktiivisuuteen vesihöyrykaasutuksessa. Paineen vaikutus reaktiivisuuteen ei ole niin yksiselitteinen kuin lämpötilan vaikutus. Kuusen kuorella paineen nosto ilmanpaineesta 5 bar:iin nostaa reaktiivisuutta, mutta kun painetta nostetaan tästä edelleen, ei reaktiivisuus enää kasva, vaan jopa pienenee. Biomassan kaasutuksessa tuhkan alkalimetallit katalysoivat kaasutusta ja paine ja kaasukehä vaikuttavat voimakkaasti myös tuhkan käyttäytymiseen. Vesihöyrykaasutuksessa tuhka sintraantuu voimakkaammin korkeammassa paineessa.



Kuva 13.11. Paineen vaikutus kuusen kuoren reaktiivisuuteen 100 % CO₂-kaasutuksessa (850 °C).
Kuva: VTT.

Kuvassa 13.11 on vastaavat tulokset kuusen kuorelle CO₂-kaasutuksessa, jossa prosessipaineen nostaminen alentaa reaktiivisuutta. Tuhkan osittaista sintraantumista oli nähtävissä kaikilla painetasoilla eikä

paineen nostamisella ollut siihen yhtä merkittävää vaikutusta kuin vesihöyrykaasutuksessa. Tämä johtuu juuri siitä, että polttoaineen reaktiivisuus pieni prosessipaineen kasvaessa.

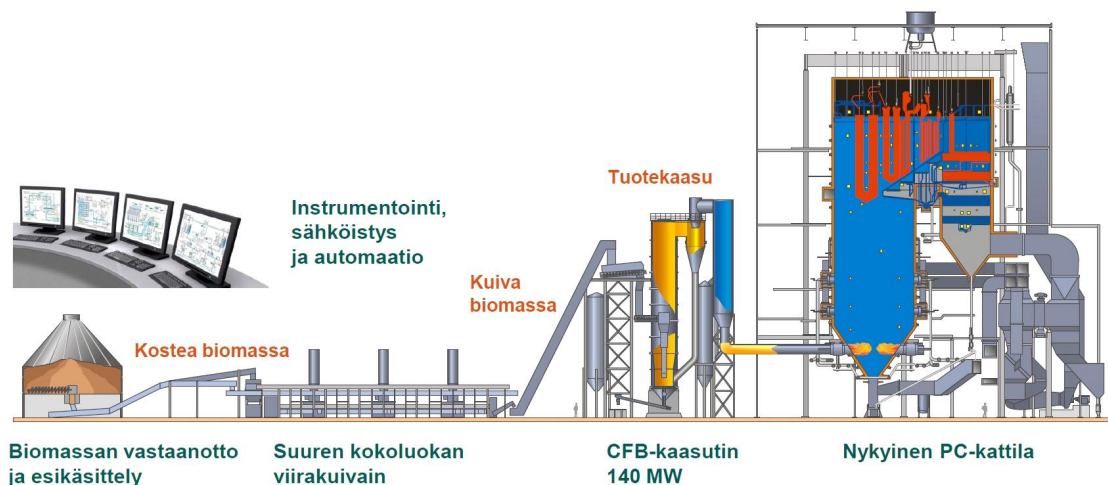


Kuva 13.12. Eri kuorien reaktiivisuus referenssioloissa: 1 bar, 850 °C ja 100 % vesihöyrykaasutus. Kuva: VTT.

Esimerkki itse puulajin vaikutuksesta reaktiivisuuteen on esitetty kuvassa 13.12, jossa näkyy haavan, koivun, kuusen ja männyn kuoren tulokset ns. perusolosuhteissa (1 bar, 850 °C ja 100 % vesihöyry). Haavan kuori on näistä reaktiivisin, seuraavaksi reaktiivisin on koivun kuori, sitten kuusen ja männyn kuori. Jäännöstuhkissa ei ollut sintraantumisen merkkejä.

Polttoaineen reaktiivisuudet vaihtelevat edellä esitettyjen tekijöiden lisäksi myös biomassan eri osien (esim. kuori ja neulas) kesken sekä sen kasvupaikasta ja varastoinnista riippuen. Näistä löytyy yksityiskohtaisempia tutkimustuloksia viitteistä Kurkela 2015, Moilanen et al. 2009 sekä Moilanen & Nasrullah 2011.

Kuvassa 13.13 on kaaviokuva Vaskiluodon Voiman 140 MW:n biomassan kaasutuslaitoksesta Vaasassa. Kaasutin on kytketty nykyiseen pölypolttokattilaan (PC-kattila).



Kuva 13.13. 140 MW:n biomassan kaasutuslaitos Vaasassa. Kuva: Valmet Oy.

Reaktiivisuusmääryksiä on tehty myös monille ulkomaisille biomassoille, joilla on korkea alkali- ja klooripitoisuus. Taulukoissa 13.4–13.8 on yhteenvetoja tutkittujen biomassojen analyyseistä sekä reaktiivisuuksista. Analyyseistä nähdään, että pohjoismaiset puubiomassat ovat puhtaita polttoaineita ja suurimmat erot ovatkin epäorgaanisen aineksen (haitta-aineiden) pitoisuuksissa. Ulkomaisten biomassojen nimet on vaapaasti suomennettu (Moilanen 2006, Kurkela et al. 2006).

Taulukko 13.4. Eurooppalaisten biomassojen analyysejä (Moilanen 2006, Kurkela et al. 2006).

Biomassa	Kuiva-aineessa, p-%								Kuiva-aineessa, mg/kg		
	Haihtuvat aineet	Kiinteä hiili	Tuhka	C	H	N	S	O (erotus)	Na*	K*	Cl*
Männyn puru	83,1	16,8	0,1	51,0	6,0	0,1	-	42,8			
Männyn kuori	73,0	25,3	1,7	52,5	5,7	0,4	0,03	39,7	30	2 100	85
Kuusen kuori	75,2	22,5	2,3	49,9	5,9	0,4	0,03	41,5	90	3 000	280
Metsätähde (mänty)	79,3	19,4	1,3	51,3	5,8	0,4	0,02	40,9			
Paju	79,9	18,9	1,2	49,4	6,1	0,4	0,03	42,9	40	4 060	40
Ohran olki	76,1	18,0	5,9	46,2	5,7	0,6	0,08	41,5			
Ruokohelpi	73,5	17,6	8,9	45,0	5,7	1,4	0,14	38,9			
Metsätähde (Ruotsi)	77,0	21,7	1,3	51,4	5,8	0,4	0,02	41,1	160	1 600	< 300
Kuoripelletti (Ruotsi)	74,5	22,3	3,2	53,2	6,0	0,5	0,04	37,1	290	2 400	< 300
Pajupelletti (Ruotsi)	80,1	18,6	1,4	50,0	6,1	0,5	0,03	42,0	70	2 500	< 200
Vehnän olki (Ruotsi)	72,7	16,0	11,3	43,8	5,5	0,8	0,10	38,5	620	7 400	1 100
Vehnän olki-95 (Tanska)	76,1	19,1	4,8	47,5	5,9	0,7	0,16	40,9	140	16 700	6 100
Vehnän olki-97 (Tanska)	74,0	18,0	8,0	46,1	5,7	1,7	0,2	38,3	860	19 400	4 360
Elefanttiheinä, <i>Miscanthus</i>	78,5	18,2	3,3	47,9	6,0	0,6	0,6	41,6			
Sokeriruoko, <i>Sweet sorghum</i>	77,2	18,1	4,7	47,3	5,8	0,4	0,1	41,7			
Oliivin puristustähde, <i>Alpeorajo</i> (Espanja)	75,3	17,2	7,5	52,0	6,3	1,3	0,16	32,7	250	22 500	2 600
Oliivipuu (Italia)	78,1	18,9	3,0	49,8	6,0	0,7	0,06	40,4	290	8 710	350
Viiniköynnös (Italia)	76,6	20,7	2,7	49,0	5,7	0,7	0,05	41,9	190	9 430	260
Valeakaasia, <i>Robinia</i> (Italia)	80,6	17,3	2,1	48,2	6,0	1,2	0,05	42,5	140	3 140	300

* Na-, K- ja Cl-määrytykset on tehty INAA-menetelmällä (Instrumental Neutron Activation Analysis).

Taulukko 13.5. Euroopan ulkopuolella kasvavien biomassojen analyysejä (Moilanen 2006, Kurkela et al. 2006).

Biomassa	Kuiva-aineessa, p-%								Kuiva-aineessa, mg/kg		
	Haihtuvat aineet	Kiinteä hiili	Tuhka	C	H	N	S	O (erotus)	Na*	K*	Cl*
Kaksivuotinen Aasiasa kasvava juuttia muistuttava kasvi, <i>Kenaf</i>	79,4	17,0	3,6	46,6	5,8	1,0	0,1	42,8			
Sinimailanen, <i>Alfalfa</i> (USA)	75,8	19,2	5,0	45,8	5,4	2,2	0,1	41,5	960	15 900	3 920
Palmun kuivat oksat, <i>palmoil dry sticks</i> (Intia)	77,3	19,3	3,4	47,5	5,6	0,3	0,04	43,2	280	7 900	7 500
Palmun kuitu, <i>Palmoil fibre</i> (Intia)	70,4	20,3	9,3	51,3	5,4	0,3	0,11	33,6	90	2 000	350
Kuiva palmun hedelmä, <i>Dry palmoil fruit</i> (Intia)	69,6	19,1	11,3	48,4	5,4	2,2	0,03	32,7	430	8 200	400
Kookoksen kuitutähde, <i>Coconut fibre</i> (Intia)	70,4	26,6	3,0	51,3	5,4	0,3	0,03	40,0	1 200	1 100	5 200
Kookospuun oksat, <i>Coconut twigs</i> (Intia)	75,5	19,2	5,3	46,0	5,5	0,1	0,03	43,1	4 800	7 600	16 000
Juuttijäte (Intia)	59,7	11,1	29,2	44,0	5,1	1,0	0,25	20,5	1 400	7 200	< 300

* Na-, K- ja Cl-määritykset on tehty INAA-menetelmällä (Instrumental Neutron Activation Analysis).

Taulukko 13.6. Eurooppalaisten biomassojen tuhkapitoisuus ja sen koostumus (tuhkaus 550 °C) (Moilanen 2006, Kurkela et al. 2006).

Biomassa	Tuhka, p-%	Tuhkan kemiallinen koostumus, p-%									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
Mäntypuru	0,1	8,3	2,0	1,8	41,8	11,8	12,3	0,3	0,12	1,9	5,2
Männyn kuori	1,7	1,3	5,3	0,3	40,6	4,5	7,6	0,5	0,12	2,1	4,8
Kuusen kuori	2,3	1,5	1,1	0,1	39,2	5,1	7,6	0,4	0	1,0	4,1
Metsätähde (mänty)	1,3	38,5	4,7	3,7	15,4	4,0	8,3	0,4	0,5	1,6	3,2
Paju	1,2	0,4	0,7	0,2	30,8	5,1	26,5	0,8	0,02	3,0	11,5
Ohran olki	5,9	62,0	0,2	0,2	4,5	2,2	19,3	0,5	0,02	1,4	2,5
Ruokohelpi	8,9	89,8	1,4	1,1	3,5	1,5	3,1	0,1	0,05	1,1	4,1
Metsätähde (Ruotsi)	1,3	3,4	1,2	0,7	33,6	5,1	7,5	0,6	0,06	1,4	3,2
Kuoripelletti (Ruotsi)	3,2	21,4	3,2	1,7	29,4	3,5	6,1	0,9	0,14	0,7	2,5
Pajupelletti (Ruotsi)	1,4	3,0	0,5	1,7	33,6	4,0	14,5	0,3	0,04	1,8	10,1
Vehnän olki (Ruotsi)	11,3	70,6	4,5	2,3	5,3	1,6	8,1	0,7	0,28	1,0	3,0
Vehnän olki-95 (Tanska)	4,8	34,2	0,3	0,2	8,4	2,2	30,1	0,5	0,02	3,2	3,9
Vehnän olki-97 (Tanska)	8,0	29,9	0,8	1,3	10,6	5,6	27,7	1,5	0,07	5,5	10,8
Elefantiheinä, <i>Miscanthus</i>	3,3	42,8	0,5	0,4	7,6	4,8	25,3	0,7	0,03	2,1	5,3
Sokeriruoko, <i>Sweet sorghum</i>	4,7	57,8	0,7	0,5	9,0	2,7	8,2	1,5	0,05	3,0	3,0
Oliivin puristusjäte, <i>Alpeorajo (Espanja)</i>	7,5	20,3	5,9	2,3	9,9	4,2	30,1	0,2	0,23	1,6	3,4
Juuttijäte (Intia)	29,2	49,2	10,2	6,3	9,4	1,4	2,2	0,5	1,1	0,9	0,7
Oliivipuu (Italia)	3,0	6,0	1,9	1,4	45	6	27	1,3	0,1	3	7
Viiniköynnös (Italia)	2,7	2,0	0,6	0,5	38	10	36	1,0	0	4	7
Valeakaasia, <i>Robinia (Italia)</i>	2,1	1,2	0,4	0,4	59	6	18	1,0	0	6	7

Taulukko 13.7. Euroopan ulkopuolella kasvavien biomassojen tuhkapitoisuus ja sen koostumus (tuhkaus 550 °C) (Moilanen 2006, Kurkela et al. 2006).

Biomassa	Tuhka, p-%	Tuhkan kemiallinen koostumus, p-%									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
Kaksivuotinen Aasiassa kasvava juuttia muistuttava kasvi, <i>Kenaf</i>	3,6	6,6	1,8	1,2	30,8	6,0	13,3	1,3	0,08	5,7	2,7
Sinimailanen, <i>Alfalfa</i> (USA)	5,0	3,0	0,3	0,7	22,4	9,0	27,7	1,9	0,02	3,0	8,0
Palmun kuivat oksat, <i>Palmoil dry sticks</i> (Intia)	3,4	23,5	0,3	0,6	23,8	3,3	21,7	0,7	0,04	2,7	1,9
Palmun kuitu, <i>Palmoil fibre</i> (Intia)	9,3	68,4	2,8	4,0	9,5	2,8	2,4	0,3	0,4	1,1	3,7
Kuiva palmun hedelmä, <i>Dry palmoil fruit</i> (Intia)	11,3	42,8	3,4	2,7	13,6	6,5	11,4	0,5	0,3	1,4	4,4
Kookoksen kuitutähde, <i>Coconut fibre</i> (Intia)	3,0	20,7	1,3	1,4	7,8	5,3	38,5	4,0	0,1	3,7	1,9
Kookospuun oksat, <i>Coconut twigs</i> (Intia)	5,3	7,1	0,8	0,6	25,2	10,0	14,5	11,5	0,06	1,9	4,4
Juuttijäte (Intia)	29,2	49,2	10,2	6,3	9,4	1,4	2,2	0,5	1,1	0,9	0,7

Taulukko 13.8. Erilaisten biomassojen reaktiivisuuksia (kun konversio X on 95 %) sekä tuhkajäännöksen sintraantumisasaste perusolosuhteissa (1 bar, 850 °C, 100 % vesihöyry) (Moilanen 2006, Kurkela et al. 2006).

Biomassa	Reaktiivisuus r", %/min	Tuhkan sintraantumisasaste
Mäntypuru	25	
Männyn kuori	15	0
Kuusen kuori	135	0
Metsätähde (mänty)	30	
Paju	100	0
Ohran olki	25	
Ruokohelpi	20	
Metsätähde (Ruotsi)	140	0
Kuoripelletti (Ruotsi)	100	0
Pajupelletti (Ruotsi)	160	0
Vehnän olki (Ruotsi)	20	
Vehnän olki-95 (Tanska)	100	***
Vehnän olki-97 (Tanska)	60	***
Elefanttiheinä, <i>Miscanthus</i>	45	
Sokeriruoko, <i>Sweet sorghum</i>	60	
Kaksivuotinen Aasiassa kasvava juuttia muistuttava kasvi, <i>Kenaf</i>	85	
Oliivin puristusjäte, <i>Alpeorujó (Espanja)</i>	220	*
Oliivipuu (Italia)	400	*
Viiniköynnös (Italia)	400	*
Valeakaasia, <i>Robinia (Italia)</i>	320	*
Sinimailanen, <i>Alfalfa (USA)</i>	370	**
Palmun kuivat oksat, <i>Palmoil dry sticks (Intia)</i>	120	0 (*)
Palmun kuitu, <i>Palmoil fibre (Intia)</i>	35	0 (*)
Kuiva palmun hedelmä, <i>Dry palmoil fruit (Intia)</i>	55	*
Kookoksen kuitutähde, <i>Coconut fibre (Intia)</i>	80	*
Kookospuun oksat, <i>Coconut twigs (Intia)</i>	200	0
Juuttijäte (Intia)	200	0

Lähdeluettelo

- AHO, M. 2001. Reduction of chlorine deposition in FB boilers with aluminium-containing additives. *Fuel*, 80(13), s. 1943–1951.
- AHO, M. & FERRER, E. 2005. Importance of coal ash composition in protecting the boiler against chlorine deposition during combustion of chlorine-rich biomass. *Fuel*, 84(2–3), s. 201–212.
- AHO, M. & SILVENNOINEN, J. 2004. Preventing chlorine deposition on heat transfer surfaces with aluminium–silicon rich biomass residue and additive. *Fuel*, 83(10), s. 1299–1305.
- AHO, M., ROPPO, J., HEDMAN, M., MAUNULA, J., LEINO, T. & KAUPPINEN, J. 2015. Protective power of coal and peat against alkali chloride formation and Cl deposition in blends with forest biomass in FBC, 22nd International Conference on Fluidized Bed Conversion, Turku, Finland. S. 35–45.
- AHO, M., VAINIKKA, P., TAIPALE, R. & YRJÄS, P. 2008. Effective new chemicals to prevent Cl-originated superheater corrosion in power plants. *Fuel*, 87, s. 647–654.
- AHOKAS, J. 1983. Energiantuotanto maatilatalouden omista energialähteistä. Tutkimusselostus nro 33. Vihti: Vakola. 66 s.
- AHOKAS, J., STÅHLBERG, P. & MAASKOLA, I. 1983. Olki polttoaineena. Tutkimusselostus nro 30. Vihti: Vakola. 88 s. + liitt. 10 s.
- AJANKO, S., MOILANEN, A. & JUVONEN, J. 2005. Kierrätyspolttoaineiden laadunvalvonta. VTT Publications 587. Espoo: VTT. 59 s.
- ALAKANGAS, E. 2014. Käytöstä poistetun puun luokittelun soveltaminen käytäntöön – VTT-M-01931-14. Helsinki: Energiateollisuus ry, Bioenergia ry ja Metsäteollisuus ry. 51 s.
- ALAKANGAS, E. 2012. Analysis of particle size of wood chips and hog fuel – ISO/TC 238. VTT-R-02834-12. p. 28.
- ALAKANGAS, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. Espoo: VTT. 172 s. + liitt. 17 s.
- ALAKANGAS, E. 1992. Taloustulisijojen käyttö. Helsinki: Rakennuskirja. 68 s.
- ALAKANGAS, E., ERKKILÄ, A. & ORAVAINEN, H. 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys. VTT-R-10553-08. 67 s.
- ALAKANGAS, E., HÖLTTÄ, P., JUNTUNEN, M. & VESISENAHO, T. 2011. Energiaturpeen tuotantotekniikka, koulutusaineisto. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu 120. 100 s.
- ALAKANGAS, E. & IMPOLA, R. 2014. Puupolttoaineiden laatuohje. VTT-M-07608-13 – päivitys 2014. Helsinki: Energiateollisuus ry, Bioenergia ry ja Metsäteollisuus ry. 41 s. + liitt. 21 s.
- ALAKANGAS, E., KOPONEN, K., SOKKA, L. & KERÄNEN, J. 2015. Classification of used wood to biomass fuel or solid recycled fuel and cascading use in Finland. Book of Proceeding Bioenergy 2015, s. 79–86. For Boost for Entire Bioenergy Business, 2–4.9.2015, Jyväskylä, Finland.
- ALAKANGAS, E., SAURANEN, T. & VESISENAHO, T. 1999. Hakkuutähteestä polttihakkeeksi. Koulutusmateriaali. Jyväskylä: VTT Energia. 82 s.

- ALAKANGAS, E. & SELIN, P. 2006. Paikalliset polttoaineet – Suomen huoltovarmuuden perusta. Tietoa käytöstä, ominaisuuksista, luokituksista ja ympäristövaikutuksista. VTT ja Vapo Oy. 24 s.
- ALAKANGAS, E. & VALTANEN, J. 2015. Standardit kiinteille biopolttoaineille. Bioenergia-lehti, nro 2, 26.2.2015, s. 11.
- ALAKANGAS, E. & VIRKKUNEN, M. 2007. Biomass fuel supply chains for solid biofuels – from small to large scale. EUBIONET II. 32 p.
- ALAKANGAS, E. & WIIK, C. 2008. Käytöstä poistetun puun luokittelu ja hyvien käytäntöjen kuvaus. VTT-R-04989-08. 54 s. + liitt. 30 s.
- ANTTILA, P., NIVALA, M., LAITILA, J., FLYKTMAN, M., SALMINEN, O. & NIVALA, J. 2014. Metsähakkeen alueellinen korjuupotentiaali ja käyttö vuonna 2020. Metla työraportteja 313. Helsinki: Metla. 55 s.
- ARASTO, A., TSUPARI, E., KÄRKI, J., PISILÄ, E. & SORSAMÄKI, L. 2013. Post-combustion capture of CO₂ at an integrated steel mill – Part I: Technical concept analysis. International Journal of Greenhouse Gas Control, 16 (2013), 271–277.
- ARPIAINEN, V., KYLLÖNEN, H. & NISSILÄ M. 1986. Turpeen, puun, kuoren ja ligniinin flash-pyrolyysi. Osa 1. Tutkimusten nykytila ja arvio teollisista sovellusmahdollisuuksista. Tutkimuksia 455. Espoo: VTT. 120 s. +liitt. 47 s.
- BERGGREN, B., KALMARI, A. & LEINO, P. 1980. Classification and properties of peat for fuel purposes. Publ. 158. Helsinki: Energiataloudellinen Yhdistys & Ekono Oy. 30 s.
- Bioklapi Oy. 2012. Briketin analyysitodistus Y1201028-00, 11.04.2012. ENAS, www.bioklapi.fi
- BJÖRKLUND, P. 2014. HR-pelletti kestää vertailun. Bioenergia, nro 4, 27.8.2014, s. 16–17.
- BJÖRKLUND, T. 1984. Tervalepän biomassa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 151. Helsinki: Metla. 71 s.
- BJÖRKLUND, T. & FERM, A. 1982. Pienikokoisen koivun ja harmaalepän biomassassa ja tekniset ominaisuudet. Folia Forestalia 500. Helsinki: Metla. 37 s.
- BLOMQVIST, G., FREDRIKSSON, D. & THUN, R. 1984. Egenskaper och testingsmetoder för energitorv. Projektrapporter, Torv -84/1. Stockholm: Statens energiverk. 250 s. + liitt. 25 s.
- BURVALL, J. 1997. Influence of harvesting time and soil type on fuel quality in reed canary grass (*Phalaris Arundinacea* L.). Biomass and Bioenergy, Vol. 12, No. 3, s. 149–154.
- ELECTROWATT-EKONO. 1999a. Turpeen käyttö vuonna 1998 ja käyttöarvio vuodelle 1999. Raportti 60K01412-Q060-021. Espoo. 9 s + liitt. 21 s.
- ELECTROWATT-EKONO. 1999b. Jyrsinturpeen laatu vuosina 1997 ja 1998. Raportti 60K01412-Q060-023. Espoo. 47 s.
- Energia Suomessa. 2004. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. Espoo/Helsinki: VTT & Edita. 396 s.
- ERBER, G., ROUTA, J., WILHELMSSON, L., RAITILA, J., TOIVIAINEN, M., RIEKKINEN, J. & SIKANEN, L. 2014. A prediction model prototype for estimating optimal storage duration and sorting. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 297. Helsinki: Metla. 76 p.

- ERKKILÄ, A., KAIPAINEN, H., PAAPPANEN, T., ALAKANGAS, E., LINDBLAD, J., SIKANEN, L., TAHVANAINEN, T. KÄHKÖNEN, T. & AIRAKSINEN, U. 2006, Uusi pilkkeen käsittelykonsepti valmistuksessa asiakkaalle. VTT-R-04964-06.
- ERKKILÄ, A., STRÖMBERG, T. & HILLEBRAND, K. 2012. Energiasisältöön perustuvan polttopuuliiketoiminnan kehittäminen. VTT-R-00152-12.
- EURACOAL. 2013. Coal industry across Europe. 5. painos. Bryssel: EURACOAL European Association for Coal and Lignite AISBL. 76 s. ISSN 2034-5682.
- FAGERNÄS, L., KUOPPALA, E., RANTA, J., ARPIAINEN, V., TIILIKKALA, K., KEMPPAINEN, R., HAGNER, M. & SETÄLÄ, H. 2014. Hidaspyrolyysisuotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus – Biohiili ja tisle. VTT Technology 182. Espoo: VTT. 74 s.
- FAGERNÄS, L., KUOPPALA, E., TIILIKKALA, K. & OASMAA, A. 2012. Chemical composition of Birch Wood Slow Pyrolysis Products. Energy & Fuels, ACS Publications, s. 1275–1283.
- FAGERNÄS, L., RANTA, J., NIEMINEN, M., ASPLUND, D. & NYRÖNEN, T. 1980. Turpeen kosteuden mittaaminen. Tiedonanto 30. Espoo: VTT, poltto- ja voiteluainelaboratorio. 122 s.
- FAO. 2004. Unified bioenergy terminology – UBET. 58 p. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/j4504e/j4504e00.pdf>
- FERRER, E., AHO, M., SILVENNOINEN, J. & NURMINEN, R.-V. 2005. Fluidized bed combustion of refuse-derived fuel in presence of protective coal ash. Fuel Processing Technology, 87, s. 33–44.
- FLYKTMAN, M. 1998. Ruokohelven seospolttoturpeen ja puun kanssa. Tutkimusraportti ENE 33/T0123/98. Jyväskylä: VTT Energia. 36 s. + liitt. 4 s.
- FÖHR, J., SEPPÄNEN, T., SUIKKI, J., SOININEN, H. & RANTA, T. 2015. Torrefioidun biohiilipelletin kirjallisuustutkimus ja koeajot pilottilaitoksella. LUT Scientific and Expertise publications, tutkimusraportti 46. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Bioenergianteknologian tutkimusryhmä ja Mikkelin ammattikorkeakoulu. 56 s.
- GREB, S. 2015. Kentucky Geological Survey, University of Kentucky (joulukuu 2015). https://www.uky.edu/KGS/coal/coalform_download.htm
- HAKKILA, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. Folia Forestalia 342, s. 1–38. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos.
- 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. 1992 (toim.). Metsäenergia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 422. Helsinki: Metla. 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. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2000. VTT Symposium 205. Espoo: VTT. S. 11–30.
- HAKKILA, P. & HEISKANEN, V. 1978. Puun ja puutavaran ominaisuuksia. Tapion taskukirja. 18. painos. Jyväskylä: Keskusmetsälautakunta Tapio. S. 448–459.

- HAKKILA, P., KALAJA, H., SALAKARI, M. & VALONEN, P. 1978. Whole-tree harvesting in the early thinning of pine. *Folia Forestalia* 333, s. 1–58. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos.
- HAKKILA, P., KALAJA, H. & SARANPÄÄ, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennuskannikot kuitu- ja energia- lähteenä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 582. Helsinki: Metla.
- HAKKILA, P. & KALAJA, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttaminen -tekniikka. *Folia Forestalia* 552. Helsinki: Metla. 37 s.
- HAKKILA, P., NURMI, J. & KALAJA, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energianlähteenä. Jyväskylä: Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684. 68 s.
- HAKKILA, P. & VERKASALO, E. 2009. Structure and properties of wood and woody biomass. Teoksessa: Kellomäki, S. (ed.). *Forest Resources and Sustainable Management. Papermaking Science and Technology. Volume 2. Second Edition – Totally Updated.* Paper Engineers' Association / Paperi ja Puu Oy. Jyväskylä, Finland: Gummerus Oy. S. 133–215.
- HANNULA, J. 2014. Kierrätyspolttoaineiden koostumus ja laatuominaisuudet energiahyödyntämisen näkökulmasta. Jäteperäiset polttoaineet energiantuotannossa – seminaari 2.10.2014.
- HARTMANN, H. 2007. Physical-mechanical fuel properties – Significance and standard determination methods. Workshop Pre-normative research on solid biofuels for improved European standards, 19 September 2007, Athens, Greece. 15 p.
- HENDERSON, P., SZAKÁLOS, P., PETTERSSON, R., ANDERSSON, C. & HÖGBERG, J. 2006. Reducing superheater corrosion in wood-fired boilers. *Materials and Corrosion*, 57(2), s. 128–134.
- HERRANEN, T. 2009. Turpeen rikkipitoisuus Suomessa. Turvetutkimusraportti 398. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. 55 s.
- HILLEBRAND, K. & NURMI, J. 2000. Puupolttolaitosten laadunhallinta. Alakangas, E. (toim.). *Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2000.* VTT Symposium 205. Espoo: VTT. S. 205–216.
- HILLEBRAND, K. & KOUKI, J. 2006. Pilkkeen kuivaus – luonnonkuivaus, keinokuivaus ja laadun hallinta. Työtehoseuran julkaisuja 398. Rajamäki: Työtehoseura. 62 s.
- HILTUNEN, M. 1998. Kierrätyspolttoaineiden käyttömahdollisuudet leijupolttokattiloissa. Esitelmä. Jätteen energiakäyttö -teknologiaohjelman vuosiseminaari, Espoo, 13.8.1998. 8 s.
- HUTTUNEN, M.J. & KUITTINEN, V. 2015. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 18. Tiedot vuodelta 2014. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 21. Joensuu: Itä-Suomen yliopisto. 50 s.
- 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. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 163, s. 1–20. Helsinki: Metla.
- HÄKKINEN, E., MERILEHTO, K. & SALMENPERÄ, H. 2014. Valtakunnallisen jätesuunnitelman seurannan 2. Väli- raportti. Ympäristöministeriön raportteja 6/2014. Helsinki: Ympäristöministeriö. 83 s.

- HÄRKÖNEN, K. 2014. Puuvarojen käyttö. Teoksessa: Viitanen, J. & Mutanen, A. (toim). Metsäsektorin suhdannekatsaus 2014–2015. Metla S. 33–35.
- IEA. 2015. Coal Information. IEA Publications. Paris: IEA. ISBN 978-92-64-23891-6, ISSN 16834275.
- IMMONEN, K. & SEPPÄLÄ, R. 1984. Polttopuun ja palaturpeen alueittainen tuotanto, jakelu ja käyttö. Sarja B:76. Helsinki: Suomen itsenäisyyden juhluvuoden 1967 rahasto. 164 s. + liitt. 27 s.
- IMPOLA, R. 1983. Polttoturpeen laadun ja määrän mittauslaitteet. Julkaisu 65–83. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. 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., 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. Report No. 5. Helsinki: International Energy Agency. 94 s. + liitt. 6 s.
- ISÄNNÄINEN, S. 1993. Jätevesilietteistä ja niiden hyötykäytöstä. Seminaariesitelmä Vesien suojele. Julkaisuja 4/1994, s. 19–40. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- 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. Moniste. Jyväskylä: FINBIO. 29 s.+ liitt. 4 s.
- JUVONEN, T. 2004. Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa. Raportti 3/2004. Suomen Soodakattilayhdistys ry. 74 s. (Julkaistu myös diplomityönä samalla nimellä: Espoo: Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. 74 s.)
- JUVONEN, R. & JOHANSON, P. E. 1986. Mekaaninen metsäteollisuus 2. Sahateollisuus. Helsinki: Ammattikasvatustilasto, Suomen puuteollisuusinsinöörien yhdistys r.y. 290 s.
- JÄRVINEN, T. 2012. Kiinteiden biopolttoaineiden CEN-näytteenottostandardin soveltaminen Suomen oloihin. Tutkimusraportti VTT-R-01322-12. 55 s.
- JÄRVINEN, T. & IMPOLA, R. 2012. Näytteenottostandardin soveltamisohje. Näytteenotto- ja näytekäsittelystandardien (SFS-EN 14778 ja SFS-EN 14780) soveltamisohje metsäpolttoaineille Suomessa. Tutkimusraportti VTT-R-03522-12. 21 s.
- Jätetilastot 2014. 2015. Yhdyskuntajätteet, Suomen virallinen tilasto, Ympäristö ja luonnonvarat 2015. Tilastokeskus, 7 s.
- KAARTINEN, T., SORMUNEN, K. & RINTALA, J. 2013. Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. Journal of Cleaner Production, 55 (2013), s. 56–66.
- KALLIO, M. & ALAKANGAS, E. 2002. Puubrikettien tuotanto ja käyttö Suomessa. OPET Finland Raportti 8. Jyväskylä: VTT. 39 s. + liitt. 3 s.

- KIRJAVAINEN, K. 2015. Puuta ja turvetta polttavien energiantuotantolaitosten tuhkan muodostuminen ja hyötykäyttöä rajoittavat kemialliset tekijät. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. 100 s.
- KORPIJÄRVI, K., ALAKANGAS, E., TAIPALE, R. & KAIPAINEN, H. 2014. Comparison of torrefied and wood pellets storage behaviour. Book of Proceeding, Bioenergy from Forest 2014. Helsinki: Benet Oy. S. 96–103.
- KORPIJÄRVI, K., MROUEH, U.-M., MERTA, E., LAINE-YLIJOKI, J., KIVIKOSKI, H., JÄRVELÄ, E., WAHLSTRÖM, M. & MÄKELÄ, E. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. VTT Tiedotteita 2499. Espoo: VTT. 75 s. + liitt. 19 s.
- KORPINEN, O. J., RANTA, T., LÖTJÖNEN, T. & LEHTONEN, E. 2014. Geographical distribution of techno-economic harvest potential of straw for energy use and biorefining in Finland. Book of Proceeding Bioenergy 2015, s. 35–47, For Boost for Entire Bioenergy Business, 2–4.9.2015, Jyväskylä, Finland.
- KOUKI, J. 1997. Pilkkeiden kosteuden ja massan mittaaminen. Työtehoseuran monisteita 6/1997 (55). 29 s.
- KOUKI, J., VUORIO, K., TISSARI, J., SIPPULA, O. & JOKINIEMI, J. 2008. Viljan ja siitä saatavan lajittelujakeen polton tekniset vaatimukset ja vaikutukset ympäristöön. TTS tutkimuksen julkaisu 404. 44 s. + liitt. 7 s.
- KnowPulp. 2013. Sellutekniikan ja automaation oppimisympäristö. v.13.0. Prowledge Oy, <http://www.knowpulp.com> (viitattu 10.12.2015).
- 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.
- KURKELA, M. (ed.) 2015. Biomass gasification fundamentals to support the development of BTL in forest industry. Publishable final scientific report of Nordsyngas project. VTT Technology 210. Espoo: VTT. 210 s.
- KURKELA, E., KURKELA, M. & HILTUNEN, I. 2014. The Effects of Wood Particle Size and Different Process Variables on the Performance of Steam-Oxygen Blown Circulating Fluidized-Bed Gasifier. Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol. 33, No. 3, 681–687.
- KURKELA, E., KURKELA, M. & MOILANEN, A. 2006. Fluidised-bed gasification of high-alkali biomass fuels. Teoksessa: Bridgwater, A.V. & Boocock, D.G.B. (eds.). Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion. CPL Press Newbury, Vol. 1, p. 662–676.
- KYLLÖNEN, H., LEHTO, J., PIRKONEN, P., GRÖNROOS, A., PAKKANEN, H. & ALÉN, R. 2010. Correlation of wood-based components and dewatering properties of waste activated sludge from pulp and paper industry. Water Science & Technology – WST, 2010, s. 387–393.
- KYTÖ, M. & ÄIJÄLÄ, M. 1981. Metsäenergian käyttö ja jalostus. Osa 4. Puun pelletoinnin kokeellinen tutkimus. Tutkimuksia 41/1981. Espoo: VTT. 45 s. + liitt. 8 s.
- KYTÖ, M., ÄIJÄLÄ, M. & PANULA, E. 1983. Metsäenergian käyttö ja jalostus. Osa 8. Puun ominaisuudet ja energiakäyttö. Kirjallisuustutkimus. Tiedotteita 237. Espoo: VTT. 146 s.
- KÄRHÄ, K., ELO, J., LAHTINEN, P., RÄSÄNEN, T., KESKINEN, S., HEISKANEN, P., STRANDSTRÖM, M. & PAJUOJA, H. 2010. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa 2020. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu. Energia ja ilmasto. 66/2010. 68 s.

- KÄRKKÄINEN, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Helsinki: Metsäkustannus. 468 s.
- KÄRKKÄINEN, M. 1985. Puutiede. Hämeenlinna: Jyväskylän yliopisto, biologian laitos. 415 s.
- KÄRKKÄINEN, M. 1971. Puu, sen rakenne ja ominaisuudet. Helsinki: Ylioppilastuki ry. 248 s.
- LAINEN, A. 2015. Uusien peltobioenergiakasvien potentiaali ja käytännön ongelmien edulliset ratkaisut kestävässä energiantuotannossa. BEST-ohjelman raportti 6/15/2015. Luonnonvarakeskus. 35 s.
- LAINEN, R. & SAHRMAN, K. 1985. Puupolttoaineiden ominaisuudet ja hinnoitteluperusteet. Tiedotteita 513. Espoo: VTT. 68 s.
- LAINEN-YLIJOKI, J., WAHLSTRÖM, M., PELTOLA, K., PIHLAJANIEMI, M. & MÄKELÄ, E. 2002. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. VTT Tiedotteita 2141. Espoo: VTT. 51 s. + liitt. 59 s.
- LAITILA, J. & NUUTINEN, Y. 2015. Efficiency of integrated grinding and screening of stump wood for fuel at roadside landing with a low-speed double shaft grinder and star screen. *Croatian Journal For Engineering*, 36 (2015), 19–32.
- LAITILA, J. & ROUTA, J. 2015. Performance of a small and a medium sized professional chippers and the impact of storage time on Scots pine (*Pinus sylvestris*) stem wood chips characteristics. *Silva Fennica*, Vol. 49, No. 5, article 1382.
- LAPPALAINEN, E. & HÄNNINEN, P. 1993. Suomen turvevarat. Tutkimusraportti 117. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. 118 s.
- LARJAVA, K., SILTANEN, T., TORMONEN, K., KOLSI, A., ORJALA, M. & MUURINEN, M. 1995. Huonekaluteollisuuden lämmityskattiloiden polton tehostaminen. . VTT Tiedotteita 1709. Espoo: VTT. 52 s. + liitt. 8 s.
- LATVALA, M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä – Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT), Suomen ympäristö 24/2009. Suomen ympäristökeskus, 114 s.
- LEHTO, J., OASMAA, A., SOLANTAUSTA, Y., KYTÖ, M. & CHIARAMONTI, D. 2014. Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils. *Applied Energy*, 116 (2014), 178–190.
- LEHTO, J., OASMAA, A., SOLANTAUSTA, Y., KYTÖ, M. & CHIARAMONTI, D. 2013. Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils. VTT Technology 87. Espoo: VTT. 79 s.
- LEHTOMÄKI, A. & RINTALA, J. 2006. Biokaasun mahdollisuudet ja tuotannon potentiaali Suomen maataloudessa. PTT-katsaus 2/2006, s. 29–35.
- LEHTOVAARA, J. & SALONEN, M. 2012. Chemical properties of fuel peat. Extended abstract No. 46. 14th International Peat Congress, Peatlands in balance, 3–8 June, Stockholm 2012.
- LEINO, P. 1975. Kuoren ja turpeen polttoaineominaisuudet. Puun jätteen, kuoren ja turpeen poltto. Julkaisu 98-74. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. 10 s.+ liitt. 5 s.
- LEINONEN, A. (toim.) 2010. Turpeen tuotanto ja käyttö. Yhteenveto selvityksistä. VTT Tiedotteita 2550. Espoo: VTT. 104 s.

- LINDH, T., KALLIO, E., PAAPPANEN, T., LEINONEN, A. & KAIPAINEN, H. 1998. Irtokorjuumenetelmän kehittäminen korsibiomassan korjuuseen ja toimitukseen seospolttoaineeksi 1995–1997. Tutkimusselostus ENE 32/T0119/98. Jyväskylä: VTT Energia. 79 s. + liitt. 31 s.
- LINDH, T. 1995. Ruokohelpin polttoaine- ja palamisominaisuudet. Moniste. Jyväskylä: VTT Energia. 22 s. + liitt. 12 s.
- LINNA, V. & JÄRVINEN, T. 1983. Hakkeen keinokuivatuksen tekniset ratkaisut ja taloudellisuus. Kotimaisen polttoaineiden alueellinen hyväksikäyttö. Tutkimusraportti nro 25 A. Helsinki: Suomen itsenäisyyden juhlavuoden 1967 rahasto SITRA. 114 s. + liitt. 9 s.
- LINNA, V., KAIPAINEN, H. & OKKONEN, J. 1983. Aurinkolämmön käyttö hakkeen ja palaturpeen puhallinkuivauksessa. VTT Tutkimuksia 239. Espoo: VTT. 128 s. + liitt. 7 s.
- LINNA, V. & KOLSI, A. 1992. Erillishanke: Puujätteen polton päästäselvitys, Julkaisussa: Hupa, M. & Martinlinna, J. (toim). LIEKKI Polttotekniikan vuosikirja 1992, L92-1. S. 413–429.
- LOHINIVA, E., MÄKINEN, T. & SIPILÄ, K. 2001. Lietteiden käsittely – Uudet ja käytössä olevat tekniikat. VTT Tiedotteita 2081. Espoo: VTT. 147 s. + liitt. 14 s.
- LUNGREN, J. & PETTERSSON, E. 2009. Combustion of horse manure for heat production. *Bioresource Technology*, Vol. 100 (2009), 3121–3126.
- LÖTJÖNEN, T. & PAAPPANEN, T. 2013. Bale density of reed canary grass spring harvest. *Biomass and bioenergy*, 51 (2013), 53–59.
- Maakaasukäsikirja 2014. Helsinki: Suomen kaasuyhdistys. 120 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. Kuopio: Kuopion yliopisto. 69 s.
- MANNINEN, H., PELTOLA, K., JÄRVI-KÄÄRIÄINEN, T. & LEPPÄNEN, A. 1994. Pakkausten energiahyötykäyttö. PTR:n Raportti No. 39. Helsinki: Pakkausteknologiaryhmä r.y. 16 s..
- Metsätilastollinen vuosikirja 2014. Suomen Virallinen tilasto. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos.
- MIKKOLA, H. 2012. Peltoenergian tuotanto Suomessa – Potentiaali, energiasuhteet ja nettoenergia. Maa- ja metsätaloustieteen laitoksen julkaisuja 10. Helsinki: Helsingin yliopisto. 93 s.
- MOILANEN, A. 2006. Thermogravimetric characterisations of biomass and waste for gasification processes. VTT Publications 607. Espoo: VTT. 103 s. + liitt. 97 s.
- MOILANEN, A. & NASRULLAH, M. 2011. Gasification reactivity and ash sintering behaviour of biomass feedstocks. VTT Publications 769. Espoo: VTT. 39 s. + liitt. 96 s.
- MOILANEN, A., NASRULLAH, M. & KURKELA, E. 2009. The Effect of Biomass Feedstock Type and Process Parameters on Achieving the Total Carbon Conversion in the Large Scale Fluidized Bed Gasification of Biomass. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 28, No. 3, s. 355–359.

- MOILANEN, A. & RANTA, J. 1983. Egenskaper hos industriell torv och dess testningsmetoder. Delrapport 1. Frästorvens förbränningstekniska egenskaper. Espoo: VTT, poltto- ja voiteluainelaboratorio (julkaisematon raportti). 58 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.
- MÄKILÄ, M. 1994. Suon energiasisällön laskeminen turpeen ominaisuuksien avulla. Tutkimusraportti 121. Espoo: Geologian tutkimuskeskus.
- MÄLKÖNEN, E. 1977. Betydelsen av helträdsutnyttjande i skogens näringshushållning. Skogsbruket Nr. 6, s. 124–125, 136.
- MÄLKÖNEN, E. 1974. Annual primary production and nutrient cycle in some Scots pine stands. Communicationes Instituti Forestals Fenniae 84.5. 87 s.
- NASRULLAH, M. 2009. Modelling of char gasification reactivity for biomass in a fluidized bed gasifier. Master's thesis. Aalto University 76 p.
- NASRULLAH, M. 2015. Material and energy balance of solid recovered fuel production. VTT Science 115. Espoo: VTT. 160 p.
- NASRULLAH, M. & MOILANEN, A. 2009. Variation in fuel reactivity and characteristics of biomass feedstock for large-scale gasification". Proc. 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29 June – 3 July 2009, Hamburg. S. 952–955.
- Neste Oy, internetsivusto. 7.12.2015, www.neste.fi
- NIEMINEN, M., SUOMALAINEN, M. & MÄKINEN, T. 2006. Gasification of shredder residue. VTT Research Notes 2344. Espoo: VTT. 46 s. + liitt. 2. s.
- NIITTYMÄKI, I. 1993. Bubbling fluidized bed boiler for biofuel combustion. Alakangas, E. (toim.). Proceedings of the Biofuels Workshop II. Hanasaari Cultural Centre, August 24–30, 1992. Jyväskylä: VTT Energy. S. 305–322.
- NORDIN, E. 1924. Metod for provningn av fasta bränslen. Meddelande 19. Stockholm: Staten Proving-ansstalt.
- NURMI, J. & BRÄNNSTRÖM, H. 2014. Logistiset valinnat ja syöttömassojen laatu tulevaisuudessa biojalostuksessa. ForestEnergy 2020 -vuosiseminaari, Jyväskylä, 8.–9.10.2014. 21 s.
- NURMI, J. 1993. Pienkokoisten puiden maanpäällisen biomassan lämpöarvo. Acta Forestalia Fennica 236. 30 s.
- NURMI, J. 1997. Heating values of mature trees. Acta Forestalia Fennica 256. Tampere. 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. Research Papers 758. Helsinki: The Finnish Forest Research Institute. 42 s.

- NT ENVIR 009:fi. 2006. Energiaturpeen laatuohje 2006. Polttoaineluokitus ja laadunvarmistus, näytteenotto ja ominaisuuksien määrittäminen, 24 s. www.nordicinnovation.net
- OASMAA, A., KÄLLI, A., LINDFORS, C., ELLIOTT, D.C., SPRINGER, D., PEACOCKE, C. & CHIARAMONTI, D. 2012. Guidelines for transportation, handling, and use of fast pyrolysis bio-oil. 1. Flammability and toxicity. *Energy and Fuels*, Vol. 26, No. 6, 3864–3873.
- OASMAA, A. 2003. Fuel oil quality properties of wood-based pyrolysis liquids. Research Report No. 99. Department of chemistry, Academic Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. Jyväskylä: University of Jyväskylä. 921 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. VTT Publications 306. Espoo: VTT. 46 s. + liitt. 30 s.
- OASMAA, A. & PEACOCKE, C. 2010. Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids. A guide. VTT Publications 731. Espoo: VTT. 79 s. + liitt. 46 s.
- OASMAA, A., SOLANTAUSTA, Y., ARPIAINEN, V., KUOPPALA, E. & SIPILÄ, K. 2010. Fast Pyrolysis Bio-Oils from Wood and Agricultural Residues. *Energy and Fuels*, 24, 1380–1388.
- OASMAA, A., SUNDQVIST, T., KUOPPALA, E., GARCIA-PEREZ, M., SOLANTAUSTA, Y., LINDFORS, C. & PAASIKALLIO, V. 2015a. Controlling the phase stability of biomass fast pyrolysis bio-oils. American Chemical Society, *Energy and Fuels*, Vol. 29, No. 7, s. 4373–4381.
- OASMAA, A., VAN DE BELD, B., SAARI, P., ELLIOTT, D.C. & SOLANTAUSTA, Y. 2015b. Norms, Standards, and Legislation for Fast Pyrolysis Bio-oils from Lignocellulosic Biomass. *Energy and Fuels*, 29, 2471–2484.
- PAAPPANEN, T., LINDH, T., KÄRKI, J., IMPOLA, R., RINNEN, S., LÖTJÖNEN, T., KIRKKARI, A.-M. TAIPALE, R. & LEINO, T. 2008. Ruokohelven polttoaineketjun kehittäminen liiketoimintamahdollisuuksien parantamiseksi. VTT Tiedotteita 2452. Espoo: VTT. 158 s. + liitt. 9 s.
- PAAVILAINEN, L. 1997. Agrokuidun tuotanto ja käyttö Suomessa. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 58 s.
- PAHKALA, K. & LÖTJÖNEN, T. 2015. Peltobiomassat tulevaisuuden energiaressurssina. 2. korjattu painos. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 55/2015. 60 s.
- PAJU, P. & ALAKANGAS, E. 2002. Puupellettien tuotanto-, jakelu- ja käyttöketjun tekniikka, talous ja markkinat. OPET Raportti 1. Jyväskylä: VTT. 72 s. + liitt. 28 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. Työteho-seuran maatalous- ja rakennusosaston monisteita 2/1981. 50 s.
- PESONEN, J., KUOKKANEN, T., KAIPIAINEN, E., KOSKELA, J., JERKKU, I., PAPPINEN, A. & VILLA, A. 2014. Chemical and physical properties of short rotation tree species. *European Journal Wood production*, 72 (2014), 769–777.

- PIRINEN, H. 1997. Pilkeopas omakotitaloille. Huhmari. Työtehoseura. 36 s.
- PIRINEN, H. 1996. Pilkkeiden irto- ja pinotiiviys. Työtehoseuran monisteita 6/1996 (48). 32 s.
- PIRINEN, H. 1995. Pilkkeiden tilavuuden mittaustarkkuus. Työtehoseuran monisteita 4/1995 (38). 48 s.
- PULKKINEN, P. 1996. Polttoaineen tuottaminen hakkuutähteistä ja muusta jätepuusta hakettamalla ja murskaamalla. Metsäteknologian ja puutalouden pro gradu. Joensuu: Joensuun yliopisto. 60 s. + liitt. 3 s.
- Laki puutavaran mittauksesta 414/2013. Suomen säädöskokoelma, 17.6.2013. 15 s. (<http://finlex.fi>)
- PUURONEN, M., VILPPUNEN, P. & KAUPPI, H. 1994. Peltobiomassojen energiataloudellinen hyödyntäminen. Loppuraportti 10.10.1994. Oulu: Oulun yliopisto, Energialaboratorio. 40 s. + liitt. 5 s.
- Pöyry. 2015. Jätteiden energiahöydyttäminen Suomessa. Loppuraportti. Energiategollisuus, Pöyry. 37 s.
- RAIKO, R., SAASTAMOINEN, J., HUPA, M. & KURKI-SUONIO, I. (toim.) 2002. Poltto ja palaminen. International Flame Research Foundation (IFRF) – Suomen kansallinen osasto. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 750 s.
- RAITILA, J., VIRKKUNEN, M. & HEISKANEN, V.-P. 2010. Metsäpolttoaineiden varastoitavuus runkoina ja hakkeena sekä lämmöntuotantoon integroitu metsäpolttoaineen kuivaus. VTT-R-04524-14. 54 s. + liitt. 10 s.
- RANTA, J. 1999. Autonpaloittelujätteen ja rengasromun terminen konversio energiaksi ja raaka-aineeksi. VTT Tiedotteita 1960. Espoo: VTT. 81 s. + liitt. 19 s.
- RANTA, J. 1994. Puuhiilen valmistus, käsikirja. Mikkeli: Helsingin yliopiston maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus. 107 s. + liitt. 24 s.
- RANTA, J. & KORHONEN, M. 1983. Polttoturpeen ja kivihiilen ominaisuuksiin liittyvä terminologia. Sarja D:42. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto. 61 s.
- RAUTALIN, A., THUN, R., BRANDT, J., OKKONEN, J. & PYYKKÖNEN, R. 1986. Turvetuotteiden ja hakkeen juoksevuus siilossa. Tiedotteita 616. Espoo: VTT. 217 s. + liitt. 7 s.
- ROPPO, J. 2012. Long Term Experiences of Mitigation of Superheater Corrosion with the Metso Corrostop Sulfate Injection System. Proceedings of the 21st International Conference on Fluidized Bed Combustion, Volume 1, Naples, Italy, June 3.–6.2012. S. 91–98.
- ROUTA, J., ASIKAINEN, A., BJÖRHEDEN, R., LAITILA, J. & RÖSER, D. 2013. Forest energy procurement – state of the art in Finland and Sweden. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, WIREs Energy Environ 2013, 2: 602–613.
- ROUTA, J., KOLSTRÖM, M., RUOTSALAINEN, J. & SIKANEN, L. 2015. Precision measurement of forest harvesting residue moisture change and dry matter losses by contact weight monitoring. International Journal of Forest Engineering, 26:1, 71–83.
- RÖSER, D., ERKKILÄ, A., MOLA-YUDEGO, B., SIKANEN, L., PRINZ, R., HEIKKINEN, A., KAIPAINEN, H., ORAVAINEN, H., HILLEBRAND, K., EMER, B. & VÄÄTAINEN, K. 2010. Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 186. Helsinki: Metla. 60 s.

- SALMENPERÄ, H., MOLIIS, K. & NEVALA, S.-M. 2015. Jättemäärien ennakointi vuoteen 2030. Painopisteenä yhdyskuntajätteet ja kierrätystavoitteiden saavuttaminen. Ympäristöministeriön raportteja 17/2015. Helsinki: Ympäristöministeriö. 64 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. Tiedotteita 13/94. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 42 s.
- SEPPÄLÄ, R., ÄIJÄLÄ, M. & ASPLUND, D. 1982. Jyrsinturpeen käsittely ja polttotekniikka Suomessa, Irlannissa ja Neuvostoliitossa. Tiedotteita 63. Espoo: VTT. 379 s. + liitt. 91 s.
- SFS-EN 12952-15:2003. Water-tube boilers and auxiliary installations. Part 15: Acceptance tests.
- SFS-EN ISO 16993:2015. Kiinteät biopolttoaineet. Analyysitulosten muuntaminen eri ilmoitusperustoille.
- SILTANEN, T. & RANTASALO, E. 1984. Polttohakkeen laadulle asetettavat vaatimukset pientalolämmityksessä. Kotimaisten polttoaineiden alueellinen hyväksikäyttö. Tutkimusraportti nro 34. Helsinki: Suomen itsenäisyyden juhluvuoden 1967 rahasto SITRA. 81 s. + liitt. 60 s.
- SILVENNOINEN, J. 2002. Fluidised bed material, method for its production, and method in a fluidised bed process. United States Patent, US 6,460,472 B1, 8.10.2002.
- SILVENNOINEN, J. 2003. A New Method to Inhibit Bed Agglomeration Problems in Fluidized Bed Boilers. 17th International Conference on Fluidized Bed Combustion (FBC2003) 18.–21.5.2003, Jacksonville, Florida, USA. ISBN: 0-7918-3680-0.
- SILVENNOINEN, J. & HEDMAN, M. 2011. Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler. Fuel Processing Technology, 105 (2011), 11–19.
- 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. International standard handbook no 0-960 5974. Stamford, USA: Combustion Engineering Inc. 827 s. + liitt. 173 s.
- SJÖSTRÖM, E. 1978. Puukemia. Teoreettiset perusteet ja sovellutukset. Teknillinen korkeakoulu. Ota-niemi. 241 s.
- SOKKA, L., KOPONEN, K. & KERÄNEN, J. T. 2015. Cascading use of wood in Finland – with comparison to selected EU countries. VTT-R-03979-15. 25 s.
- SOLANTAUSTA, Y. & ASPLUND, D. 1979. Puun käyttö polttoaineena I. Kirjallisuuskatsaus. Tiedonanto 24. Espoo: VTT, poltto- ja voiteluainelaboratorio. 133 s.
- Suomen Soodakattilayhdistys ry. 2010. NO_x emissions from recovery boilers – why discrepancy between Finnish and Swedish values. Esitys, 22.12.2010. 12 s.
- St1, internetsivusto, 7.12.2015. www.st1.fi
- STÅHLBERG, P., WILÉN, C. & HORVATH, A. 1985. Oljen pelletointi ja pellettien käyttö polttoaineena. Vakolan tutkimusselostus nro 40. Vihti: Vakola, Valtion maatalousteknologian tutkimuslaitos.

- 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), J117–121.
- TAHVANAINEN, L. 1995. Pajun viljelyn perusteet. *Silva Carelica* 30. Joensuu: Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta 86. 126 s. + liitt. 12 s.
- TAIPALE, R. 1996. Kiinteiden polttoaineiden ominaisuudet. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. 138 s.
- Teboil, internetsivusto, 7.12.2015. www.teboil.fi
- Teollisuusprosessien sivutuotteiden energiakäytön edellytykset. 1988. Selvitys ja käsikirja. Raportti 21/1988. Helsinki: Energiataloudellinen yhdistys.
- THUN, R. & RAUTALIN, A. 1980. Turpeen juoksevuusominaisuudet. Moniste. Espoo: VTT, poltto- ja voiteluainelaboratorio. 141 s.
- THUN, R. & KORHONEN, M. (toim.). 1999. SIHTI 2. Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1998. Projektiesittelyt. VTT Symposium 191. Espoo: VTT. 487 s.
- TILASTOKESKUS. 2015. Energian tuonti ja vienti alkuperämaittain -taulukko, päivitetty 21.9.2015.
- TORVELAINEN, J. 2009. Pientalojen polttopuun käyttö 2007/2008. *Metsätilastotiedote* 26/29. s. 3.
- TUOMI, S. 2001. Kotimaisten puupellettien ominaisuudet. *Työtehoseuran Metsätiedote* 11, 2001 (639). 4 s.
- TUOMI, S. & KOUKI, J. 1993. Rypsin siemenet hakepolttimessa. *Työtehoseuran metsätiedote* 10/1993 (518). 4 s.
- TUUNANEN, L. 1994. Biomassan polttotekniset laatuvaatimukset. Teoksessa: Bioenergian tuotanto elintarviketuotannosta vapautuvalla peltoalalla. *Työtehoseuran julkaisu* 333. Rajamäki: Työtehoseura. S. 49–65.
- TYNI, S., TIAINEN, M., S. & LAITINEN, R. S. 2009. The suitability of the fuel mixture of horse manure and bedding materials for combustion. *Proceedings of the 20th International Conference on Fluidised bed combustion*, May 18–20, 2009, Xián, China.
- TÄHTI, H. & RINTALA, J. 2010. Biometaanin ja -vedyn tuotantopotentiaali Suomessa. *Bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja* 90. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. 45 s.
- UUSVAARA, O. 1984. Hakepuun kosteuden alentaminen ennen haketusta korjuuseen ja varastointiin liittyvin toimenpitein. *Folia Forestalia* 599. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos. 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.
- VAINIKKA, P. 2011. Occurrence of bromine in fluidised bed combustion of solid recovered fuel. *VTT Publications* 778. Espoo: VTT. 118 s. + liitt. 134 s.
- VAKKILAINEN, E. 2000. Estimation of elemental composition from proximate analysis of black liquor. *Paperi ja Puu – Paper and Timber*, 82(7), 450–454.

- VAKKILAINEN, E. 1993. Energian tuotannon ja sellunvalmistuksen teknologiakehityksen vaikutukset tehdasintegraatin energiatalouteen. INSKO, Energia metsäteollisuuden liiketoiminnassa, 241595-93 III. 23 s.
- 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. Tutkimuksia 448. Espoo: VTT. 39 s. + liitt. 5 s.
- WERKELIN, J. 2008. Ash-forming elements and their chemical forms in woody biomass fuels. Report 08-06. Academic Dissertation, Laboratory of Inorganic Chemistry. Turku: Åbo Akademi. 51 s. + liitt. 9 s.
- VERKASALO, E. 1988. Polttohakkeen ja -hakepuun mittaus. Työtehoseuran metsätiedote 447. Helsinki: Työtehoseura. 3 s.
- VESANTO, P., HILTUNEN, M., MOILANEN, A., KAARTINEN, T., LAINE-YLIJOKI, J., SIPILÄ, K. & WILÉN, C. 2007. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö – Selvitys kierrätyspolttoaineiden laatuominaisuuksista ja soveltuvuudesta leijupolttoon. VTT Tiedotteita 2416. Espoo: VTT. 55 s. + liitt. 4 s.
- VESTERINEN, R. 1997. Kierrätyspolttoaineen, turpeen ja kivihiilen seospolttu leijukerrosreaktorissa. VTT Julkaisuja 825. Espoo: VTT. 44 s. + liitt. 89 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. VTT Publications 244. Espoo: VTT. 38 s.+ liitt. 35 s.
- VIINIKAINEN, S. & AITTOLA, J.-P. 1990. Kuitupohjaisten pakkausmateriaalien polttaminen – kirjallisuusselvitys. Pakkausteknologiaryhmä. Raportti No. 26. 44 s.
- WILÉN, C., JUKOLA, P., JÄRVINEN, T., SIPILÄ, K., VERHOEFF, F. & KIEL, J. 2013. Wood torrefaction pilot tests and utilisation prospects. VTT Technology 122. Espoo: VTT. 73 s.
- WILÉN, C., MOILANEN, A. & KURKELA, E. 1996. Biomass feedstock analyses. VTT Publications 282. Espoo: VTT. 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. VTT Publications 394. Espoo: VTT. 117 s. + liitt. 8 s.
- VIRTANEN, K. 2011, Turvevarat, turvemaiden käyttö ja turpeen energiakäyttö Suomessa (energianäkökulma). Geologi 63 (2011), s. 82–90.
- VIRTANEN, K., HÄNNINEN, P., KALLINEN, R.-L., VARTIAINEN, S., HERRANEN, T. & JOKISAARI, R. 2003. Suomen turvevarat 2000. Tutkimusraportti 156. Espoo: Geologinen tutkimuskeskus. 102 s. + liitt. 101 s.
- VIRTANEN, R., RITALA, P. & LIND, M. 1984. Nalikkoiden tuotanto ja jakelu taajamissa. Kotimaisten polttoaineiden alueellinen hyväksikäyttö. Tutkimusraportti 38. Helsinki: Suomen itsenäisyyden juhluvuoden 1967 rahasto SITRA. 116 s. + liitt. 3 s.
- VOIPIO, R. & LAAKSO, T. 1992. Pienikokoisten puiden maanpäällisen biomassan kemiallinen koostumus. Folia Forestalia 789. Helsinki: Metla. 22 s.

- VON POST, L. 1922. Sveriges Geologiska Undersöknings torv-inventering och några av dess hittills vunna resultat. Svenska Mosskulturföreningens Tidsskrift 1, s. 1–27.
- WORLD COAL INSTITUTE. 2005. The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal. UK. 44 s.
- VÄHÄ-SAVO, N., SALONEN, M. & LEHTOVAARA, J. 2016. Heavy metal content in fuel peat. Proceedings of the 15th International Peat Congress, Kuching, Sarawak, Malaysia, 15–19 August 2016.
- YRJAS, P., SKRIFVARS, B.-J., HUPA, M., ROPPO, J., NYLUND, M. & VAINIKKA, P. 2005. Chlorine in deposits during co-firing of biomass, peat and coal in a full-scale CFBC boiler. Proceedings of 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Toronto, 22.–25.5.2005. S. 679–687.
- ZEVENHOVEN, M., YRJAS, P., SKRIFVARS, B.J. & HUPA, M. 2012. Characterization of Ash-Forming Matter in Various Solid Fuels by Selective Leaching and Its Implications for Fluidized-Bed Combustion. Energy Fuels, 26, 6366–6386.
- ZEVENHOVEN, M., YRJAS, P. & HUPA, M. 2010. Ash-Forming Matter and Ash-Related Problems. Teoksessa: Lackner, M., Winter, F. & Agarwal, A.K. (toim.) Handbook of Combustion Vol. 4: Solid Fuels. WILEY-VCH. S. 493–531.
- ÖHMAN, K. 1980. Kuoren poltto. Kotimaisten polttoaineiden käyttöön liittyvät turvallisuustekijät. Julkaisu 57-80. Helsinki: Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. 12 s.
- ÖHMAN, M. & NORDIN, A. 2000. The Role of Kaolin in Prevention of Bed Agglomeration during Fluidized Bed Combustion of Biomass Fuels. Energy & Fuels 2000, 14(3), 618–624.
- Ölly- ja biopolttoaineala, internetsivusto, 7.12.2015. (www.oil.fi)

Liite A. Kiinteisiin biopolttoaineisiin liittyvät standardit

Luettelo kiinteiden biopolttoaineiden ominaisuuksien määrittämiseen liittyvistä tärkeimmistä standardeista²

Ominaisuus	Standardi
Kokonaiskosteus saapumistilassa (M_{ar})	Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. SFS-EN ISO 18134-1 osa 1, 2 ja 3 Osa 1: Kokonaiskosteus. Vertailumenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. Osa 3: Yleisen analyysinäytteen kosteus.
Tuhkapitoisuus (A_d)	Kiinteät biopolttoaineet. Tuhkapitoisuuden määrittäminen. (SFS-EN ISO 18122)
Tehollinen lämpöarvo ($q_{p,net,d}$)	Solid biofuels. Method for the determination of calorific value (SFS-EN 14918/SFS-EN ISO 18125) – englanninkielinen
Palakokojakauma (P) ja hienoaineksen määrä (F)	Kiinteät biopolttoaineet. Palakokojakauman määrittäminen puristamattomille polttoaineille. Osa 1: Täryseulamenetelmä (oskilloiva) käyttäen 1 mm ja sen yli meneviä seulan aukkoja. (SFS-EN 15149-1/SFS-EN ISO 17827-1) Osa 2: Täryseulamenetelmä (värähtelevä) käyttäen 3,15 mm ja sen alle meneviä seulan aukkoja. (SFS-EN 15149-2/SFS-EN ISO 17827-2)
Pellettien pituus (L) ja halkaisija (D)	Kiinteät biopolttoaineet. Pellettien pituuden ja halkaisijan määrittäminen. (SFS-EN ISO 17829)
Irtotiheys (BD)	Kiinteät biopolttoaineet. Irtotiheyden määrittäminen. (SFS-EN ISO 17828)
Mekaaninen kestävyys (DU)	Kiinteät biopolttoaineet. Pellettien ja brikettien mekaanisen kestävyuden määrittäminen. Osa 1. Pelletit (SFS-EN ISO 17831-1) Osa 2. Briketit (SFS-EN ISO 17831-2)
Hiilen (C), vedyn (H) ja typen (N) pitoisuus	Solid biofuels. Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen - Instrumental methods (SFS-EN ISO 16948)
Rikin (S) ja kloorin (Cl) pitoisuus	Solid biofuels. Determination of total content of sulphur and chlorine (SFS-EN ISO 16994)
Vesiliukoisien kloridi- (Cl), natrium- (Na) ja kaliumpitoisuuden (K) määrittäminen	Solid biofuels. Determination of the water soluble chloride, sodium and potassium content (SFS-EN ISO 16995)
Pääalkuaineet (Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P ja Ti)	Solid biofuels. Determination of major elements, (SFS-EN ISO 16967)
Hivenaineet (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Te, V ja Zn)	Solid biofuels. Determination of minor elements, (SFS-EN ISO 16968)
Haihtuvat aineet (VM)	SFS-EN ISO 18123, Kiinteät biopolttoaineet. Haihtuvien aineiden määrittäminen
Analyysitulosten laskeminen eri tilaan	SFS-EN ISO 16993 Kiinteät biopolttoaineet – Analyysitulosten laskenta eri ilmoitusperustolle
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	SFS-CEN/TS 15370-1 Solid biofuels. Method for the determination of ash melting behaviour – Part 1: Characteristic temperatures method.

Lisäksi kiinteiden biopolttoaineiden laatuluokitteluun, laadunvarmistuksen ja näytteenoton ja -käsittelyn soveltamiseen tarvitaan seuraavia standardeja:

- SFS-EN 15234-1:2011, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laadunvarmistus. Osa 1: Yleiset vaatimukset
- SFS-EN 15234-4:2012, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laadunvarmistus. Osa 4: Puuhake ei-teollisuuskäyttöön
- SFS-EN 14778:2011/SFS-EN ISO 18135, Kiinteät biopolttoaineet. Näytteenotto
- SFS-EN 14780:2011/SFS-EN ISO 1478, Kiinteät biopolttoaineet. Näytteen esikäsittely

² Standardeista käytetään aina uusinta julkaistua versiota. Vuosien 2016–2017 aikana SFS-EN-standardit korvataan SFS-EN ISO -standardeilla, joiden numerot on lueteltu myös taulukossa.

- SFS-EN ISO 17225-1:2014, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 1: Yleiset vaatimukset
- SFS-EN ISO 17225-2:2014, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 2. Laatuluokitellut puupelletit
- SFS-EN ISO 17225-3:2014, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 3. Laatuluokitellut puubriketit
- SFS-EN ISO 17225-3:2014, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 4. Laatuluokiteltu puuhake
- SFS-EN ISO 17225-5:2014, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 5. Laatuluokiteltu polttopuu
- SFS-EN ISO 17225-6:2014, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 6. Laatuluokitellut ei-puumaisesta raaka-aineesta valmistetut pelletit
- SFS-EN ISO 17225-7:2014, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 7. Laatuluokitellut ei-puumaisesta raaka-aineesta valmistetut briketit
- SFS-EN ISO 17225-8, Kiinteät biopolttoaineet. Polttoaineen laatuvaatimukset ja luokat. Osa 8. Laatuluokitellut lämpökäsitellyt tiivistetyt biopolttoaineet (valmisteilla)

Liite B. Kierrätyspolttoaineiden standardit

Ominaisuus	Standardi
Kokonaiskosteus	SFS-EN 15414-3:2011, Solid recovered fuels. Determination of moisture content using the oven dry method. Part 3: Moisture in general analysis sample [Kosteuden määrittäminen uunikuivausmenetelmällä, Osa 3: Yleisen laboratorionäytteen kosteus] CEN/TS 15414-2:2010, Solid recovered fuels. Determination of moisture content using the oven dry method. Part 2: Determination of total moisture content by a simplified method
Tuhkapitoisuus	SFS-EN 15403:2011, Solid recovered fuels. Determination of ash content [Tuhkapitoisuuden määrittäminen]
Tehollinen lämpöarvo	SFS-EN 15400:2011, Solid recovered fuels. Determination of calorific value [Lämpöarvon määrittäminen]
Palakoko	SFS-EN 15415-1:2011, Solid recovered fuels. Determination of particle size distribution. Part 1: Screen method for small dimension particles [Palakokojakauman määrittäminen, Osa 1: Seulontamenetelmä pienille partikkeleille] SFS-EN 15415-2:2012, Solid recovered fuels. Determination of particle size distribution. Part 2: Maximum projected length method (manual) for large dimension particles [Palakokojakauman määrittäminen, Osa 2: Manuaalinen menetelmä suurimman kappaleen määrittämiseen] SFS-EN 15415-3:2012, Solid recovered fuels. Determination of particle size distribution. Part 3: Method by image analysis for large dimension particles [Palakokojakauman määrittäminen, Osa 3: Kuvankäsittelyn käyttö isojen kappaleiden määrittämiseen]
Irtotiheys	CEN/TS 15401:2010, Solid recovered fuels. Determination of bulk density [Irtotiheyden määrittäminen]
Hiilen (C), vedyn (H) ja typen (N) pitoisuus	SFS-EN 15407:2011, Solid recovered fuels. Methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) content [Hiilen, vedyn ja typen määrittäminen]
Rikin (S), kloorin (Cl), fluorin (F) ja bromin (Br) pitoisuus	SFS-EN 15408:2011 Solid recovered fuels. Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content [Rikin, kloorin, fluorin ja bromin määrittäminen]
Haittavat aineet	SFS-EN 15402:2011, Solid recovered fuels. Determination of the content of volatile matter [Haittuvien aineiden määrittäminen]
Pääalkuaineet (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti)	SFS-EN 15410:2011, Solid recovered fuels. Methods for the determination of the content of major elements [Pääalkuaineiden määrittäminen]
Hivenaineet (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Te, V ja Zn)	SFS-EN 15411:2011, Solid recovered fuels. Methods for the determination of the content of trace elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Ti, V and Zn) [Vähäisinä määrinä esiintyvien alkuaineiden määrittäminen]
Metallisen alumiinin määrittäminen	CEN/TS 15412:2010, Solid recovered fuels. Methods for the determination of metallic aluminium [Metallisen alumiinin määrittäminen]

Muut kierrätyspolttoainestandardit:

- SFS-EN 15358:2011, Kiinteät kierrätyspolttoaineet. Laadunhallintajärjestelmät. Kiinteiden kierrätyspolttoaineiden tuotantoon sovellettavat erityisvaatimukset
- SFS-EN 15359:2011, Kiinteät kierrätyspolttoaineet. Vaatimukset ja luokat
- SFS-EN 15413:2011, Solid recovered fuels. Methods for the preparation of the test sample from the laboratory sample [Testinäytteen valmistus laboratorionäytteestä]

- SFS-EN 15440:2011, Solid recovered fuels. Methods for the determination of biomass content [Biomassaosuuden määrittäminen]
- SFS-EN 15442:2011, Kiinteät kierrätyspolttoaineet. Näytteenottomenetelmät
- SFS-EN 15443:2011, Kiinteät kierrätyspolttoaineet. Laboratorionäytteen esikäsittelymenetelmät
- SFS-EN 15590:2011, Solid recovered fuels. Determination of the current rate of aerobic microbial activity using the real dynamic respiration index [Ajantasainen aerobisen mikrobiologisen aktiivisuuden määrittäminen reaaliaikaisella dynaamisella aktiivihiihi-indeksillä]
- CEN/TR 15404:2010, Solid recovered fuels. Methods for the determination of ash melting behaviour by using characteristic temperatures [Tuhkan sulamiskäyttäytymisen määrittäminen käyttämällä tunnistuslämpötiloja]
- CEN/TS 15405:2010, Solid recovered fuels. Determination of density of pellets and briquettes [Pellettien ja brikettien tiheyden määrittäminen]
- CEN/TS 15639:2010, Solid recovered fuels. Determination of mechanical durability of pellets

Liite C. Turpeen ja kivihiihen standardit

Ominaisuus	Standardi
Kokonaiskosteus saapumistilassa (M_{ar})	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Kivihilli:</i> ISO 589 Hard coal - Determination of total moisture, Analyysikosteus: ASTM D7582-15 (TGA-menetelmä) Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis
Tuhkapitoisuus (A)	<i>Turve:</i> Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Kivihilli:</i> ASTM D7582-1-15, tai ISO 17246:2010 Coal - Proximate analysis (kiinteä hiili, kosteus ja tuhka) ISO 17247:2013 Coal - Ultimate analysis (kosteus, tuhka, C, H, N, S)
Tehollinen lämpöarvo ($q_{p,net,d}$)	<i>Turve:</i> Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Turve ja kivihilli:</i> ISO 1929:2009: Solid mineral fuels. Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value
Palakokojakauma (P) ja hienoaineksen määrä (F)	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Kivihilli:</i> ISO 1953:1994 Hard coal - Size analysis by sieving
Irtotiheys (BD)	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A sekä määrittäminen ajoneuvossa: ISO 1013:1995: Coke - Determination of bulk density in a large container tai SS 187178 Standard meta description. Biofuels and peat - Determination of raw bulk density and calculation of dry raw bulk density in a large container
Kiintotiheys (DE), pelletit ja briketit	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A
Pellettien ja brikettien mekaaninen kestävyys (DU)	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A
Hiilen (C), vedyn (H) ja typen (N) pitoisuus	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A tai ISO 29541:2010. Solid mineral fuels-Determination of total carbon, hydrogen and nitrogen content - Instrumental method <i>Kivihilli:</i> ASTM D5373-8 Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal tai ISO 17247:2013
Rikin (S) ja kloorin (Cl) pitoisuus	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Kivihilli:</i> ASTM D 4239 Standard test methods for sulphur in the analysis sample of coal and coke using high temperature tube furnace combustion methods
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen	<i>Turve ja kivihilli:</i> ISO 540:2008, Solid Mineral fuels - Determination of fusibility of ash - High temperature tube method tai DIN 51730:2007-9 Determination of fusibility of fuel ash
Pääalkuaineet (Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P ja Ti)	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Kivihilli:</i> ISO/TS 13605:2012. Solid mineral fuels - Major and minor elements in hard coal ash and coke ash - Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometric method
Hivenaineet (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Te, V ja Zn)	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Kivihilli:</i> ks. edellä
Haihtuvat aineet (VM)	<i>Turve:</i> SFS-EN ISO 18123:2015. <i>Kivihilli:</i> ASTM D7582-15 tai ISO 562:2010: Hard coal and coke - Determination of volatile matter
Jauhautuvuus ja leipoutuvuus	<i>Kivihilli:</i> Jauhautuvuus: ISO 5074:2015 Hard coal - Determination of Hardgrove grindability index, Leipoutuvuus: ISO 501:2012 Hard coal - Determination of the crucible swelling number
Analyysitulosten laskeminen eri tilaan	<i>Turve:</i> ks. Kiinteät biopolttoaineet - standardit, liite A <i>Kivihilli:</i> ISO 1170:2013. Coal and coke -- Calculation of analyses to different bases

Liite D. Pyrolyysi- ja mineraaliöljyjen määrittämiseen liittyvät standardit

Ominaisuus	Standardi
Vesipitoisuus saapumistilassa (M_{ar})	<i>Pyrolyysiöljy</i> : ASTM E 203: 1996. Standard test method to water using volumetric Karl Fischer Titration. Easton, MD: American Society for Testing and Materials. <i>Mineraaliöljy</i> : ISO 3733:1999, Petroleum products and bituminous materials - Determination of water-Distillation method ja ISO 10336:1997, Crude petroleum - Determination of water - Potentiometric Karl Fischer titration method
Tuhkapitoisuus (A)	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljy</i> : EN ISO 6245:2011, Petroleum products - Determination of ash
Tehollinen lämpöarvo ($q_{p,net,d}$)	<i>Pyrolyysiöljy</i> : DIN 51900-3. 2003. Testing of solid and liquid fuels; determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value; method with the adiabatic jacket. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. <i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljy</i> : ASTM D240-14 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter
Hiilen (C), vedyin (H) ja typen (N) pitoisuus	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljy</i> : ASTM D 5291-92. Standard test methods for instrumental determination of carbon, hydrogen, and nitrogen in petroleum products and lubricants. Easton, MD: American Society for Testing and Materials.
Rikin (S) ja kloorin (Cl) pitoisuus	<i>Pyrolyysiöljy</i> : Mukautettu SFS-EN ISO 16994 ks. Liite A, ISO 10304-1:2007, Water quality - Determination of dissolved anions by liquid chromatography of ions - Part 1: Determination of bromide, chloride, fluoride, nitrate, nitrite, phosphate and sulfate <i>Pyrolyysiöljy/Rikki</i> : ISO 20846-2011 Petroleum products. Determination of sulfur content of automotive fuels. Ultraviolet fluorescence method tai ASTM D 5453-12 Standard Test Method for Determination of Total Sulfur in Light Hydrocarbons, Spark Ignition Engine Fuel, Diesel Engine Fuel, and Engine Oil by Ultraviolet Fluorescence <i>Mineraaliöljyt/Rikki</i> : EN ISO 8754:2003: Petroleum products - Determination of sulfur content -Energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry
Na, K, Ca, P, Cu, Zn	<i>Pyrolyysiöljy</i> : EN 16476:2014, Liquid petroleum products. Determination of Sodium, Potassium, Calcium, Phosphorus, Copper and Zinc contents in diesel fuel. Method via Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP OES)
V, Na ja Ni	<i>Mineraaliöljyt</i> : ISO 10478:1994, Petroleum products - Determination of aluminium and silicon in fuel oils - Inductively coupled plasma emission and atomic absorption spectroscopy methods
Kiintoaines	<i>Pyrolyysiöljy</i> : ASTM D 7579:2013. Standard test method for pyrolysis solids content in pyrolysis liquids by filtration of solids in methanol. Easton, MD: American Society for Testing and Materials.
Hiiltojäännös, MCR	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljyt</i> : ASTM D 4530-15. Standard test method for determination of carbon residue (Micro Method). Easton, MD: American Society for Testing and Materials tai ASTM D 189-(06):2014. Standard Test Method for Conradson Carbon Residue of Petroleum Products tai ISO 10370:2014. Petroleum products - Determination of carbon residue - Micro method
Happoluku	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljyt</i> ASTM D 664. Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration. Easton, MD: American Society for Testing and Materials.
Viskositeetti	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljy</i> : EN ISO 3104:1994/Cor. 1:1997 Petroleum products - Transparent and opaque liquids - Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity ASTM D 445-15a. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and the calculation of dynamic viscosity). Easton, MD: American Society for Testing and Materials.

Ominaisuus	Standardi
Leimahduspiste	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljy</i> : ISO 2719:2002, Determination of flash point-Pensky-Martens closed cup method tai ISO 9038:2013. Determination of sustained combustibility of liquids tai ASTM D 93-15a. Standard test method for flash point by Pensky-Martens closed tester. Easton, MD: American Society for Testing and Materials.
Jähmepiste	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljy</i> : ISO 3016:1994: Petroleum products - Determination of pour point tai ASTM D 97-16. Standard test method for pour point of petroleum oils. Easton, MD: American Society for Testing and Materials
Tiheys	<i>Pyrolyysi- ja mineraaliöljy</i> : EN ISO 12185:1996. Crude petroleum and petroleum products. Determination of density. Oscillating U-tube method tai ASTM D 4052-15. Standard test method for density and relative density of liquids by digital density meter. Easton, MD: American Society for Testing and Materials
Kokonaissedimentti	<i>Mineraaliöljy</i> : ISO 10307-1:2009: Petroleum products - Total sediment in residual fuel oils - Part 1: Determination by hot filtration
Asfalteenit	<i>Mineraaliöljy</i> : DIN 51595:2000-11, Testing of petroleum products - Determination of the content of asphaltenes - Precipitation with heptane
Pyrolyysiöljyn laatuokittelu	ASTM D 7544-11. Standard specification for pyrolysis liquid biofuel. Easton, MD: American Society for Testing and Materials.
	EN 16900 (valmisteilla): Fast pyrolysis bio-oils for industrial boilers – Requirements and test methods
	Tekninen raportti valmisteilla: Fast pyrolysis bio-oils for stationary internal combustion engines – Quality designation

Pyrolyysiöljylle useat standardimenetelmät eivät käy sellaisenaan, vaan on ehdotettu tiettyjä muutoksia. Joitakin standardeja ei voi käyttää, kuten leimahduspiste, suodatettavuus, tislattavuus ja samepiste. Lisätietoja Oasmaa & Peacocke 2010 ja Lehto et al. 2014.

Liite E. Kierrätyspuun ominaisuuksia

Taulukko E.1. Kierrätyspuun ominaisuuksia.

Ominaisuus	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	Näyte 6	Näyte 7
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg kuiva-aineessa	18,7	18,7	18,9	18,7		18,6	18,6
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%							
Tuhka	1,7	1,5	0,7		1,9	3	
Hiii, C	50,1	49,9				49,1	50
Vety, H	6,4	6,1				6	6,2
Typpi, N	0,5	0,5	0,25		0,68	1	0,1
Rikki, S	0,02	0,04	< 0,02		0,08	0,05	0,01
Kloori, Cl	0,035	0,03	0,034	0,018	0,12	0,08	
Fluori, F	< 0,002					< 0,01	
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, mg/kg							
Alumiini, Al	600	130		459			< 0,01
Rauta, Fe	490						
Kalium, K	Σ Na + K: 1 100	910	630		Σ Na + K: 2 200	728	1 200
Mangaani, Mn	72	76,7	84,6	80		94	74
Natrium, Na	Σ Na + K: 1 100	630	200		Σ Na + K: 2 200	625	120
Fosfori, P	49						
Arseeni, As	34	2,9	2,4	8	18	19	2
Kadmium, Cd	0,29	0,235	0,16		0,5	0,27	0,09
Kromi, Cr	39	9,3	5,2	27,3	60	39	6
Kupari, Cu	31	5,5	7	9,2	80	40	3
Elohopea, Hg	< 0,1	0,053	< 0,01		0,05	< 0,04	< 0,06
Nikkeli, Ni	< 4	3,2	3,3	8,9	10	9,7	2,1
Lyijy, Pd	26	14	5,4	65	76	62	3,9
Vanadiini, V	< 5	0,96	< 0,50	2,2	2	0,94	< 0,10
Sinkki, Zn	160	210	79	142	300	275	21

Taulukko E.2. Kierrätyspuun ominaisuuksia.

Ominaisuus	Näyte 8	Näyte 9	Näyte 10	Näyte 11	Näyte 12	Näyte 13	Näyte 14	Näyte 15
Kosteus, p-%	12,3	14,6	17,7	19,7	13,5	6,6	29,2	28,2
Kalorimetrisen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	20,18	20,28	19,95	20,11	20,00	19,56	20,01	20,05
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	18,93	19,02	18,6	18,76	18,75	18,34	18,7	18,88
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg ar	16,31	15,90	14,87	14,58	15,89	16,96	12,53	12,87
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%								
Haihtuvat aineet	80,8	81,3			81,2	80		79,9
Tuhka	1,9	1,2			1,3	1,0	1,7	3,1
Hilli, C			50,0	49,8			49,9	
Vety, H			6,2	6,2			6,0	
Typpi, N			0,1	0,6			0,19	
Rikki, S			0,01	0,03				0,03
Kloori, Cl	0,055	0,038	0,009	0,036			0,011	0,022
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, mg/kg								
Arseni, As	< 6	< 6	2	52	6,5	5,7	< 0,2	5
Kupari, Cu	11	4	3	40	5,3	7,4	2,4	12
Kromi, Cr	12	9,4	6	32	1,9	9,1	19	17
Alumiini, Al			< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Kalium, K			1 200	1 500	600	900	1 500	1 600
Mangaani, Mn			74	73	76	82	78	85
Natrium, Na			100	1 100	700	500	410	600
Kadmium, Cd	< 0,4	< 0,4		0,15	0,32	< 0,10	0,08	0,21
Elohopea, Hg	< 0,02	< 0,02	< 0,06	< 0,06	< 0,10	< 0,10	0,05	< 0,05
Nikkeli, Ni			2,1	1,7	1,2	1,9	6,7	5,9
Lyijy, Pd	11	<4	3,9	5,1	34	4,1	0,69	14
Vanadiini, V	< 2	< 2	< 0,1	0,33	1	0,53	1,3	< 0,1
Sinkki, Zn	60	40	21	58	150	170		240
Tina, Sn			0,15	0,39	0,25	1,2	< 0,5	< 0,10
Tallium, Tl			< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,2	< 0,10
Koboltti, Co			0,1	0,26	0,71	0,32	0,25	0,89
Antimoni, Sb			< 0,10	0,45	0,37	0,16	< 0,2	0,21

Taulukko E.3. Kierrätyspuun ominaisuuksia.

Ominaisuus	Näyte 16	Näyte 17	Näyte 18	Näyte 19	Näyte 20	Näyte 21	Näyte 22
Kosteus, p-%	24,0	21,2	24,0	12,2	27,0	22,3	19,1
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	19,94	20,02			20,28	19,60	20,07
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	18,68	18,79			19	18,37	18,81
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg ar	13,61	14,39	14,60		13,21	13,73	14,75
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%							
Haittavat aineet	81,3	79,7			84,3	81,8	83,3
Tuhka	1,0	1,6	1,5				
Vety, H	6,1						
Typpi, N	0,30	0,82		0,27			
Rikki, S	0,05	0,04		0,07			
Kloori, Cl	0,017	0,03	0,03	0,02	0,012	0,02	0,023
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, mg/kg							
Arseeni, As	0,65	0,31	2,9		< 0,10	8,8	15
Kupari, Cu	3,5	2,3	5,5		2,6	12	13
Kromi, Cr	5	3,9	9,3		35	20	27
Alumiini, Al	< 100	< 100	100	47	77	< 100	< 100
Kallium, K	400	400	Σ Na + K: 150	377			
Mangaani, Mn	70	69	76,7		66	95	79
Natrium, Na	200	140	Σ Na + K: 150	384			
Kadmium, Cd	0,51	0,19	0,24	< 0,2			
Elohopea, Hg	< 0,03	< 0,03	0,05	0,06			
Nikkeli, Ni	2,2	1,5	3,2		19	4,4	3,2
Lyijy, Pb	18	12	13,5		1,7	97	96
Vanadiini, V	< 0,10	2,7	1		0,52	4,2	2
Sinkki, Zn	610	87	210		27	230	170
Tina, Sn	0,26	0,24	0,4				
Tallium, Tl	< 0,10	< 0,10	0,12		< 0,10	< 0,01	< 0,01
Koboltti, Co	0,86	0,43	0,6		39	0,85	0,44
Antimoni, Sb	0,32	0,23	0,2		0,71	0,7	0,3

Taulukko E.4. Kierrätyspuun ominaisuuksia.

Ominaisuus	Näyte 23	Näyte 24	Näyte 25	Näyte 26	Näyte 27	Näyte 28	Näyte 29	Näyte 30
Kosteus, p-%	23,9	27,0	27,7	34,6	3,6	25,5	23,3	26,1
Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	21,34	19,80		19,71		20,53	19,90	20,30
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg k.a.	19,93	18,48		18,4		19,2	18,64	19,01
Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg ar	15,63	12,83		11,19		13,71	13,73	13,41
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, p-%								
Tuhka	4,8	3,2		3,9		1,4	2,1	1
Hilli, C	50,9	48,1		49,0	49,6	50,6	49,5	50,0
Vety, H	6,5	6,1		6,01	6,2	5,97	5,8	5,9
Typpi, N	1,00	2,87	0,04	1,16		0,23	1,51	0,27
Rikki, S	0,22	< 0,03	0,021	0,07	0,038	0,036	0,054	
Kloori, Cl	0,16	0,014	0,036	0,014	0,018	0,103	0,061	0,019
Fluori, F		< 0,005		< 0,005		< 30		
PITOISUUS KUIVA-AINEESSA, mg/kg								
Arseeni, As	23	1,6	25	< 0,8	54,18	< 0,8	4,3	1,6
Kupari, Cu	41	8	21	6	59	14	7	8
Kromi, Cr	40	5	30	3	65	3	7	6,7
Alumiini, Al	200	200		200		100		
Kalsium, Ca	9 100	2 830		4 660		2230		
Kalium, K	500	1 100	500	2 400	600	500	790	530
Rauta, Fe	1 070	810		780		350		
Magnesium, Mg	720	640		770		470		
Mangaani, Mn	100	110		240	57	66		98
Natrium, Na	600	600	600	1 000	1 000	300	620	330
Fosfori, P	100			340		26		
Kadmium, Cd	0,9	< 0,2	0,4	0,2	< 0,2	< 0,2	0,7	0,16
Elohopea, Hg	< 0,07	< 0,07	0,1	< 0,07	< 0,1	0,07	< 0,07	< 0,01
Nikkeli, Ni	4	3		2	< 2	2	1	1,8
Lyijy, Pb	37	2	13	2	5,7	3	36	4,1
Vanadiini, V	3	13		12	< 1	< 0,1		< 0,5
Sinkki, Zn	180	40	91	72	91	35	190	31
Tina, Sn	6	< 3		< 3	< 1	< 3		
Tallium, Tl	< 0,2	< 0,2		< 0,2	< 1	< 0,2		
Koboltti, Co	1	<1		< 1	<1	10		0,96
Antimoni, Sb	8	<1		< 1	0,9	<1		0,52
Barium, Ba	120	< 0,005			39	24		
Bromi, Br	< 5	< 0,005		< 0,005		< 50		
Seleen, Se					< 1			
Molybdeeni, Mo					< 2			

Liite F. Jyrsinturpeen ja palaturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia

Taulukko F.1. Jyrsinturpeen ominaisuuksia vuosilta 1985–1992 ja 1994–2005 (Electrowatt-Ekono Oy 2005).

Ominaisuus	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Keskiarvo
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	13 887	10 619	16 492	18 914	22 210	15 186	11 986	254 400
Kuiva-aineen tehollinen 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	20,6	20,7	20,7	20,7	20,9	21,0	20,8
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	46,9	46,1	46,5	44,9	45,0	47,0	48,5	47,1
Tehollinen 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	10,0	9,9	10,3	10,3	9,9	9,6	9,90
Kuiva-aineen tiheys, kg/m ³	173	170	171	169	176	173	176	171	176	178	178	179	178	175	175	173	177	177	170	165	175
Irtotiheys saapumistilassa, kg/m ³	345	337	344	346	342	328	340	337	332	331	330	333	333	330	325	323	321	321	321	320	330
Energiatehous, MWh/m ³	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	0,90	0,90	0,89	0,92	0,92	0,89	0,86	0,91
Kuiva-aineen tuhka-pitoisuus (815 °C), 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	6,4	5,9	6,8	6,3	5,8	5,9	5,7	5,8
Kuiva-aineen rikki-pitoisuus, p-%	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	0,20	0,22	0,21	0,21	0,22	0,31	0,22	0,21	0,22	0,21	0,21	0,22

* Vuoden 1993 turveaineistoa ei ole tilastoitu ja vuoden 2005 kuukausien touko-joulukuun käyttö määrä perustuu arvioihin ja muut ominaisuustiedot perustuvat tammi-huhtikuun aineistoihin.

Taulukko F.2. Palaturpeen keskimääräisiä ominaisuuksia vuosilta 1985–1992 ja 1994–2005 (Electrowatt-Ekono Oy 2005).

Ominaisuus	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Keski- arvo
Määrä, GWh	994	1 011	961	611	645	863	718	838	2 175	2 217	1 505	1 570	360	489	192	191	139	389	95	27	15 730
Kuiva-aineen tehollinen 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	21,9	21,9	21,5	21,3	22,1	20,7	20,7	21,2
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	41,8	39,0	37,0	35,3	34,5	35,4	35,2	39,5
Tehollinen 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	11,7	12,4	12,6	12,9	13,6	12,5	13,6	11,9
Kuiva-aineen tiheys, kg/m ³	238	230	227	230	242	237	231	233	231	239	239	242	234	218	223	226	225	228	226	233	233
Irtotihveys saapumistilassa, kg/m ³	397	390	394	391	387	382	381	392	389	386	387	389	387	374	366	358	348	348	350	360	385
Energiatihveys, MWh/m ³	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	1,21	1,26	1,26	1,25	1,31	1,22	1,36	1,27
Kuiva-aineen tuhka- pitoisuus, 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	4,2	3,6	3,4	2,9	2,8	2,9	2,7	4,8
Kuiva-aineen rikki- pitoisuus, p-%	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20	0,23	0,23	0,20

* Vuoden 1993 turveaineistoa ei ole tilastoitu ja vuoden 2005 kuukausien touko-joulukuun käyttömäärä perustuu arvioihin ja muut ominaisuusiedot perustuvat tammi-huhtikuun aineistoihin.

Liite G. Turvepolttoaineiden laatuluokitus

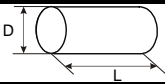
Taulukko G.1. Laatuluokat briketeille (NT ENVIR 009:fi).

Päätaulukko		
Alkuperä		Puhdas energiaturve tai seos seuraavista: SFS-EN ISO 17225-1:2014 standardin taulukon 1 mukaan määritetty puu- tai kasvibiomassa. Jokaisen jakeen osuus on ilmoitettava.
Kauppanimike (katso taulukko 6.1)		Briketti
Mitat (mm), Halkaisija (D) tai vastaava (vinohalkaisija tai poikkileikkaus)		
D40	$25 \leq D \leq 40$	
D50	$40 < D \leq 50$	
D60	$50 < D \leq 60$	
D80	$60 < D \leq 80$	
D100	$80 < D \leq 100$	
D125	$100 \leq D \leq 125$	
D125+	≥ 125 , todellinen arvo ilmoitettava	
Pituus (L)		
L50	≤ 50	
L100	≤ 100	
L200	≤ 200	
L300	≤ 300	
Kosteus (p-% saapumistilassa)		
M10	$\leq 10\%$	
M15	$\leq 15\%$	
M20	$\leq 20\%$	
Tuhka (p-% kuiva-aineesta)		
A2.0	$\leq 2,0\%$	
A4.0	$\leq 4,0\%$	
A6.0	$\leq 6,0\%$	
A8.0	$\leq 8,0\%$	
A10.0	$\leq 10\%$	
A10.0+	$> 10,0\%$, todellinen arvo ilmoitettava	
Rikki (p-% kuiva-aineesta)		
S0.15	$\leq 0,15\%$	
S0.20	$\leq 0,20\%$	
S0.25	$\leq 0,25\%$	
S0.30	$\leq 0,30\%$	
S0.35	$\leq 0,35\%$	
S0.40	$\leq 0,40\%$	
S0.45	$\leq 0,45\%$	
S0.50	$\leq 0,50\%$	
S0.50+	$> 0,50\%$, todellinen arvo ilmoitettava	
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg (= MWh/t)) ^a		
Q18.0	$\geq 18,0$ ($\geq 5,0$ MWh/t)	täyttää M10-kosteusvaatimukset
Q16.2	$\geq 16,2$ ($\geq 4,5$ MWh/t)	täyttää M15-kosteusvaatimukset
Q14.4	$\geq 14,4$ ($\geq 4,0$ MWh/t)	täyttää M20-kosteusvaatimukset
Lisäaineet (p-% puristusmassasta)		
Puristuksen apuaineiden, kuonaantumisen estoaineiden ja muiden mahdollisten lisäaineiden, kuten polynestoaineiden, tyyppi ja määrä on ilmoitettava.		

Velvoittavat

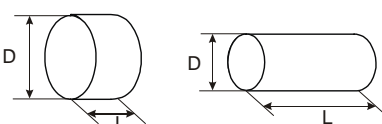
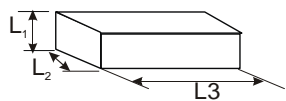
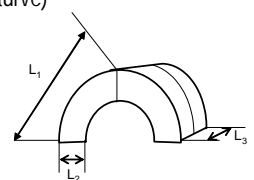
Opastavat	Typpi, (p-% kuiva-aineesta)	
	N1.0	≤ 1,0 %
	N1.5	≤ 1,5 %
	N2.0	≤ 2,0 %
	N2.5	≤ 2,5 %
	N3.0	≤ 3,0 %
	N3.0+	> 3,0 %, todellinen arvo ilmoitettava
	Kiintotiheys (kg/dm ³)	
	DE0.8	0,80–0,99 kg/dm ³
	DE1.0	1,00–1,09 kg/dm ³
DE1.1	1,10–1,19 kg/dm ³	
DE1.2	≥ 1,20 kg/dm ³	
Irtotiheys saapumistilassa (kg/irto-m ³)	Suositellaan ilmoitettavaksi, jos kauppa käydään tilavuuden perusteella.	
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (hapettava ilmakehä), muodonmuutoslämpötila (DT), °C	DT on suositeltavaa ilmoittaa, jos lämpötila on < 1 100 °C. HUOM: Kaikki tyypilliset lämpötilat ja käytetyt testausmenetelmät (ISO tai EN) on suositeltavaa ilmoittaa.	
Kloori, Cl (p-% kuiva-aineesta)	Klooripitoisuus on suositeltavaa ilmoittaa jonain seuraavista laatuluokista: Cl 0.03, Cl 0.05, Cl 0.07, Cl 0.10 tai Cl 0.10+ (jos Cl > 0,10 %, todellinen arvo ilmoitettava).	
^a Tehollisen lämpöarvon (kuiva-aineesta) vähimmäisvaatimus ≥ 18 MJ/kg. Jos turve jyrsitään ennen puristusta, se on ilmoitettava.		

Taulukko G.2. Laatuluokat turvepelleteille (NT ENVIR 009).

	Päätaulukko		
	Alkuperä		Puhdas energiaturve tai seos seuraavista SFS-EN ISO 17225-1:2014 standardi taulukon 1 mukaan määritetty puu- tai kasvibiomassa. Jokaisen jakeen osuus on ilmoitettava.
	Kauppanimike (katso taulukko 6.1)		Pelletti
Velvoittavat	Mitat (mm)		
	Halkaisija (D) ja pituus (L) ^a		
	D06	6 mm ± 0,5 mm ja L ≤ 5 x halkaisija	
	D08	8 mm ± 0,5 mm ja L ≤ 5 x halkaisija	
	D10	10 mm ± 0,5 mm ja L ≤ 5 x halkaisija	
	D12	12 mm ± 1,0 mm ja L ≤ 5 x halkaisija	
	D14	14 mm ± 1,0 mm ja L ≤ 5 x halkaisija	
	D25	25 mm ± 1,0 mm ja L ≤ 4 x halkaisija	
	Kosteus (p-% saapumistilassa)		
	M10	≤ 10 %	
	M15	≤ 15 %	
	M20	≤ 20 %	
	Tuhka (p-% kuiva-aineesta)		
	A2.0	≤ 2,0 %	
	A4.0	≤ 4,0 %	
	A6.0	≤ 6,0 %	
	A8.0	≤ 8,0 %	
	A10.0	≤ 10 %	
	A10.0+	> 10,0 %, todellinen arvo ilmoitettava	
	Rikki (p-% kuiva-aineesta)		
S0.15	≤ 0,15 %		
S0.20	≤ 0,20 %		
S0.25	≤ 0,25 %		
S0.30	≤ 0,30 %		
S0.35	≤ 0,35 %		
S0.40	≤ 0,40 %		
S0.45	≤ 0,45 %		
S0.50	≤ 0,50 %		
S0.50+	> 0,50 %, todellinen arvo ilmoitettava		
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg (= MWh/t)) ^b			
Q18.0	≥ 18,0 (≥ 5,0 MWh/t)	täyttää M10-kosteusvaatimukset	
Q16.2	≥ 16,2 (≥ 4,5 MWh/t)	täyttää M15-kosteusvaatimukset	
Q14.4	≥ 14,4 (≥ 4,0 MWh/t)	täyttää M20-kosteusvaatimukset	
Mekaaninen kestävyys (p-% pelleteistä testauksen jälkeen)			
DU95.0	≥ 95,0 %		
DU90.0	≥ 90,0 %		
DU90.0-	≤ 90,0 %, todellinen arvo ilmoitettava		
Hienoaineksen määrä (p-%, < 3,15 mm) tehtaan portilla ^b			
F2.0	≤ 2,0 %	^b viimeisessä paikassa, jossa näytteitä voidaan käytännössä ottaa	
F4.0	≤ 4,0 %		
F4.0+	> 4,0 %, todellinen arvo ilmoitettava		
Lisäaineet (p-% puristusmassasta)			
Puristuksen apuaineiden, kuonaantumisen estoaineiden ja muiden mahdollisten lisäaineiden, kuten pölynestoaineiden, tyyppi ja määrä on ilmoitettava.			

Opastavat	Typpi, (p-% kuiva-aineesta)	
	N1.0	≤ 1,0 %
	N1.5	≤ 1,5 %
	N2.0	≤ 2,0 %
	N2.5	≤ 2,5 %
	N3.0	≤ 3,0 %
	N3.0+	> 3,0 %, todellinen arvo ilmoitettava
	Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (hapettava ilmakehä), muodonmuutoslämpötila (DT) °C	DT on suositeltavaa ilmoittaa, jos lämpötila on < 1 100 °C. HUOM: Kaikki tyyppilliset lämpötilat ja käytetyt testausmenetelmät (ISO tai EN) on suositeltavaa ilmoittaa.
	Kloori, Cl (p-% kuiva-aineesta)	Klooripitoisuus on suositeltavaa ilmoittaa jonain seuraavista laatuluokista: Cl 0.03, Cl 0.05 tai Cl 0.07, Cl 0.10 tai Cl 0.10+ (jos Cl > 0,10 %, todellinen arvo ilmoitettava).
	Irtotiheys saapumistilassa (kg/irto-m ³)	Suosittelavaa ilmoittaa, mikäli pellettejä myydään tilavuuden mukaan. BD 500, BD 600, BD 700
<p>^a Enintään 20 p-% pelleteistä saa olla pituudeltaan 7,5 x halkaisija.</p> <p>^b Tehollisen lämpöarvon (kuiva-aineesta) vähimmäisvaatimus ≥ 18 MJ/kg.</p> <p>Jos turve jyrsitään ennen puristusta, se on ilmoitettava.</p>		

Taulukko G.3. Laatuluokat palaturpeelle (NT ENVIR 009).

Velvoittavat	Päätaulukko			
	Alkuperä		Turve	
	Kauppanimike (ks taulukko 6.1)		Palaturve (Taulukko 6.1)	
	Mitat (mm) ^a			
	Muoto		Halkaisija (D) / pituus (L)	
			P40	$\leq 40 \text{ mm}$ ja $L \leq 5 \times$ halkaisija
			P60	$\leq 60 \text{ mm}$ ja $L \leq 5 \times$ halkaisija
			P80	$\leq 80 \text{ mm}$ ja $L \leq 5 \times$ halkaisija
	kuutio		P30	$L_1 \leq 30 \text{ mm}$, $L_2 \leq 40 \text{ mm}$ $L_3 \leq 200 \text{ mm}$
				
	kaari (lainepalaturve)		P70	$L_1 \leq 250 \text{ mm}$, $L_2 \leq 70 \text{ mm}$ $L_3 \leq 250 \text{ mm}$
				
	Ylisuuret kappaleet (% painosta), ylisuurien rakeiden enimmäispaino yksittäisessä kuormassa			
	OP0.5	$\leq 0,5 \%$		
	OP1.0	$\leq 1,0 \%$		
	Ylisuuret kappaleet, yksittäisen rakeen suurin mita ja suurimpien mittojen summa (mm)			
	MD300	300 mm ja suurimpien mittojen summa 450 mm		
	MD500	500 mm ja suurimpien mittojen summa 700 mm		
	MD700	700 mm ja suurimpien mittojen summa 900 mm		
	Kosteus (p-% saapumistilassa)			
M30	$20 \leq M \leq 30 \%$			
M38	$25 \leq M \leq 38 \%$			
M47	$30 \leq M \leq 47 \%$			
M55	$40 \leq M \leq 55 \%$			
Tuhka (p-% kuiva-aineesta)				
A2.0	$\leq 2,0 \%$			
A4.0	$\leq 4,0 \%$			
A6.0	$\leq 6,0 \%$			
A8.0	$\leq 8,0 \%$			
A10.0	$\leq 10 \%$			
A10.0+	$> 10,0 \%$, todellinen arvo ilmoitettava			
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg (= MWh/t)) ^{b, c}				
Q14.0	$\geq 14,0$ ($\geq 3,9 \text{ MWh/t}$)	täyttää M30-kosteusvaatimukset		
Q12.0	$\geq 12,0$ ($\geq 3,3 \text{ MWh/t}$)	täyttää M38-kosteusvaatimukset		
Q10.0	$\geq 10,0$ ($\geq 2,8 \text{ MWh/t}$)	täyttää M47-kosteusvaatimukset		
Q8.0	$\geq 8,0$ ($\geq 2,2 \text{ MWh/t}$)	täyttää M55-kosteusvaatimukset		
tai energiatiheys saapumistilassa (E) (MWh/irto-m ³)				
E1.30	$\geq 1,30 \text{ MWh/irto-m}^3$	täyttää M30-kosteusvaatimukset		
E1.15	$\geq 1,15 \text{ MWh/irto-m}^3$	täyttää M38-kosteusvaatimukset		
E1.00	$\geq 1,00 \text{ MWh/irto-m}^3$	täyttää M47-kosteusvaatimukset		
E0.80	$\geq 0,80 \text{ MWh/irto-m}^3$	täyttää M55-kosteusvaatimukset		

Velvoittavat	Hienoaineksen määrä (p-%, < 20 mm P40–P80-luokissa ja < 5 mm P30-luokassa) tuotannon jälkeen tehtaan portilla	
	F5.0	≤ 5,0 %
	F10.0	≤ 10,0 %
	F15.0	≤ 15,0 %
	F15.0+	> 15,0 %, todellinen arvo ilmoitettava
	Rikki (p-% kuiva-aineesta)	
	S0.15	≤ 0,15 %
	S0.20	≤ 0,20 %
	S0.25	≤ 0,25 %
	S0.30	≤ 0,30 %
S0.35	≤ 0,35 %	
S0.40	≤ 0,40 %	
S0.45	≤ 0,45 %	
S0.50	≤ 0,50 %	
S0.50+	> 0,50 %, todellinen arvo ilmoitettava	
Opastavat	Typpi (p-% kuiva-aineesta)	
	N1.0	≤ 1,0 %
	N1.5	≤ 1,5 %
	N2.0	≤ 2,0 %
	N2.5	≤ 2,5 %
	N3.0	≤ 3,0 %
	N3.0+	> 3,0 %, todellinen arvo ilmoitettava
Irtotiheys saapumistilassa (kg/irto-m ³)	Suositeltavaa ilmoittaa, jos palaturvetta myydään tilavuuden mukaan jossain seuraavista laatuluokista: (BD280, BD300), enintään BD550.	
Kloori, Cl (p-% kuiva-aineesta)	Klooripitoisuus on suositeltavaa ilmoittaa jonain seuraavista laatuluokista: Cl 0.03, Cl 0.05 tai Cl 0.07, Cl 0.10 tai Cl 0.10+ (jos Cl > 0,10 %, todellinen arvo ilmoitettava).	
Tuhkan sulamiskäyttätyminen (hapettava ilmakehä), muodonmuutoslämpötila (DT) °C	DT on suositeltavaa ilmoittaa, mikäli lämpötila on < 1 100 °C. HUOM: Kaikki tyypilliset lämpötilat ja käytetyt testausmenetelmät (ISO tai CEN) on suositeltavaa ilmoittaa.	
<p>^a Lainepalaturpeen piirros esittää turpeen tuotantovaihetta. Toimitettava turvepala hajotetaan 2–4 osaan.</p> <p>^b Valitaan joko tehollinen lämpöarvo saapumistilassa tai energiatiheys.</p> <p>^c Tehollisen lämpöarvon (kuiva-aineesta) vähimmäisvaatimus ≥ 18 MJ/kg.</p>		

Taulukko G.4. Laatuokat jyrsinturpeelle (NT ENVIR 009).

	Päätaulukko		
	Alkuperä		
	Turve		
	Kauppanimike (ks. taulukko 6.1)		
	Jyrsinturve		
Velvoittavat	Ylisuuret rakeet ^a		
	Ylisuuret kappaleet (OP), paino (p-%), ylisuurien kappalaiden enimmäispaino yksittäisessä kuormassa		
	OP0.5	≤ 0,5 %	
	OP1.0	≤ 1,0 %	
	Ylisuuret kappaleet, yksittäisen kappaleen suurin mitta ja suurimpien mittojen summa (mm)		
	MD400	400 mm ja suurimpien mittojen summa 600 mm	
	MD750	750 mm ja suurimpien mittojen summa 1000 mm	
	MD1000	1000 mm ja suurimpien mittojen summa 1500 mm	
	Kosteus (p-% saapumistilassa) (liite E)		
	M45	40 ≤ M ≤ 45 %	yksittäisessä kuormassa enintään 50 %, vähintään 38 %
	M50	40 ≤ M ≤ 50 %	yksittäisessä kuormassa enintään 55 %, vähintään 38 %
	M55	45 ≤ M ≤ 55 %	yksittäisessä kuormassa enintään 60 %, vähintään 38 %
	M60	50 ≤ M ≤ 60 %	yksittäisessä kuormassa enintään 65 %, vähintään 38 %
	Tuhka (p-% kuiva-aineesta)		
	A2.0	≤ 2,0 %	
	A4.0	≤ 4,0 %	
	A6.0	≤ 6,0 %	
	A8.0	≤ 8,0 %	
	A10.0	≤ 10,0 %	
	A10.0+	> 10,0 %, todellinen arvo ilmoitettava	
	Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg ^b = MWh/t)		
	Q10.0	≥ 10 MJ/kg (≥ 2,8 MWh/t)	täyttää M45-kosteusvaatimukset
	Q8.0	≥ 8 MJ/kg (≥ 2,2 MWh/t)	täyttää M50-kosteusvaatimukset
Q6.0	≥ 6 MJ/kg (≥ 1,7 MWh/t)	täyttää M55-kosteusvaatimukset	
Q5.0	≥ 5 MJ/kg (≥ 1,4 MWh/t)	täyttää M60-kosteusvaatimukset	
Q5.0-	< 5,0 MJ/kg (< 1,4 MWh/t)	kosteuspitoisuus ≥ 60 p-%	
tai energiatiheys (E) (MWh/irto-m ³) ^c			
E0.8	≥ 0,8 MWh/irto-m ³	täyttää M45-kosteusvaatimukset	
E0.7	≥ 0,7 MWh/irto-m ³	täyttää M50-kosteusvaatimukset	
E0.5	≥ 0,5 MWh/irto-m ³	täyttää M55-kosteusvaatimukset	
E0.4	≥ 0,4 MWh/irto-m ³	täyttää M60-kosteusvaatimukset	
Rikki (p-% kuiva-aineesta)			
S0.15	≤ 0,15 %		
S0.20	≤ 0,20 %		
S0.25	≤ 0,25 %		
S0.30	≤ 0,30 %		
S0.35	≤ 0,35 %		
S0.40	≤ 0,40 %		
S0.45	≤ 0,45 %		
S0.50	≤ 0,50 %		
S0.50+	> 0,50 %, todellinen arvo ilmoitettava		
Tuhkan sulamiskäyttäytyminen (hapettava ilmakehä), muodonmuutoslämpötila (DT) °C			
DT on suositeltavaa ilmoittaa, jos lämpötila on < 1 100 °C.			
HUOM: Kaikki tyypilliset lämpötilat ja käytetyt testausmenetelmät (ISO tai EN) on suositeltavaa ilmoittaa.			

Liite H. Kivihiilen ominaisuuksia

Taulukko H.1. Kivihiilien polttoaineominaisuuksia (Taipale 1996).

Maa		Kosteus	Tuhka	Haihtuvat aineet	Kalorim. lämpöarvo	Teholl. lämpöarvo	Teholl. lämpöarvo saap.til.	Kiinteä hiili	Hard-grove-indeksi	Leipoutuvuus-indeksi	Koksausjäännös
		p-%	p-% k.a.		MJ/kg k.a.		MJ/kg ar	p-% k.a.			p-% k.a.
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	38,0	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	

ka = analyysitulosten keskiarvo
lkm = analysoitujen näytteiden lukumäärä
min = analyysitulosten minimiarvo
max = analyysitulosten maksimiarvo

k.a. = kuiva-aineessa
ar = as received = saapumistilassa

Taulukko H.2. Kivihiilien polttoaineominaisuuksia (Taipale 1996).

Maa		Kosteus	Tuhka	Haihtuvat aineet	Kalorim. lämpöarvo	Teholl. lämpöarvo	Teholl. lämpöarvo saap.til.	Kiinteä hiili	Hard-grove-indeksi	Leipoutuvuus-indeksi	Koksausjäännös
		p-%	p-% k.a.		MJ/kg k.a.		MJ/kg ar	p-% k.a.			p-% k.a.
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	16,0	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		22,70	49,9	43		
	lkm	1	1	1	1		1	1	1		
	min	11,5	13,2	36,9	26,9		22,70	49,9	43		
	max	11,5	13,2	36,9	26,9		22,70	49,9	43		
Kiina	ka	10,5	10,9	30,2			25,60	52			
	lkm	3,0	3	3			3	3			
	min	7,8	9	28,6			25,30	50			
	max	12,5	13,7	32			26,10	56			
Indonesia	ka	23,8	1,4	48,4	29,56	28,40	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	24,0	1,6	49,9	29,58	28,43	21,17	48,8	43,8		

ka = analyysitulosten keskiarvo
lkm = analysoitujen näytteiden lukumäärä
min = analyysitulosten minimiarvo
max = analyysitulosten maksimiarvo

k.a. = kuiva-aineessa
ar = as received = saapumistilassa

Taulukko H.3. Kivihilien alkuainepitoisuuksia, p-% kuiva-aineessa (Taipale 1996).

Maa		Hiihi, C	Vety, H	Typpi, N	Rikki, S	Kloori, Cl	Fluoridi, F	Fosfori, P
Puola	ka	70,1	4,4	1,1	0,91	0,12	0,008	
	lkm	30	30	33	521	20	2	
	min	59,1	3,9	0,7	0,57	0,10	0,007	
	max	80,8	4,7	1,4	1,7	0,24	0,008	
Venäjä	ka	70,9	4,5	1,8	0,55	0,022	0,007	0,020
	lkm	7	7	7	196	4	2	1
	min	67,1	4,3	1,5	0,22	0,009	0,006	0,020
	max	75,9	4,7	2,1	2,30	0,03	0,008	0,020
Kolumbia	ka	77,1	4,5	1,4	0,73	0,04		
	lkm	5	5	5	8	2		
	min	72,9	3,1	1,3	0,62	0,03		
	max	80,5	5,2	1,5	0,88	0,04		
Englanti	ka	72,8	4,7	1,3	1,61	0,17		
	lkm	12	12	12	8	3		
	min	70,9	4,6	1,2	1,16	0,10		
	max	75,5	4,7	1,5	2,50	0,24		
Venezuela	ka	78,0	5,2	1,6	0,7	0,032		
	lkm	3	4	4	4	3		
	min	76,2	4,8	1,4	0,5	0,021		
	max	80,4	5,4	1,7	1,0	0,040		
Australia	ka	74,7	4,0	1,6	0,31	0,07		0,008
	lkm	1	1	1	3	1		1
	min	74,7	4,0	1,6	0,27	0,07		0,008
	max	74,7	4,0	1,6	0,34	0,07		0,008

ka = analyysitulosten keskiarvo

lkm = analysoitujen näytteiden lukumäärä

min = analyysitulosten minimiarvo

max = analyysitulosten maksimiarvo

Taulukko H.4. Kivihiiilen metallipitoisuuksia, mg/kg kuiva-aineessa (Taipale 1996).

Maa		Elohopea, Hg	Lyijy, Pb	Kadmium, Cd	Koboltti, Co	Arseeni, As	Vanadiini, V	Nikkeli, Ni	Kromi, Cr
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	0,17	7,8	2,0	50	21	12,0
	max	0,18	30,0	0,30	7,8	6,2	50	21	29,0
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	0,12	4,6	6,0	20	16	18,0
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	0,13	1,3	1,0	14	8,5	7,0
	max	0,07	5,0	0,20	1,3	5,0	14	8,5	10,0
Englanti	ka	0,14	12,0	0,80		13,0			13,0
	lkm	1	1	1		1			1
	min	0,14	12,0	0,80		13,0			13,0
	max	0,14	12,0	0,80		13,0			13,0
Venezuela	ka	0,04	2,0	0,10		6,0			3,0
	lkm	1	1	1		1			1
	min	0,04	2,0	0,10		6,0			3,0
	max	0,04	2,0	0,10		6,0			3,0
Yhdys- vallat	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	4,0	23	11	13,0
	max	0,19	20,0	0,21	3,8	5,5	23	11	18,0

ka = analyysitulosten keskiarvo

lkm = analysoitujen näytteiden lukumäärä

min = analyysitulosten minimiarvo

max = analyysitulosten maksimiarvo

Taulukko H.5. Kivihiliien tuhkien sulamiskäyttäytymistä, °C (Taipale 1996).

Maa		Hapettavassa atmosfäärissä DIN 51730				Pelkistävässä atmosfäärissä DIN 51730			Hapettavassa atmosfäärissä ASTM D 1857			
		DT	ST	HT	FT	ST	HT	FT	DT	ST	HT	FT
Puola	ka		1 237	1 412	1 442				1 317	1 358	1 389	1 425
	lkm		397	397	397				19	19	19	19
	min		1 180	1 290	1 320				1 245	1 285	1 325	1 360
	max		1 300	1 550	1 580				1 385	1 410	1 325	1 360
Venäjä	ka		1 213	1 377	1 406				1 280	1 323	1 383	1 455
	lkm		48	48	48				2	2	2	2
	min		1 014	1 260	1 310				1 210	1 230	1 320	1 450
	max		1 280	1 520	1 530				1 350	1 415	1 445	1 460
Kolumbia	ka	1 233	1 296	1 337	1 382				1 295	1 352	1 384	1 407
	lkm	2	2	2	2				2	2	2	2
	min	1 227	1 288	1 322	1 362				1 274	1 338	1 865	1 387
	max	1 238	1 304	1 352	1 402				1 316	1 366	1 402	1 427
Englanti	ka				1 450				1355	1 375	1 390	1 400
	lkm				2				1	1	1	1
	min				1 400				1 355	1 375	1 390	1 400
	max				1 500				1 355	1 375	1 390	1 400
Venezuela	ka	1 263	1 337	1 382					1 292	1 370	1 395	1 440
	lkm	1	2	2					4	4	4	4
	min	1 263	1 322	1 362					1 210	1 255	1 295	1 380
	max	1 263	1 352	1 402					1 430	1 455	1 470	1 500
Australia	ka				1 590	1 550	1 580	1 580				
	lkm				1	1	1	1				
	min				1 590	1 550	1 580	1 580				
	max				1 590	1 550	1 580	1 580				
Kanada	ka	1 250	1 322	1 369					1 270	1 290	1 400	1 460
	lkm	1	1	1					1	1	1	1
	min	1 250	1 322	1 369					1 270	1 290	1 400	1 460
	max	1 250	1 322	1 369					1 270	1 290	1 400	1 460

ka = analyysitulosten keskiarvo

lkm = analysoitujen näytteiden lukumäärä

min = analyysitulosten minimiarvo

max = analyysitulosten maksimiarvo

Taulukko H.6. Kivihilien tuhkan koostumuksia, p-% kuiva-aineessa (Taipale 1996).

Maa		CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	SiO ₂	SO ₂	P ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	BaO
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	3,0	1,8	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
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 = analyysitulosten keskiarvo

lkm = analysoitujen näytteiden lukumäärä

min = analyysitulosten minimiarvo

max = analyysitulosten maksimiarvo

Liite I. Tilastokeskuksen polttoaineiden luokitus

Luokka	Polttoaine	Polttoaine- kohtainen määräyksikkö	CO ₂ -oletus- päästökerroin, t/TJ	Oletushapetus- kerroin	Tehollinen oletuslämpö- arvo, GJ/yksikkö
1	FOSSIILISET POLTTOAINEET				
111	KAASUT				
1111	Jalostamokaasu	t	54,0	0,995	50,0
1112	Nestekaasu	t	64,9	0,995	46,3
1119	Muu kaasu	t	65,0	0,995	8–55
112	KEVYET ÖLJYT				
1121	Teollisuusbenssiini	t	72,7	0,995	44,3
1122	Moottoribensiini	t	69,4	1,0	41,9
1123	Lentobensiini	t	71,3	1,0	43,7
113	KESKIRASKAAT ÖLJYT				
1131	Lentopetroli	t	73,2	1,0	43,3
1132	Muut petrolit	t	71,5	0,995	43,1
1133	Dieselöljy	t	65,5	1,0	43,2
1134	Kevyt polttoöljy, vähärikkinen	t	73,5	0,995	43,0
1135	Kevyt polttoöljy, rikiton (ent. moottoripolttoöljy)	t	73,5	0,995	43,0
1139	Muut keskiraskaat öljyt	t	74,1	0,995	42,7
114	RASKAAT ÖLJYT				
1141	Raskas polttoöljy, rikkipitoisuus < 1 %	t	79,2	0,995	40,4
1142	Raskas polttoöljy, rikkipitoisuus ≥ 1 %	t	78,4	0,995	40,2
1143	Muut raskaat öljyt	t	79,2	0,995	40,2
1144	Raskas polttoöljy, rikkipitoisuus ≤ 0,1 %	t	76,1	0,995	42,1
115	ÖLJYKOKSI	t	97,0	0,995	33,5
116	KIERRÄTYS- JA JÄTEÖLJYT	t	78,8	0,995	41,0
119	MUUT ÖLJYUOTTEET	t	78,8	0,995	30,0
12	HIILI				
121	Kivihiili ja antrasiitti				
1211	Antrasiitti	t	98,3	0,99	33,5
1212	Kivihiili	t	93,3	0,99	25,0
122	Muu hiili				
1221	Puolibituminen hiili, ruskohiili	t	108,0	0,99	20,0
1222	Hiilibriketit	t	94,6	0,99	30,0

Luokka	Polttoaine	Polttoaine- kohtainen määräyksikkö	CO ₂ - oletuspäästö- kerroin, t/TJ	Oletushapetus- kerroin	Tehollinen oletuslämpö- arvo, GJ/yksikkö
1228	Hiiliterva	t	90,6	0,99	37,0
1229	Muu erittelemätön hiili	t	108,0	0,99	10,0
123	Koksi	t	108,0	0,99	29,3
124	Koksikaasu	1 000 m ³	41,5	0,99	16,7
125	Masuunikaasu	1 000 m ³	263,7	0,99	3,8
126	CO-kaasu	1 000 m ³	155,0	0,99	11,5
13	Maakaasu				
131	Maakaasu				
1311	Maakaasu	1 000 m ³	55,04	0,995	36,0
1312	Nesteytetty maakaasu (LNG)	t	55,8	0,995	49,3
2	TURVE				
21	Turve				
211	Jyrsinturve	t	105,9	0,99	10,1
212	Palaturve	t	102,0	0,99	12,3
213	Turvepelletit ja -brikitit	t	97,0	0,99	18,0
3	UUSIUTUVAT JA SEKAPOLTTOAINEET				
31	BIOMASSA				
311	Metsäpolttoaine, puu				
3111	Halot, rangat ja pilkkeet	t	109,6*	0,99	14,0
3112	Kokopuu- tai rankahake	t	109,6*	0,99	9,5
3113	Metsätähdehake tai -murske	t	109,6*	0,99	10,0
3114	Kantomurske (aik. kantohake)	t	109,6*	0,99	11,5
3115	Energiapaju (ja muu lyhytkiertoviljelty puu)	t	109,6*	0,99	10,0
312	Teollisuuden puutähde				
3121	Kuori	t	109,6*	0,99	7,5
3122	Sahanpuru	t	109,6*	0,99	7,0
3123	Puutähdehake tai -murske	t	109,6*	0,99	10,5
3124	Kutterilastut, hiontapöly yms.	t	109,6*	0,99	17,0
3128	Erittelemätön teollisuuden puutähde	t	109,6*	0,99	7,5
3129	Muu teollisuuden puutähde	t	109,6*	0,99	8,8
313	Puunjalostusteollisuuden jäteliemet	t _{ka}		0,99	11,5

Luokka	Polttoaine	Polttoaine-kohtainen määräyksikkö	CO ₂ -oletuspäästökertoim t/TJ	Oletushapetuskerroin	Tehollinen oletuslämpöarvo, GJ/yksikkö
314	Puunjalostusteollisuuden sivu- ja jätetuotteet				
3141	Mäntyöljy ja -piki	t	77,0*	0,99	37,0
3142	Metanoli ja tärpähti	t	70,0*	0,99	19–45
3149	Muut puunjalostusteollisuuden sivu- ja jätetuotteet	TJ	109,6*	0,99	
315	Kierrätyspuu	t	109,6*	0,99	12,0
316	Puupelletit ja -briketit	t	109,6*	0,99	16,0
317	Kasviperäiset polttoaineet				
3171	Ruokohelvi	t	110,0*	0,99	13,0
3172	Viljakasvit ja olki	t	100,0*	0,99	13,5
3174	Kasviöljyt ja -rasvat	t	72,0*	0,99	37,0
3179	Muut kasviperäiset polttoaineet	t	100,0*	0,99	15,0
318	Eläinperäiset polttoaineet				
3181	Eläinrasvat	t	75,0*	0,99	37,0
3189	Muut eläinperäiset polttoaineet	t	100,0*	0,99	15,0
32	MUUT BIO- JA SEKAPOLTTOAINEET				
321	Biokaasu				
3211	Kaatopaikkakaasu	1 000 m ³	56,1*	0,99	17,0
3212	Jätevedenpuhdistamoiden biokaasu	1 000 m ³	56,1*	0,99	23,0
3213	Teollisuuden biokaasu	1 000 m ³	56,1*	0,99	28,0
3214	Biometaani	1 000 m ³	56,1*	0,99	36,0
3215	Synteettinen biokaasu	1 000 m ³	56,1*	0,99	36,0
3219	Muut biokaasut	1 000 m ³	56,1*	0,99	20,0
322	Biopoltonesteet				
3221	Biopoltoöljy	t	75,0*	0,99	38,5
3222	Biopyrolyysiöljy	t	79,6*	0,99	17,0
3223	Bionestekaasu / Biopropani	t	65,0*	0,99	46,2
3229	Muut nestemäiset biopolttoaineet	t	79,6*	0,99	15–40
323	Sekapolttoaineet				
3231	Kierrätyspolttoaineet	t	31,8 bio-osuus 60 %	0,99	20,0
3232	Purkupuu	t	11,4 bio-osuus 90 %	0,99	15,0
3233	Kyllästetty puu	t	11,4 bio-osuus 90 %	0,99	12,0
3234	Siistausliete	t	60,0*	0,99	4,0
3235	Jätepelletit	t	45,0 bio-osuus 45 %	0,99	15,0

Luokka	Polttoaine	Polttoaine-kohtainen määräyksikkö	CO ₂ -oletuspäästökertoim t/TJ	Oletushapetuskerroin	Tehollinen oletuslämpöarvo, GJ/yksikkö
3236	Kumijätteet	t	68,0 bio-osuus 25 %	0,99	28,0
3238	Yhdyskuntajäte / sekajäte	t	40,0 bio-osuus 50 %	0,99	10,0
3239	Muut sekapolttoaineet	t	100,0 bio-osuus 10 %	0,99	10,0
324	Tuotekaasu	1 000 m ³	..	0,99	..
325	Bioliete	t	109,6*	0,99	2,5
326	Biohiili	t	109,6*	0,99	18–33
491	MUUT POLTTOAINEENA KÄYTETTÄVÄT SIVU- JA JÄTETUOTTEET				
4911	Muovijätteet	t	74,1	0,99	25,0
4913	Ongelmajätteet	t	117,0	0,99	10,0
4919	Muut jätteet	t	75,0	0,99	15,0

* Biopolttoaine, jonka hiilidioksidipäästöjä ei lasketa Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästömäärään.

Sekapolttoaineiden CO₂-kerroin on arvio, joka ottaa huomioon vain fossiilisen hiilen osuuden. Siistauslietteen energiasisältö bio-osuudella 100 % ja CO₂-päästö aiheutuu karbonaattien hajoamisesta.

Tarkista aina voimassa oleva luokitus internetistä (www.tilastokeskus.fi/polttaineluokitus).

Nimeke	Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia
Tekijä(t)	Eija Alakangas, Markus Hurskainen, Jaana Laatikainen-Luntama & Jaana Korhonen
Tiivistelmä	<p>Tämä julkaisu on yhteenveto Suomessa käytettävien polttoaineiden keskeisistä ominaisuuksista. Julkaisuun on koottu puun, turpeen, kivihiilen, peltobio-massojen, eläinperäisten tähteiden, kierrätyspolttoaineiden, lietteiden, maakaasun, biokaasun sekä mineraali- ja bioöljyjen ominaisuuksia. Tiedot ovat peräisin kirjallisista lähteistä, tutkimuslaitoksista ja yrityksistä sekä VTT:n analyysilaboratorioiden määrittämisistä.</p> <p>Ominaisuuksiin liittyviä määritelmiä on kerätty mm. puupolttoaineiden, turpeen ja kierrätyspolttoaineiden laatustandardeista sekä tämän julkaisun viitteistä. Polttoaineiden analyysimenetelmät kuvataan alan yleisesti käyttämien menetelmien mukaisesti. Julkaisuun on koottu myös keskeiset, kuhunkin polttoaineanalyysiin sovellettavat standardit.</p> <p>Polttoaineiden tärkeimmät ominaisuudet ovat lämpöarvo, polttoaineen kemiallinen koostumus (elementaarianalyysi), kosteus, tuhkapitoisuus, tuhkan koostumus ja sulamiskäyttäytyminen, tiheys, jauhautuvuus, viskositeetti sekä muut käsittelytekniset ominaisuudet.</p> <p>Julkaisussa käsitellään erilaisten puupolttoaineiden, mustalipeän, turpeen, peltobiomassojen, kierrätyspolttoaineiden, lietteiden, kivihiilen, mineraali- ja bioöljyjen sekä kaasumaisten polttoaineiden ominaisuuksia.</p> <p>Julkaisussa esitellään myös kiinteiden biopolttoaineiden näytteenottomenetelmiä ja laskentakaavoja. Lopuksi vertaillaan polttoaineiden ominaisuuksia sekä kuvataan niiden vaikutuksia polttoon ja kaasutukseen. Julkaisussa ei käsitellä liikenteen polttoaineita. Teollisuuden prosessikaasuja käsitellään hyvin lyhyesti. Kotimaisten polttoaineiden osalta kuvataan myös polttoaineiden tuotantotekniikkaa ja potentiaaleja.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8418-5 (nid.) ISBN 978-951-38-8419-2 (URL: http://www.vtt.fi/julkaisut) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (Painettu) ISSN 2242-122X (Verkkajulkaisu) http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8419-2
Julkaisu-aika	Toukokuu 2016
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	229 s. + liitt. 30 s.
Projektin nimi	
Rahoittajat	
Avainsanat	ominaisuudet, polttoaineet, puu, turve, peltobiomassat, kivihiili, kierrätyspolttoaineet, näytteenotto, analyysimenetelmät
Julkaisija	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111

Title	Properties of fuels used in Finland
Author(s)	Eija Alakangas, Markus Hurskainen, Jaana Laatikainen-Luntama & Jaana Korhonen
Abstract	<p>The properties of fuels used in Finland have been studied in this publication based both on the literature and the research carried out at VTT and other research institutes and universities. Also data from the fuel and energy industry has been collected. The transportation fuels are not included.</p> <p>The main properties of the fuels discussed in this publication are calorific value, chemical composition, moisture content, density, grindability and other fuel handling properties, ash content, ash melting behaviour and ash composition, and concentrations of harmful substances, such as alkali and heavy metals.</p> <p>The properties of different kinds of fuels, such as wood fuels, peat, agrobiomasses, sludges, coal, oils, and gaseous fuels are presented in the form of tables. The material contains both commercial fuels and fuels under research. The definitions for the 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. 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 in Finland. At the end of the publication there are analysis of the properties how they effect to combustion and gasification. Appendices include lists of standards, fuel specifications of milled and sod peat, and peat pellets. Also additional data of peat, used wood and coal is given.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8418-5 (Soft back ed.) ISBN 978-951-38-8419-2 (URL: http://www.vttresearch.com/impact/publications) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-1211 (Print) ISSN 2242-122X (Online) http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8419-2
Date	May 2016
Language	Finnish, English abstract
Pages	229 p. + app. 30 p.
Name of the project	
Commissioned by	
Keywords	properties, fuels, sampling, analysis methods, wood, peat, coal, agrobiomass, oils, fossil fuels
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111

Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia

Tämä julkaisu on yhteenveto Suomessa käytettävien polttoaineiden keskeisistä ominaisuuksista. Julkaisuun on koottu puun, turpeen, kivihiilen, peltobiomassojen, eläinperäisten tähteiden, kierrätyspolttoaineiden, lietteiden, maakaasun, biokaasun sekä mineraali- ja bioöljyjen ominaisuuksia. Tiedot ovat peräisin kirjallisista lähteistä, tutkimuslaitoksista ja yrityksistä sekä VTT:n analyysilaboratorioiden määrittämisistä.

Polttoaineiden analyysimenetelmät kuvataan alan yleisesti käyttämien menetelmien mukaisesti. Julkaisussa esitellään myös kiinteiden biopolttoaineiden näytteenottomenetelmiä ja laskenta-kaavoja. Julkaisun lopussa analysoidaan ominaisuuksien vaikutuksia polttoon ja kaasutukseen.

ISBN 978-951-38-8418-5 (nid.)
ISBN 978-951-38-8419-2 (URL: <http://www.vtt.fi/julkaisut>)
ISSN-L 2242-1211
ISSN 2242-1211 (Painettu)
ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu)
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8419-2>