LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

*Jani Roitto*

# PUUHAKKEEN KÄSITTELY- JA POLTTO-OMINAISUUKSIEN PARANTAMINEN

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Tutkimusassistentti, DI Kari Luostarinen
Työn ohjaaja: Projektipäällikkö, DI Anniina Kontiokorpi

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikka

Jani Roitto

**Puuhakkeen käsittely- ja poltto-ominaisuuksien parantaminen**

Diplomityö

2014

117 sivua, 35 kuvaa ja 8 taulukkoa

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Tutkimusassistentti, DI Kari Luostarinen
Ohjaaja: Projektipäällikkö, DI Anniina Kontiokorpi

Hakusanat: Biopolttoaine, puu, hake, kuivaaminen, seulonta

Nykyaikana yhteiskunta tavoittelee uusiutuvaa ja ympäristöä säästävää energiantuotantoa. Biopolttoaineiden käyttö vähentää fossiilisten polttoaineiden osuutta energiantuotannossa. Jotta biopolttoaineilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, biopolttoaineita täytyy jalostaa. Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää puuhakkeen jalostuksen merkitystä hakkeen käytölle ja kannattavuudelle.

Hakkeen kuivaamisella ja seulonnalla voidaan parantaa hakkeen käsittely- ja poltto-ominaisuuksia. Kosteuden ja tasalaatuisuuden merkitys suurenee, kun haketta käytetään pienissä kattiloissa. Pienissä kattiloissa lämmöntuotannon hyötysuhde pienenee merkittävästi kosteuden suurentuessa. Tällöin polttoaineen kulutus ja energiantuotantokustannukset suurenevat. Suuremmissa kattiloissa hyvälaatuisella hakkeella on mahdollista korvata kalliimpia vara- ja huippukuormapolttoaineita, kuten öljyä. Tällöin fossiilisten polttoaineiden osuus pienenee. Lisäksi kuivaaminen ja seulominen ovat edullisia jalostusprosesseja esimerkiksi pelletin tuotantoon verrattuna.

# ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Energy Technology

Jani Roitto

**Improvement of combustion and processing properties of woodchips**

Master's thesis

2014

117 pages, 35 figures and 8 tables

Examiners: Prof (Tech) Esa Vakkilainen
M.Sc (Tech) Kari Luostarinen
Supervisor: M.Sc (Tech) Anniina Kontiokorpi

Keywords: Biofuel, wood, chip, drying, sieving

Currently society strives for renewable and environmental friendly energy production. Use of biofuels reduces the share of fossil fuels of energy production. In order to reduce fossil fuels, biofuels must be refined. The purpose of this master's thesis is to investigate the importance of woodchip refining for the use and profitability.

The combustion properties of woodchips can be improved by drying and sieving the woodchips. Moisture content and homogeneous of particles is more significant when woodchips are used in small boilers. The efficiency of small boilers decreases significantly when the moisture content of woodchips increase. Thus fuel consumption and the cost of energy production increase. In larger boilers high quality woodchips can replace more expensive standby and peak load fuels like oil, in which case the share of fossil fuels in energy production decreases. In addition, drying and sieving of woodchips are inexpensive refining processes, for example, compared to pellet production.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Parikkalan kunnassa kevään ja kesän 2014 aikana. Haluan kiittää työni aikana yhteistyössä olleita henkilöitä Parikkalan kunnasta ja Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta. Kiitän erityisesti innovatiivisesta ja asiantuntevasta tuesta.

Osoitan kiitokseni neuvoista ja työni ohjaamisesta Anniina Kontiokorvelle. Opetuksesta kiitän kaikkia minua opettaneita henkilöitä ja erityisesti työni tarkastajia Esa Vakkilaista ja Kari Luostarista. Kiitän Parikkalan kunnan henkilöstöä mahdollisuudesta suorittaa diplomityöni asiantuntevassa ja kannustavassa ilmapiirissä. Kiitän myös muita kunnantoiminnassa mukana olleita vaikuttajia.

Suurimmat kiitokseni osoitan jatkuvasta tuesta ja kannustamisesta avopuolisolleni Veera Europaeukselle. Veeran tuki on ollut kantava voima opintojeni edetessä. Veera on antanut tukea perheessäni, opinnoissani ja työssä Parikkalan kunnassa. Yhteistyöllä Veeran kanssa olemme voittaneet haasteet ja saavuttaneet tutkintomme kunnialla loppuun. Kiitän myös opiskelukavereitani opiskelujeni ajoilta. Haluan kiittää myös perhettäni neuvoista, opeista ja tuesta koko elämäni ajalta.

18.8.2014 Parikkalassa

Jani Roitto

# SISÄLLYSLUETTELO

**Tiivistelmä** **2**

**Abstract** **3**

**Alkusanat** **4**

**Sisällysluettelo** **5**

**Symboli- ja lyhenneluettelo** **8**

**1 Johdanto** **9**

1.1 Taustat ..... 9

1.2 Tavoitteet ..... 9

1.3 Rajaus ..... 10

1.4 Tutkimusmenetelmät ..... 10

**2 Parikkalan kunta** **12**

**3 Energiantuotanto Parikkalan lähialueilla** **13**

3.1 Energiantuotanto Parikkalan kunnassa ..... 14

3.1.1 Kaukolämpö ..... 15

3.1.2 Muut energianlähteet ..... 17

3.2 Energiantuotanto Etelä-Karjalassa ..... 17

3.3 Energiantuotanto naapurimaakunnissa ..... 19

**4 Hakkeen ominaisuudet ja laatu** **21**

4.1 Lämpöarvo ..... 21

4.2 Kosteus ..... 21

4.3 Rakenne ..... 22

4.4 Tiheys ..... 23

**5 Raaka-aine, varastointi ja luonnonkuivaus** **24**

5.1 Raaka-aineen lähteet ..... 24

5.2 Varastointi ..... 27

5.2.1 Varaston sijainti ..... 28
5.2.2 Varastokasan ladonta ja peittäminen ..... 28
5.3 Kosteuden muutos varastoinnissa ..... 31

**6 Haketus** **33**
6.1 Rumpuhakkuri ..... 34
6.2 Laikkahakkuri ..... 35
6.3 Ruuvihakkuri ..... 38
6.4 Yhteenveto hakkureista ..... 39

**7 Hakkeen keinokuivaus ja kuivauslaitteistot** **40**
7.1 Kylmä- ja lämminilmakuivaus ..... 42
7.2 Kuivauksen jatkuvuuteen perustuva jaottelu ..... 43
7.2.1 Panoskuivaus ..... 43
7.2.2 Jatkuvatoiminen kuivaus ..... 45
7.3 Kuivurin geometriaan perustuva jaottelu ..... 47
7.3.1 Rumpukuivuri ..... 48
7.3.2 Hihnakuivuri ..... 50
7.3.3 Kaskadikuivuri ..... 52
7.3.4 Pneumaattinen kuivuri ..... 54
7.3.5 Kerroskuivaus ..... 54
7.3.6 Yhteenveto kuivureista ..... 56

**8 Keinokuivaamisen energiankulutus** **57**
8.1 Veden poistaminen ..... 57
8.1.1 Lämmönkulutus ..... 59
8.1.2 Sähkönkulutus ..... 60
8.2 Esimerkkilaskelma ilmakuivauksen energiankulutukselle ..... 61
8.2.1 Laskelmien oletukset ..... 61
8.2.2 Kuivaustapahtuma Mollier-piirroksessa ja toiminta-arvot ..... 62
8.2.3 Lämmönkulutus ..... 66
8.2.4 Sähkönkulutus ..... 68

**9 Hakkeen seulonta ja tasalaatuisuus 70**

9.1 Seulontamenetelmät ..... 71

9.2 Seulonnan vaikutukset ..... 72

9.3 Seulajakeiden hyödyntäminen ..... 74

**10 Hakkeen käyttökohteet ja energiantuotanto 75**

10.1 Kosteuden vaikutus energiantuotantoon ..... 75

10.2 Kodin ja maatalouden lämpökattilat ..... 78

10.3 Lämmöntuotanto keskisuurissa ja pienissä lämpölaitoksissa ..... 82

10.4 Energiantuotanto suurissa voimalaitoksissa ..... 84

**11 Priimatun hakkeen tuotannon kannattavuus 86**

11.1 Kuivauksen kustannustarkastelu ..... 87

11.2 Kuivatun hakkeen käytön kustannustarkastelu ..... 91

11.2.1 Omakotitalon hakkeen käytön kustannustarkastelu ..... 92

11.2.2 Pienen lämpölaitoksen hakkeen käytön kustannustarkastelu ..... 95

11.3 Priimauksen kannattavuus ..... 97

11.4 Priimatun hakkeen markkinapotentiaali ..... 102

**12 Johtopäätökset 105**

**13 Yhteenveto 110**

**Lähdeluettelo 112**

# SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

## Kreikkalaiset aakkoset

| | |
|---|---|
| ω | Absoluuttinen kosteus |
| φ | Suhteellinen kosteus |

## Alaindeksit

| | |
|---|---|
| id | Ideaalinen |
| k | Kuiva |

## Lyhenteet

| | |
|---|---|
| E-K | Etelä-Karjala |
| E-S | Etelä-Savo |
| HINKU | Kohti hiilineutaalia kuntaa |
| LTO | Lämmöntalteenotto |
| Metla | Metsäntutkimuslaitos |
| PSK | Puun syiden kyllästymispiste |
| P-K | Pohjois-Karjala |
| VOC | Haihtuva orgaaninen yhdiste |
| VTT | Valtion teknillinen tutkimuskeskus |

# 1 JOHDANTO

Energia- ja ilmastopolitiikan merkitys yhteiskunnalle on kasvanut maailmanlaajuisesti viime aikoina. Yleinen suuntaus yhteiskunnan ajattelutavalle on suosia uusiutuvaa energiaa ja pienentää ehtyvien energianlähteiden kulutusta sekä hillitä hiilidioksidin ja muiden haitallisten päästöjen tuotantoa. Päästöjen vähentäminen ja energiankäytön tehostaminen on käynnistänyt useita hankkeita. Tämä diplomityö tehdään osana Parikkalan kunnassa toteutettavaa Biotalouden kehittäminen Parikkalassa -hanketta.

## 1.1 Taustat

Euroopan unioni on asettanut jäsenvaltioilleen päästövähennystavoitteet, joissa myös Suomi on mukana. Suomessa toteutetaan hankkeita, joiden tarkoitus on vähentää päästöjä ja pienentää ehtyvien luonnonvarojen kulutusta. Parikkalan kunta on yksi viidestä Kohti hiilineutraalia kuntaa -hankkeen eli HINKU-hankkeen alkuperäisjäsenkunnista. Kyseisen hankkeen jäsenkunnat ovat sitoutuneet pienentämään päästöjään 80 prosentilla vuoteen 2030 mennessä (Suomen ympäristökeskus 2013). Aiemmin mainittu Biotalouden kehittäminen Parikkalassa -hanke on osa HINKU-hanketta Parikkalassa.

Biotaloushankkeen tarkoituksena on edistää biotalouden kehittymistä Parikkalassa. Tavoitteena on säilyttää Parikkalassa olemassa olevat työpaikat ja yritykset, sekä kehittää uusia liiketoiminta- ja sivuelinkeinomahdollisuuksia alueelle. Tällöin myös Parikkalan alueen työpaikkojen määrän oletetaan kasvavan. Biotaloushanke on jaettu kolmeen aihealueeseen, jotka ovat biohiili, biokaasu ja energiapuu. Hankeen tarkoituksena on selvittää kyseisten polttoaineiden alueellista merkitystä kunnan alueelle ja lähialueille. Polttoaineiden valmistamiseen tarvittaville laitoksille on tarkoitus löytää toimijat ja sijoittajat. Hankeen rahoittajina ovat Etelä-Karjalan liitto, Parikkalan kunta ja yksityisrahoittajat. Hanke on käynnistynyt Parikkalassa vuonna 2013.

## 1.2 Tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää hakkeen laadun parantamiseen liittyviä tekijöitä. Tutkielmassa selvitetään hyvälaatuisen eli priimatun hakkeen valmistamiseen, käyttöön ja muuhun käsittelyyn liittyviä laitteisto- ja olosuhdevaatimuksia. Työssä esi-

tetään laitteistoja hakkeen käsittelylle sekä tutkitaan eriävien laitekokonaisuuksien toiminnan tehokkuutta sekä käyttöominaisuuksia. Työn tavoitteena on selvittää erilaatuisten hakkeiden käsittelyyn liittyviä ominaisuuksia. Työn tarkoituksena on toteuttaa laaja kokonaisuus hakkeen käytön ominaisuuksista.

Tutkimustyön tarkoituksena on tukea ja edistää Parikkalassa meneillä olevia energiahankkeita. Työ tuottaa tietoa lähialueiden toimijoille puuperäisten polttoaineiden ominaisuuksista ja tuotannon mahdollisuuksista Parikkalassa ja lähialueilla. Tämä tutkimus auttaa polttoaineiden tuottajia ja käyttäjiä valitsemaan sopivia laitteistoja polttoaineiden käsittelyyn. Lisäksi työ tukee toimijoiden investointipäätösten tekemistä.

## 1.3 Rajaus

Diplomityössä keskitytään erityisesti hakkeen valmistukseen, raaka-aineen varastointiin ja polttoon liittyviin ominaisuuksiin. Työ ei sisällä merkittävästi markkinointiin, raaka-aineiden saatavuuteen ja lopputuotteiden markkinapotentiaaliin liittyvää tutkimustyötä. Työ sisältää energiateknisiä kustannustarkasteluja hakkeen kuivaukselle ja käytölle. Työssä käsitellään erityisesti pientä ja keskisuurta käyttöä. Isojen voimalaitoskokoluokan kattiloiden käsittely on vähäisempää. Kuivauksen osalta työssä keskitytään erityisesti ilmakuivaukseen, jossa lämmönsiirto hakkeen ja ilman välillä tapahtuu konvektion vaikutuksesta.

## 1.4 Tutkimusmenetelmät

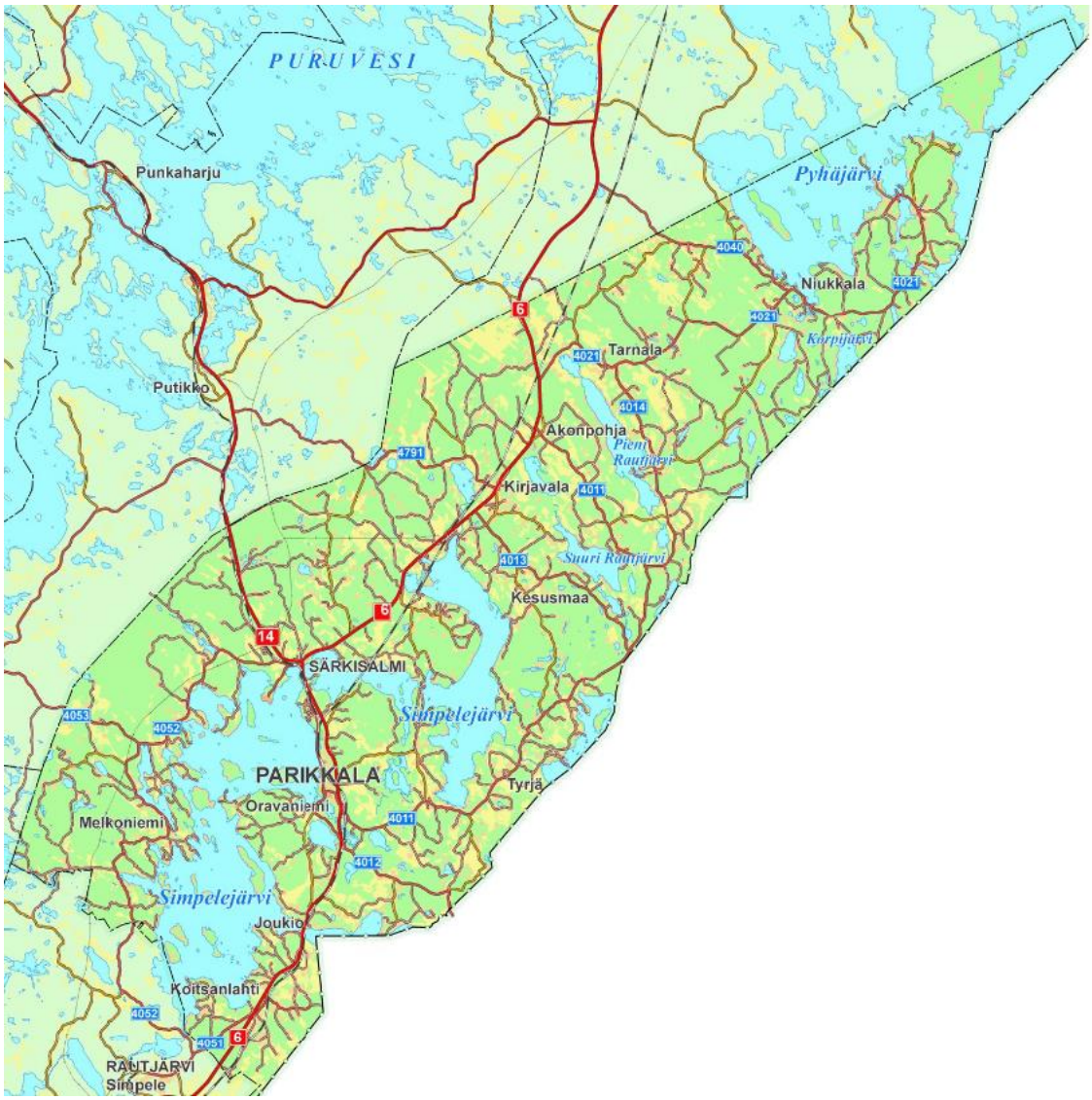
Diplomityö pohjautuu kattavaan paikalliseen ja kansainväliseen lähdemateriaaliin. Paikallisissa lähdemateriaaleissa käsitellään Parikkalaa ja naapurimaakuntia. Osa paikallisesta lähdemateriaalista on tehty Parikkalassa meneillä olevia hankkeita varten, jolloin niiden sisältämä materiaali kohdistuu hyvin tutkimuksen kohteena oleviin asioihin. Työssä käytetään myös muiden vastaavien energiahankkeiden materiaalia.

Tämä diplomityö toteutetaan Parikkalan kunnalle, jossa Biotalouden kehittäminen Parikkalassa –hankeelle on perustettu useita verkostoituneita hankeryhmiä. Tämän diplomityön ohella hankkeessa tehdään toinen diplomityö (Europaeus 2014), joka keskittyy biohiilen tuotantoon. Kyseinen tutkielma käsittelee muun muassa puuraaka-aineen saa-

tavuutta Parikkalassa ja lähialueella. Europaeuksen työssä selvitetään käytettävät kuljetusmuodot sekä arvioidaan raaka-aineen hankinnasta syntyviä kustannuksia. Europaeuksen tutkielma suoritetaan samanaikaisesti tämän tutkielman kanssa.

# 2 PARIKKALAN KUNTA

Parikkalan kunta sijoittuu entiseen Etelä-Suomen läänin ja Etelä-Karjalan maakuntaan. Parikkala sijaitsee maakunnan koillisosassa ja rajoittuu idästä Venäjän rajaan. Parikkalan kunnan kokonaispinta-ala on 760,9 km$^2$, josta vesistöä on 167,7 km$^2$. (Parikkalan kunta 2014.) Kunnan rajat ovat esitetty kuvassa 2.1.

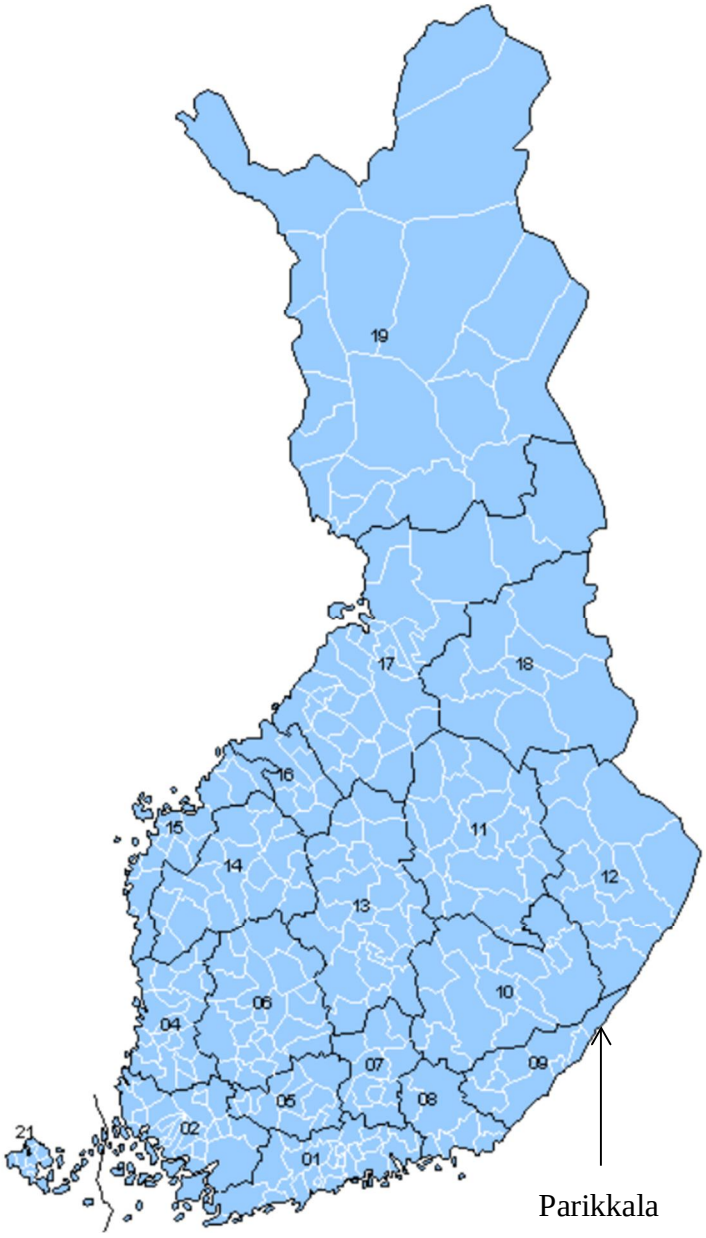



**Kuva 2.1.** Parikkalan kunnan rajat ja kulkuyhteydet (Karttatiimi Oy 2014).

# 3 ENERGIANTUOTANTO PARIKKALAN LÄHIALUEILLA

Parikkalan kunta on Etelä-Karjalan maakunnan pohjoisin kunta. Parikkalan kunnan rajat rajoittuvat Etelä-Karjalan maakuntaan kuuluvaan Rautjärven kuntaan, Etelä-Savon maakuntaan kuuluvaan Savonlinnan kaupunkiin, Pohjois-Karjalan maakuntaan kuuluvaan Kiteen kaupunkiin ja Venäjän valtioon. Maakunnat ja kuntarajat ovat esitetty kuvassa 3.1.

01 Uusimaa
02 Varsinais-Suomi
04 Satakunta
05 Kanta-Häme
06 Pirkanmaa
07 Päijät-Häme
08 Kymenlaakso
09 Etelä-Karjala
10 Etelä-Savo
11 Pohjois-Savo
12 Pohjois-Karjala
13 Keski-Suomi
14 Etelä-Pohjanmaa
15 Pohjanmaa
16 Keski-Pohjanmaa
17 Pohjois-Pohjanmaa
18 Kainuu
19 Lappi
21 Ahvenanmaa - Åland

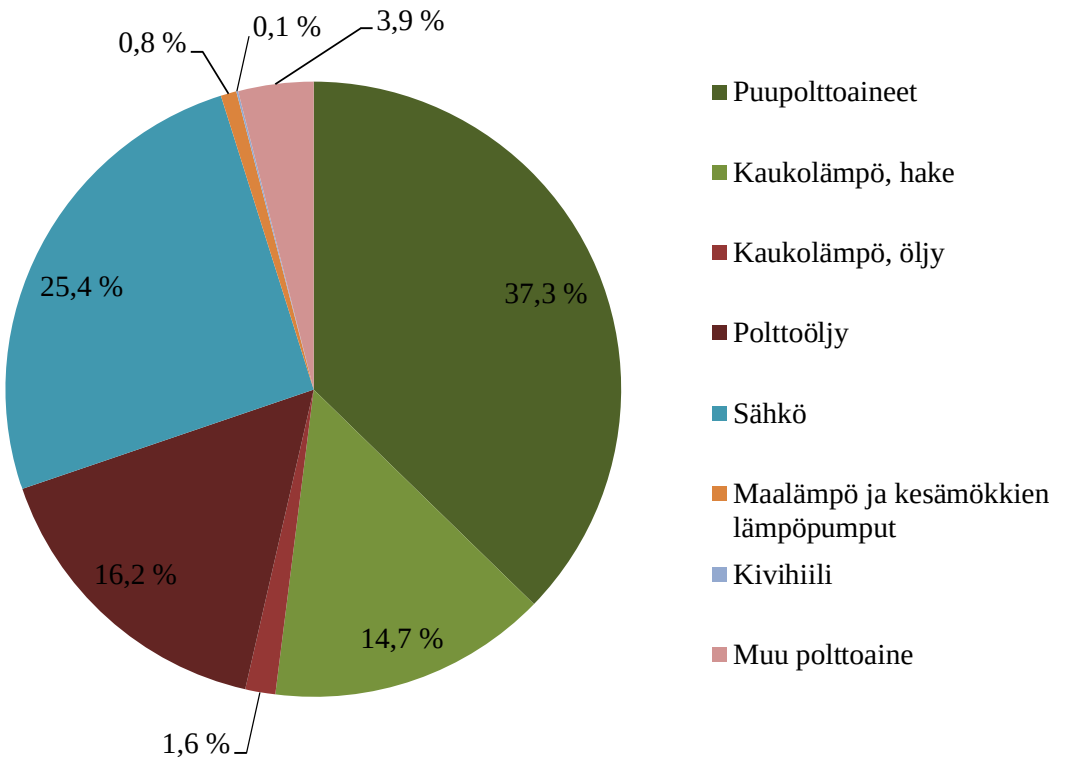



**Kuva 3.1.** Suomen maakunnat ja kuntarajat (Tilastokeskus 2013).

Kuvasta 3.1 nähdään, että Parikkala sijoittuu etelä-pohjoissuunnassa keskelle Etelä-Karjalan, Etelä-Savon ja Pohjois-Karjalan maakuntia. Itä-länsisuunnassa Parikkala on maakuntien itäosassa. Riittävän tarkan ja kattavan energiatarkastelun aikaansaamiseksi tarkastellaan Parikkalan ja Etelä-Karjalan maakunnan lisäksi naapurimaakuntia. Näin saadaan alueellisesti laaja näkökulma energiantuotannon muodoista ja mahdollisuuksista. Lisäksi vertaillaan eri alueiden ja lähteiden tilanteita.

## 3.1 Energiantuotanto Parikkalan kunnassa

Parikkalan kunnassa lämpöenergiaa tuotetaan hajautetusti maatiloilla ja kotitalouksissa sekä keskitetysti kaukolämpöverkoissa. Sähköä Parikkalassa ei tuoteta. Parikkalan kunnan alueen lämmönkulutuksen jakautuminen polttoaineittain on esitetty kuvassa 3.2.




**Kuva 3.2.** Parikkalan kunnan alueen lämmönkulutuksen energianlähteet vuonna 2011 (Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 7).

Kuvasta 3.2 nähdään, että Parikkalassa käytetään runsaasti puupolttoaineita. Parikkalassa on runsaasti haja-asutusalueita, joilla harjoitetaan maa- ja metsätaloutta. Tällöin lämmityslähteenä on usein omasta metsästä hankittu puu.

Kaukolämmön kokonaisosuus lämpöenergiankulutuksesta on noin 16,3 prosenttia. Parikkalassa kaukolämmöstä noin 90 tuotetaan puuhakkeella (Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 7, 22). Kuvaan 3.2 on eritelty kaukolämmön polttoaineet. Kaukolämpölaitoksen hakkeen osuutta ei ole huomioitu puupolttoaineiden 37,3 prosentin osuudessa. Täten voidaan laskea, että puupolttoaineiden kokonaisosuus lämmöntuotannosta on noin 52 prosenttia.

### 3.1.1 **Kaukolämpö**

Parikkalan kunnan alueella sijaitsee neljä taajamaa, jotka ovat Kangaskylä, Särkisalmi, Akonpohja ja Niukkala. Parikkalan keskustan eli Kangaskylän alueella sekä Akonpohjan alueella on omat kaukolämpölaitokset. Kangaskylän laitoksen kokonaistuotantokapasiteetti on 8,5 MW. Kyseisessä laitoksessa pääpolttoaineena on hake ja lisäpolttoaineena kevyt polttoöljy. Hakekattilan teho on 3,5 MW ja öljykattiloiden tehot ovat 3,0 MW, 1,28 MW ja 0,73 MW. Lisäksi Kangaskylän verkostoon on liitetty kaksi erillistä kevyt polttoöljykattilaa, joiden yhteisteho on 1 MW. Akonpohjassa toimii 0,7 MW hakekattila ja 0,6 MW, 0,45 MW ja 0,33 MW kevyt polttoöljykattilat. (Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 6, 22.)

Suomen vaihtelevat sääolosuhteet aiheuttavat vaatimuksia kaukolämpölaitoksille. Laitoksilta vaaditaan suurta tuotantokapasiteettia, josta pääsääntöisesti käytössä on vain osa. Tällöin laitosten huipunkäyttöajat jäävät pieniksi. Parikkalan kaukolämpöverkostojen hakekattiloiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on 4,2 MW. Kevyt polttoöljykattiloiden tuotantokapasiteetti on 7,39 MW.

Kangaskylässä kaukolämpöä tuotetaan noin 16 GWh. Kangaskylän tuotannosta 90 % tuotetaan hakkeella ja 10 % kevyellä polttoöljyllä. (Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 22.) Tällöin hakkeen osuus tuotannosta on 14,4 GWh ja kevyen polttoöljyn 1,6 GWh. Taulukossa 3.1 ovat kootusti Kangaskylän ja Akonpohjan laitosten toiminta-arvoja.

**Taulukko 3.1.** Parikkalan kaukolämpölaitosten toiminta-arvot vuonna 2011 (Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 6, 22-23).

| Hake | | Kangaskylä | Akonpohja |
|---|---|---|---|
| Tuotantokapasiteetti | MW | 3,5 | 0,7 |
| Energiantuotanto | MWh | 14400 | 2480 |
| Huipunkäyttöaika | t | 4114 | 3543 |
| Osuus energiantuotannosta | % | 90 | 65 |
| Kevyt polttoöljy | | | |
| Tuotantokapasiteetti | MW | 5,01 | 1,38 |
| Energiantuotanto | MWh | 1600 | 1354 |
| Huipunkäyttöaika | t | 319 | 981 |
| Osuus energiantuotannosta | % | 10 | 35 |

Taulukon 3.1 lähdemateriaalina olevan Tainion ja Kontiokorven (2013, s. 6, 22-23) raportissa on todettu Parikkalan lämpölaitosten tehot ja energiantuotantomäärät. Raportissa ei erikseen täsmennetä erillisten pienten kevyt polttoöljykattiloiden kuuluvuutta ilmoitettuihin energiantuotantomääriin. Tainion ja Kontiokorven (2013, s. 23) raportissa todetaan, että Parikkalan vuotuinen kaukolämmöntuotanto on 20 GWh. Laskemalla yhteen ilmoitettujen lämpölaitosten energiantuotantomäärät saadaan kokonaisenergiantuotannoksi 19,83 GWh, joka on hyvin lähellä Parikkalan kokonaistuotantoa. Täten voidaan todeta, että lasketut huipunkäyttöajat ovat luotettavia ja laskennassa on huomioitu myös verkoston pienet kevyt polttoöljykattilat.

Tainion ja Kontiokorven (2013, s. 23) raportissa todetaan, ettei Akonpohjassa oleva 0,33 MW kattila ole käytössä. Tällöin taulukossa 3.1 esitetty Akonpohjan öljykattiloiden teho pienenee 1,05 MW:iin ja vastaavasti huipunkäyttöaika suurenee 1 290 tuntiin. Akonpohjassa öljykattiloiden huipunkäyttöaika on huomattavasti suurempi kuin Kangaskylässä. Lisäksi Akonpohjassa öljyn osuus käytettävistä polttoaineista on 35 %, kun Kangaskylässä se on vain 10 %.

### 3.1.2 Muut energianlähteet

Parikkalan kunnassa energiantuotanto keskittyy lämmöntuotantoon. Parikkalassa ei tuoteta sähköä. Parikkalan kunnassa osalla yrityksistä ja kotitalouksista on omat lämmitysjärjestelmät, joilla katetaan omat lämmitystarpeet. Osa rakennuksista lämmitetään puulla, mikä on tyypillistä esimerkiksi maatiloilla. Myös öljylämmitys on käytössä osassa rakennuksista. (Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 24-25.)

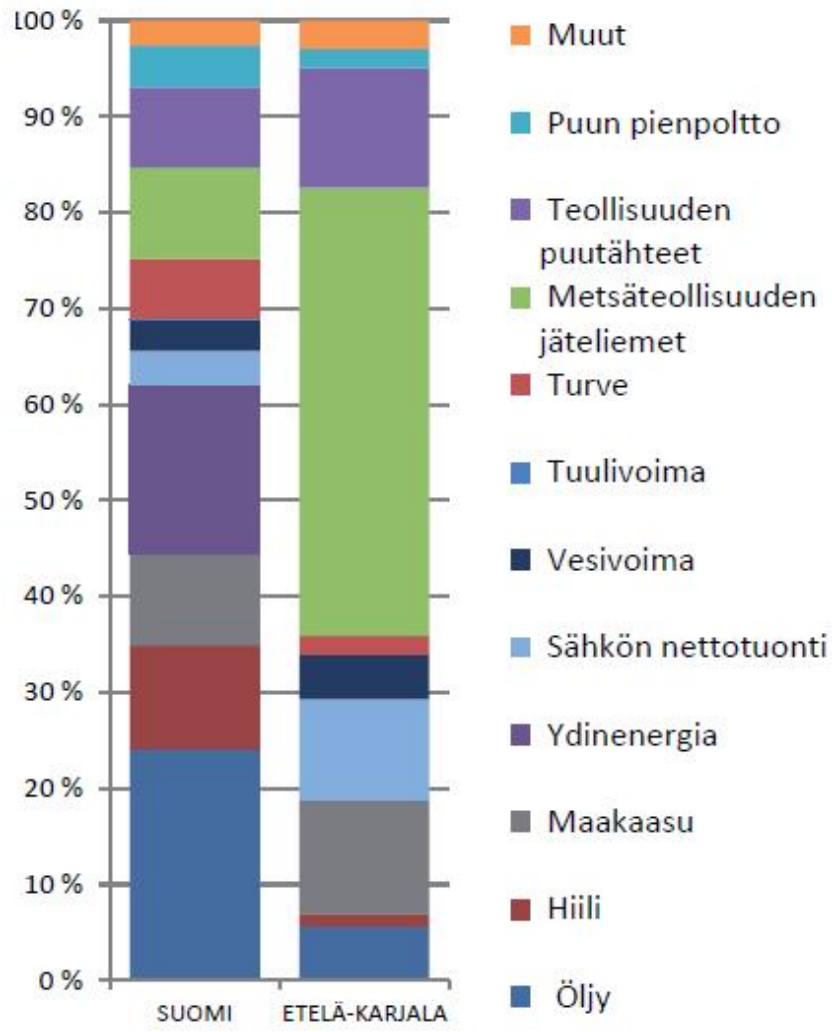
Kirjolankankaan teollisuusalueella Karjalan Konepaja lämmitetään nestekaasua käyttävillä säteilylämmittimillä. Samalla teollisuusalueella sijaitseva Tehomet Oy lämmittää kiinteistöään tuotannossa syntyvällä purulla sekä ostaa purua paikalliselta höyläämöltä. (Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 24.) Purun käyttö lämmityksessä on erinomainen keino hyödyntää bioenergiaa ja samalla hävittää sivutuotteena syntyvä puru.

## 3.2 Energiantuotanto Etelä-Karjalassa

Etelä-Karjalassa energiahuollon omavaraisuus on muuhun Suomeen verrattuna korkeampi. Omavaraisuuteen vaikuttavat merkittävästi alueen vesivoima sekä runsas metsäteollisuus. (Etelä-Karjalan liitto 2012, s. 12.)

Energiantuotantoon käytettävien polttoaineiden valintoihin vaikuttavat merkittävästi polttoaineiden alueelliset saatavuudet (Tynkkynen 2010, s. 32). Etelä-Karjalan alueella sijaitsevat runsaat metsävarannot, mikä aiheuttaa metsäteollisuuden sivutuotteena syntyvät energiapuuvirrat. Etelä-Karjalassa metsistä tuotettavaa biomassaa käytetään energiantuotannossa erittäin paljon. Etelä-Karjalassa puupolttoaineiden osuus primäärienergiantuotannosta on kolminkertainen koko Suomeen verrattuna. (Etelä-Karjalan liitto 2012, s. 12.)

Etelä-Karjalan primäärienergianlähteissä myös maakaasulla on suurempi osuus kuin koko Suomessa. Tähän vaikuttaa Venäjän maakaasuvarojen ja verkoston läheinen sijainti. Öljyn ja hiilen osuudet ovat maakunnassa alhaisemmat kuin koko Suomessa. (Etelä-Karjalan liitto 2012, s. 12.) Kuvassa 3.3 on esitetty Suomen ja Etelä-Karjalan primäärienergianlähteiden suhteelliset osuudet.



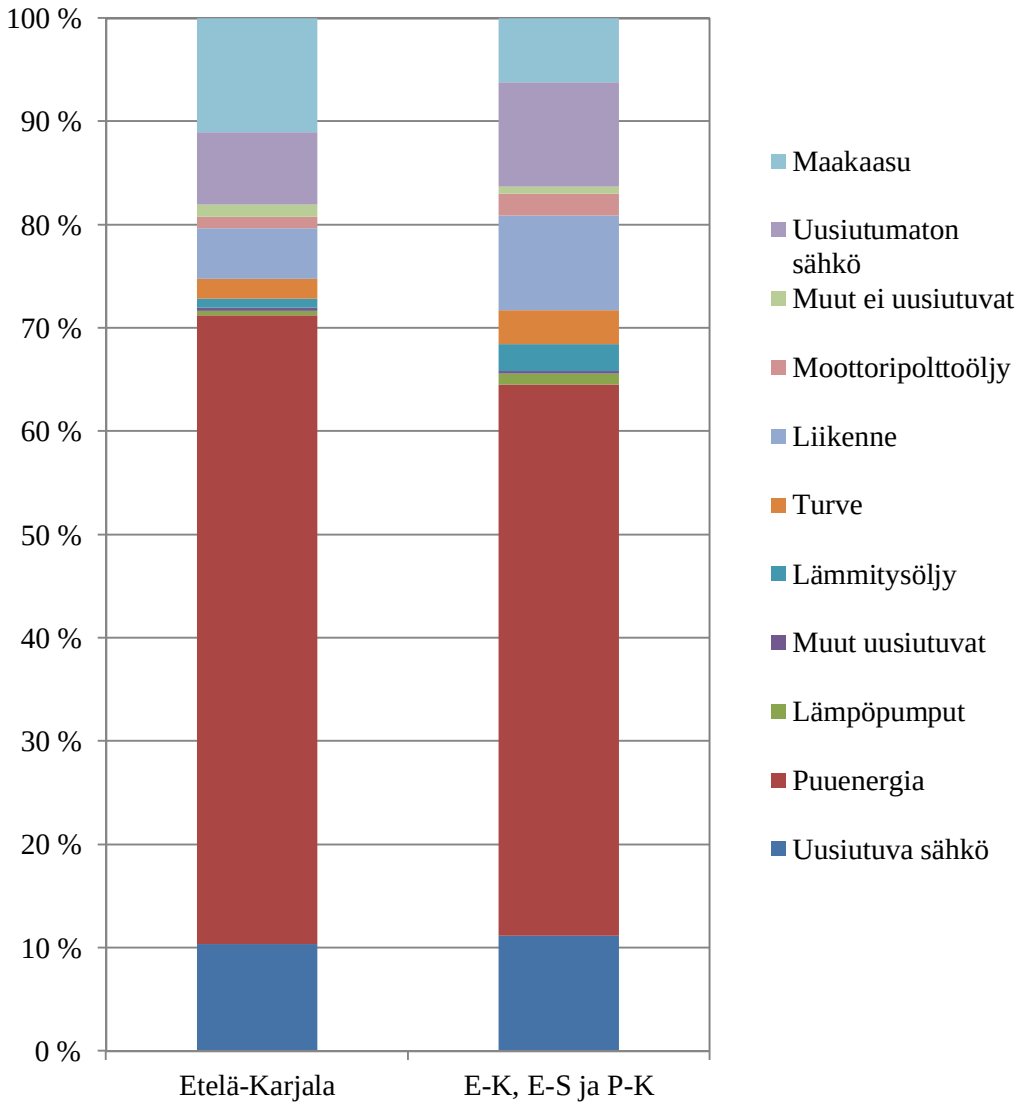

**Kuva 3.3.** Primäärienergianlähteiden suhteelliset osuudet Suomessa ja Etelä-Karjalassa vuonna 2011 (Etelä-Karjalan liitto 2012, s. 12).

Kuvasta 3.3 nähdään, että metsäteollisuuden jäteliemet ja teollisuuden puutähteet ovat osuuksiltaan merkittävästi suurempia Etelä-Karjalassa kuin koko Suomessa. Fossiilisten polttoaineiden eli öljyn, hiilen ja maakaasun kokonaiskulutus on pienempi kuin koko Suomessa. Täten voidaan todeta, että energiantuotannon uusiutuvuus on suurempi Etelä-Karjalassa kuin muussa Suomessa. Kuvasta 3.3 nähdään, että ydinenergia ei ole primäärienergianlähde Etelä-Karjalassa, mutta tuontisähkön osuus Etelä-Karjalassa on suurempi kuin muussa Suomessa. Tuontisähkön tuotannossa on voitu käyttää ydinenergiaa tai fossiilisia polttoaineita. Toisaalta, vaikka summataan tuontisähkö muihin fossiilisiin polttoaineisiin, ei tämä osuus ylitä Suomen fossiilisten polttoaineiden osuutta.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että Etelä-Karjalassa tuotetaan huomattavasti enemmän uusiutuvaa energiaa suhteessa muuhun Suomeen.

## 3.3 Energiantuotanto naapurimaakunnissa

Tässä kappaleessa tarkastellaan primäärienergiantuotannon lähteitä Etelä-Karjalassa, Etelä-Savossa ja Pohjois-Karjalassa. Itä-Suomen energiantilaston (Kajaanin yliopisto-keskus 2014, s. 9, 11, 15) mukaan Etelä-Karjalan ja kolmen maakunnan energiankäyttö jakaantuu kuvassa 3.4 esitetyllä tavalla.




**Kuva 3.4.** Primäärienergiankäyttö Etelä-Karjalassa sekä Etelä-Karjalassa ja sen naapurimaakunnissa (Kajaanin yliopistokeskus 2014, s. 9, 11, 15).

Kuvasta 3.4 nähdään, että puuenergian osuus Etelä-Karjalassa on myös muita maakuntia suurempi. Lisäksi maakaasua käytetään ainoastaan Etelä-Karjalassa. Sähköä käytetään muissa tarkasteltavissa maakunnissa suhteessa enemmän ja erityisesti uusiutumattoman sähkön osuus on suurempi. Myös liikenne kuluttaa energiaa suhteessa enemmän muissa tarkasteltavissa maakunnissa. Voidaan todeta, että tilastollisiin eroihin suurin vaikuttava tekijä on metsäteollisuus. Etelä-Karjalassa metsäteollisuudella on suuri suhteellinen osuus energiantuotannosta, joka näkyy myös tilastoissa.

# 4 HAKKEEN OMINAISUUDET JA LAATU

Tässä luvussa tarkastellaan hakkeen ominaisuuksia, jotka vaikuttavat hakkeen käsittelyyn ja polttamiseen merkittävästi. Ominaisuuksien perusteella voidaan vertailla hakkeen laatua ja käytettävyyttä energiajärjestelmissä.

## 4.1 Lämpöarvo

Lämpöarvo on polttoaineen energiasisällön ja massan suhde. Lämpöarvoista on useita eri käsitteitä lämpöarvon määritysmenetelmän mukaan. Tyypillisimmin käytetään joko kalorimetrista tai tehollista lämpöarvoa. Kalorimetrinen lämpöarvo kuvaa polttoaineen palaessa vapautuvaa energiaa polttoainekiloa kohden, kun palaessa syntynyt vesi lauhtuu nesteeksi. Kalorimetrinen lämpöarvo ilmoitetaan yleensä kuivaa polttoainekiloa kohden. Tehollinen lämpöarvo voidaan ilmaista joko kuiva-aineessa tai saapumistilassa. Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa huomioi polttoaineen palamisessa polttoaineesta vapautuvan nettolämpömäärän polttoainekiloa kohden. Kyseisessä lämpöarvossa oletuksena on, että polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa syntyvä vesi poistuu savukaasujen mukana vesihöyrynä. Tällöin veden höyrystymislämpöä ei voida hyödyntää. Saapumistilan tehollinen lämpöarvo huomioi polttoaineen sisältämän vedyn palaessa syntyvän veden lisäksi polttoaineen sisältämän veden lopputilassa lauhtumattomana vesihöyrynä. (Alakangas 2000, s. 12; Raiko et al. 2002, s. 52-53.)

## 4.2 Kosteus

Kosteus on hakkeen laatuun merkittävimmin vaikuttava ominaisuus (Alakangas 2000, s. 48). Polttoaineen kosteudella on erittäin suuri merkitys hakkeen teholliseen saapumistilan lämpöarvoon, koska polttoaineen sisältämästä veden massasta ei voida tuottaa energiaa. Lisäksi tämä vesimäärä tulee lämmittää höyrystymispisteeseen ja höyrystää. Yleisesti veden höyrystymislämpöä eli latenttilämpöä ei hyödynnetä, jolloin vesi poistuu höyrynä savukaasujen mukana.

Hakkeen kosteus ilmoitetaan massaosuutena joko kosteaa tai kuivaa ainetta kohti (Alakangas 2000, s. 12). Hakkeen sisältämän veden massan ja kuiva-aineen massan suhdetta kutsutaan kosteussuhteeksi. Veden massan ja puuaineen kokonaismassan suhdetta kut-

sutaan vastaavasti kosteudeksi. (Härkönen 2012, s. 9.) Tällöin kosteussuhde voi olla suurempi kuin yksi, mutta kosteus on aina alle yksi.

Tuoreen puun kosteus on 50-60 % puun massasta (Alakangas 2000, s. 35). Jahkola et al. (2012, s. 6) toteavat kaatotuoreen energiapuuksi korjatun männyn kosteudeksi 50-55 % ja kuusen kosteudeksi hieman vähemmän. Jahkola et al. (2012, s. 6) toteavat koivun kosteudeksi ennen lehtien puhkeamista ja niiden varisemisen jälkeen noin 50 % ja lehtipinnan ollessa suurimmillaan noin 38 %. Täten korjuuaika vaikuttaa puun kosteuteen ainakin lehtipuiden osalta.

Puu on hygroskooppista ainetta eli se sitoo tehokkaasti vettä itseensä (Jahkola et al. 2012, s. 7). Tuoreessa puussa vettä esiintyy kolmessa eri muodossa. Vettä on soluonteloissa nesteenä, jota kutsutaan vapaaksi vedeksi. Vettä on myös sitoutunut soluseinämiin kemiallisesti ja fysikaalisesti ja vettä esiintyy soluonteloissa vesihöyrynä. Lisäksi puuaineksessa voi esiintyä vettä jään muodossa, jos vallitseva ympäristön lämpötila alittaa veden jäätymispisteen. Tällöin vapaa vesi ja mahdollisesti myös sitoutunut vesi jäätyvät. (Hukka 1996, s. 14.)

Puun kuivuessa puusta poistuu ensimmäisenä vapaa vesi. Kun vapaa vesi on poistunut, soluseinämiin sitoutuneen veden suurinta mahdollista määrää kutsutaan puunsyiden kyllästymispisteeksi. Tällöin puun kosteus on noin 23 %. Tämän jälkeen kuivuminen hidastuu. (Härkönen 2012, s. 10-11.)

## 4.3 Rakenne

Hakkeen palamiseen ja käsittelyyn liittyvä merkittävä tekijä on palakoko. Yleisesti hakepalan keskipituudeksi tavoitellaan 30-40 mm. Karsitusta puusta valmistetussa hakkeessa palakoko on tasaisempaa kuin kokopuusta tai hakkuutähteistä valmistetussa hakkeessa. (Alakangas 2000, s. 48.) Tämä aiheutuu raaka-aineen sisältämistä rakenneosista. Kokopuuhakkeessa on neulasia ja oksia, jotka aiheuttavat hienoainesta hakkeen sekaan.

Hakepolttimessa ja -kattilassa käytettävä palakoko riippuu laitteiston koosta. Pienemmät polttimet vaativat pienempää haketta kuin suuremmat polttimet (Säätötuli 2014). Tällöin pienissä kattiloissa ei voida käyttää samaa haketta kuin isoissa kattiloissa. Pienem-

piä kattiloita varten hake tulee pilkkoa pienemmiksi paloiksi. Suuret hakepalat aiheuttavat toimintahäiriöitä syöttölaitteissa ja laitteiston käyttövarmuus huononee. Suurille kattiloille hake voidaan valmistaa suuremmiksi partikkeleiksi. Tällöin haketuksessa tulee vähemmän leikkauspintoja, jolloin haketuksen energiankulutuksen voidaan olettaa pienenevän.

## 4.4 Tiheys

Tiheydellä tarkoitetaan massan ja tilavuuden suhdetta. Tiheyden ilmoittamiseen on useita eri käsitteitä, jotka huomioivat massan ja tilavuuden suhteen eritavoilla. Irtotiheys on polttoaineen massan suhde kehystilavuuteen. (Alakangas 2000, s. 14.) Eli esimerkiksi täyden kuorma-auton kuormatilan sisällä olevan polttoaineen massa jaettuna kuormatilan tilavuudella. Kuivatuoretiheydellä tarkoitetaan puun kuiva-aineen massan ja tuoreen puun tilavuuden suhdetta. Kuivatiheys tarkoittaa täysin kuivan puun massan ja tilavuuden suhdetta. (Härkönen 2012, s. 15.) Tiheyksiä ilmoittaessa ja tulkittaessa on huomioitava, että tiheyksiä ilmoitetaan usealla eri tavalla. Erityisesti huomiota tulee kiinnittää, ilmoitetaanko tilavuuden yksikkö irto- vai kiintokuutiometreinä, jolla tarkoitetaan puuaineen todellista tilavuutta. Puupolttoaineilla yksi kiintokuutiometri vastaa noin 2,5 irtokuutiometriä polttoainetta (Alakangas 2000, s. 10).

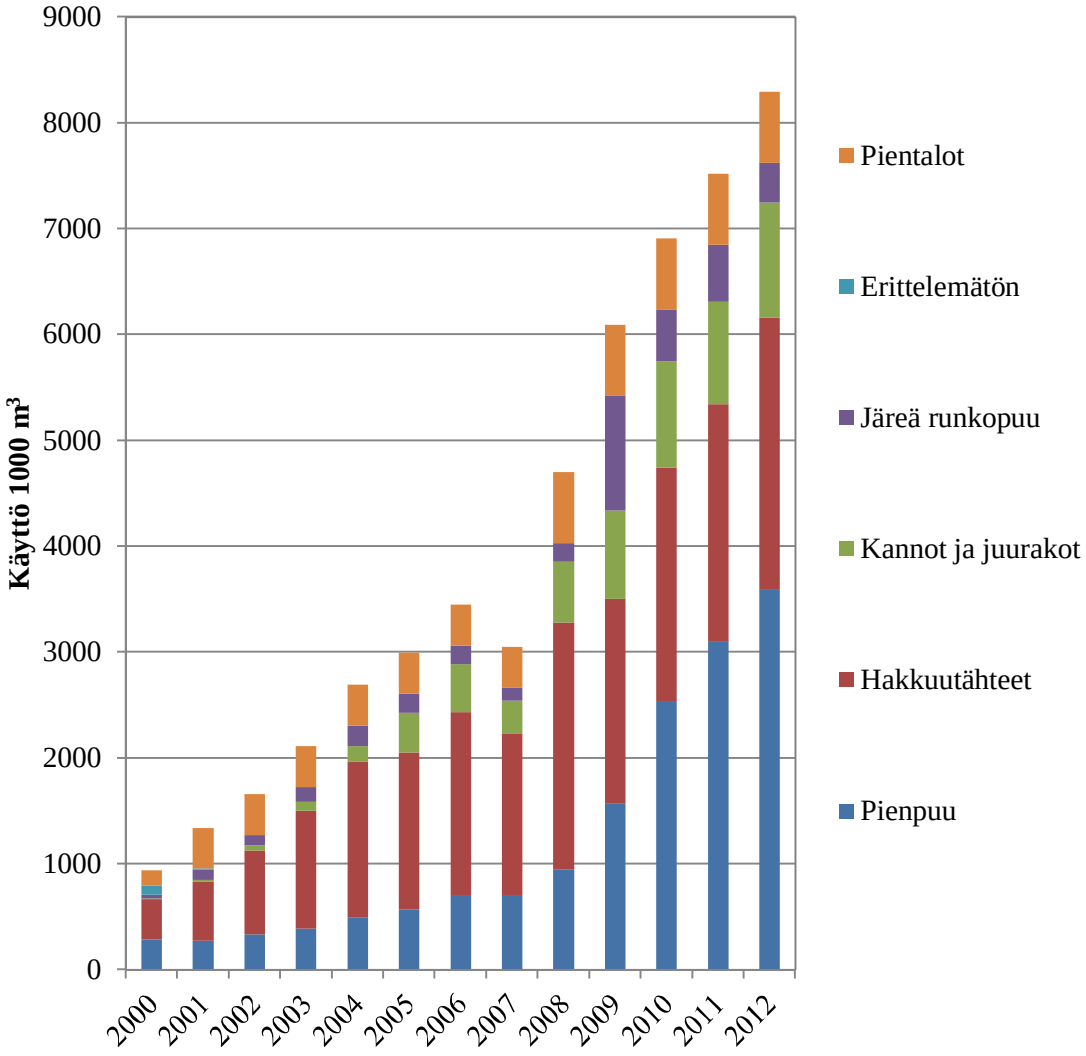
Palakoko ja täten myös hienoaines vaikuttavat hakkeen tiheyteen. Hienoaines täyttää suurten hakelastujen välejä kasvattaen hakkeen tiheyttä. (Alakangas 2000, s. 48.) Täten voidaan todeta, että hakkeen tiheyttä voidaan kasvattaa esimerkiksi kuljetuksia varten hienoaineen sekoituksella. Esimerkiksi teollisuuden sivutuotteena syntyvää sahanpurua voidaan käyttää hienoaineena hakekuorman tiheyden kasvattamiseksi.

# 5 RAAKA-AINE, VARASTOINTI JA LUONNONKUIVAUS

Hakkeella tarkoitetaan yleisesti puusta valmistettua polttoainetta, jonka rakenne on palamaista tai lastumaista. Hake valmistetaan hakkurilla tai kantohakkeen tapauksessa murskaimella. Puun korjuun eli hakkuun jälkeen on tyypillistä, että raaka-aine varastoidaan välivarastoon ennen haketusta. Varastoinnin tarkoituksena on ylläpitää energiapuuvarastoja ja parantaa energiapuun laatua (Kulkki et al. 2013, s. 14). Täten varastoinnilla tasataan kysyntää ja tarjontaa. Energiapuun kysyntä on suurimmillaan talvella ja hakkuita suoritetaan tyypillisesti roudan ja kuivan maan aikaan. Laadun parantaminen varastoinnissa tarkoittaa pääasiassa kuivumista.

## 5.1 Raaka-aineen lähteet

Haketta voidaan valmistaa kokopuusta, hakkuutähteistä, kannoista ja teollisuuden jätepuusta (Alakangas 2000, s. 48). Myös jätepuun, kuten huonekalujen, murskauksessa syntyy hakkeenomaista polttoainetta, mutta kyseinen polttoaine voi sisältää myös muuta materiaalia. Kuvassa 5.1 on esitetty hakkeen valmistusmäärät raaka-aineittain vuosina 2000-2012. Kuvassa 5.1 hakkeen pienkäyttö on eriteltynä ylimpänä pylvään osana. Muut pylvään osat ovat lämpö- ja voimalaitoksen polttoainelähteitä.

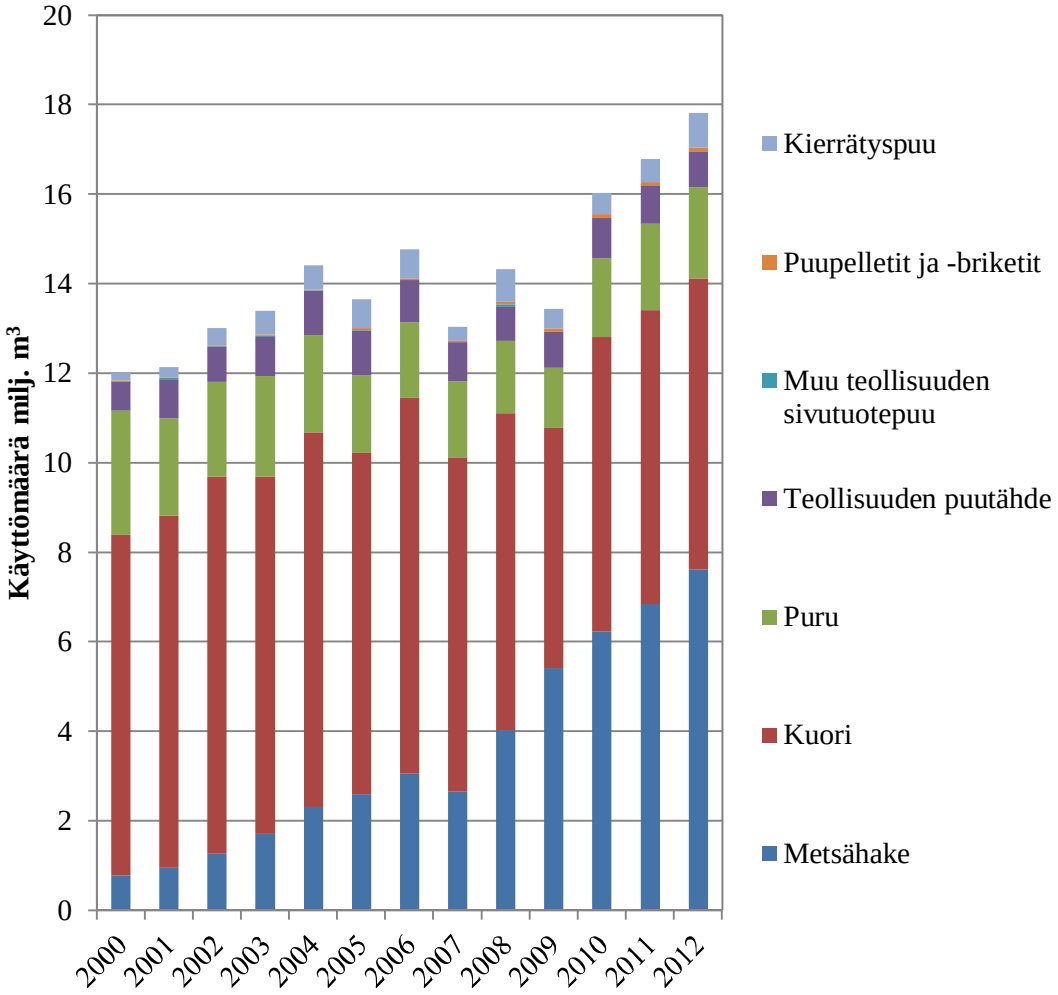



**Kuva 5.1**. Metsähakkeen käyttö raaka-aineittain vuosina 2000-2012 (Ylitalo 2013, s. 5).

Kuvasta 5.1 nähdään, että hakkeen käyttömäärät ovat lähes kymmenkertaistuneet vuosina 2000-2012. Myös pientalojen osalta hakkeen käyttömäärät ovat kasvaneet. Hakkeen käyttö Suomessa on lisääntynyt viime aikoina huomattavasti ja vuonna 2012 haketta käytettiin enemmän kuin koskaan ennen (Kajaanin yliopistokeskus 2014, s. 3, 5). Myös Metsäntutkimuslaitoksen eli Metlan julkaisussa (Ylitalo 2013, s. 1) todetaan, että metsähaketta käytettiin vuonna 2012 8,3 miljoonaa kuutiometriä, joka on ennätyksellisen paljon. Tämä määrä saavutettiin yhteensä voimalaitoksissa ja pientaloissa. Hakkeen käytön suuresta kasvusta huolimatta hakkeen käyttöä pyritään edelleen kasvattamaan. Suomen kansallinen tavoite metsähakkeen käytölle on 13,5 miljoonaa kuutiometriä

vuodessa vuoteen 2020 mennessä. Kyseisen tavoitteen täyttymiseen metsähakkeen raaka-ainetta on riittävästi, mutta hakkeesta voi syntyä kilpailua. (Metsälehti 2014.) Jos hakkeesta syntyy kilpailua, hakkeen hinta voi kasvaa tulevaisuudessa. Hinnan kasvu ja kilpailutilanne voi johtaa hakkeen laadun paranemiseen, koska puumassoja käsitellään ja varastoidaan huolellisemmin. Tällöin hakkeen käyttömäärä ei välttämättä kasva, mutta haketta käytetään parempilaatuisena, jolloin pienemmästä määrästä saadaan vaadittava määrä energiaa. Toisaalta kysynnän kasvu voi aiheuttaa myös huonompilaatuisten hakkeen raaka-aineiden hyödyntämisen, jolloin hakkeen laatu voi heikentyä.

Kuvasta 5.1 nähdään, että pienpuun osuus hakkeen raaka-aineena on kasvanut eniten. Tulevaisuudessa pienpuulla uskotaan olevan merkitystä hakkeen käytön kasvun mahdollisuutena (Metsälehti 2014). Myös kantojen ja juurakoiden osuus on kasvanut huomattavasti. Täten voidaan todeta, että metsien biomassaa hyödynnetään entistä tehokkaammin hakkeen valmistuksessa ja haketta käytetään polttoaineena enemmän kuin aikaisemmin. Kuvassa 5.2 on esitetty kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa vuosina 2000-2012. Kuvan 5.2 kaavio ei sisällä pienkäyttöä.




**Kuva 5.2.** Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa vuosina 2000-2012 (Ylitalo 2013, s. 3).

Kuvasta 5.2 nähdään, että metsähakkeen käyttömäärä on kasvanut huomattavasti viimeisen 12 vuoden aikana suhteessa muihin kiinteisiin puupolttoaineisiin. Kuoren käyttömäärä on hieman pienentynyt. Kiinteiden puupolttoaineiden absoluuttinen määrä on kasvanut noin 5,5 miljoonaa kuutiometriä 12 vuoden aikana.

## 5.2 Varastointi

Hakepuiden varastoinnilla on oleellisesti merkitystä valmistettavan hakkeen laatuun. Kuivumisen kannalta varaston sijaintiin on kiinnitettävä huomiota. Varastokasan peit-

tämisellä voidaan alentaa varastoitavien hakepuiden kosteutta. Tässä kappaleessa käsitellään varastointia ja varaston ominaisuuksien vaikutusta hakkeen raaka-aineen laatuun. Kosteuspitoisuuden muutosta luonnonkuivauksessa on käsitelty kappaleessa 5.3.

### 5.2.1 **Varaston sijainti**

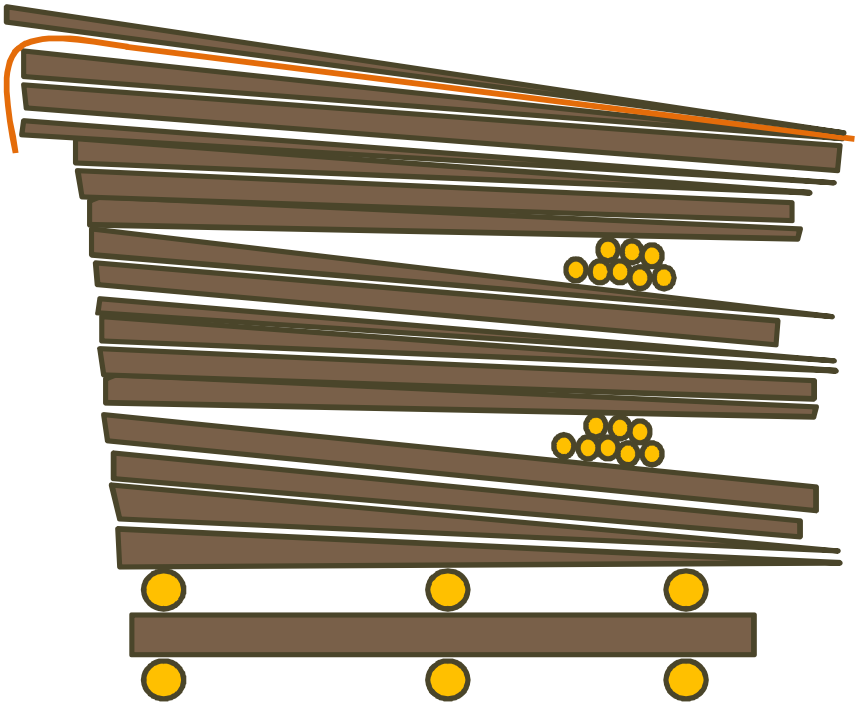
Hakkuutähteiden kuivaaminen voidaan toteuttaa palstalla kasoissa tai hakkuutähteet voidaan siirtää tienvarsikasaan kuivumaan (Kulkki et al. 2013, s. 14). Jos hakkuutähteet kuivataan palstalla, hakkuutähteiden kuivaaminen haittaa leimikon uudelleen istuttamista tai muuta metsänhoidollista toimintaa Harvennushakkuissa palstakuivaaminen ei aiheuta metsänhoidollisia esteitä. Jos puut istutetaan ennen hakepuiden keräämistä palstalta, voi taimisto vaurioitua keräämisen yhteydessä. Toisaalta metsän kasvu alkaa myöhemmin, jos taimisto istutetaan vasta hakepuiden keräämisen jälkeen. Lisäksi hakkuutähteiden kerääminen palstakuivauksen jälkeen edellyttää korjuukoneiden uudelleen kuljettamista palstalle. Hakkuun yhteydessä hakkuutähteet voidaan kuljettaa suoraan tienvarsivarastoon, eikä erillistä koneiden kuljetusta tarvita.. Korjuun kannalta on järkevintä kuljettaa puut suoraan välivarastoon (Hillebrand 2009, s. 5).

Varastokasan sijainti vaikuttaa merkittävästi energiapuiden kosteuteen (Äijälä, Kuusinen ja Koistinen 2010, s. 27). Kosteuteen vaikuttavia tekijöitä on useita. Varastopaikka tulee valita siten, että haketettavat puut kuivuvat mahdollisimman hyvin (Etelätalo 2013, s. 14). Varastopaikaksi sopii ympäristöä korkeampi maaston kohta ja tuulinen ja aurinkoinen paikka (Kulkki et al. 2013, s. 15). Lisäksi varastopaikan tulee mahdollistaa haketus, lastaaminen ja kuljettaminen. Täten varastopaikan tulee olla tilava ja kantava. (Äijälä, Kuusinen ja Koistinen 2010, s. 27.)

### 5.2.2 **Varastokasan ladonta ja peittäminen**

Varastokasan ladonnalla voidaan vaikuttaa varastokasan tiiviyteen ja muotoon. Varastokasan muoto vaikuttaa kasan peittämiseen ja tästä aiheutuneisiin kustannuksiin. Tiiviillä ja korkealla kasalla peittämiskustannukset ovat alhaisimmat. (Hillebrand 2009, s. 6.) Harvassa ladonnassa raaka-aineen ympärillä on enemmän ilmaa. Risutukkien harvalla ladonnalla saavutetaan prosenttiyksikön pienempi kosteus kuin tiiviillä ladonnalla,

jos kasa ei ole peitetty. Jos kasat peitetään, ladontatiukkuudella ei ole merkitystä risutukkien loppukosteuteen. (Hillebrand 2009, s. 9.) Peittämisen helpottamiseksi energiapuukasaan voidaan latoa lippa, joka estää veden pääsyn kasaan. Lippa suojaa erityisesti puiden tyviä sateelta. Jos sade pääsee puiden tyviin, se valuu runkoja pitkin koko kasaan. (Lepistö et al. 2010, s. 22.) Kuvassa 5.3 on esitetty varaston lippa, ladonta ja peittäminen.



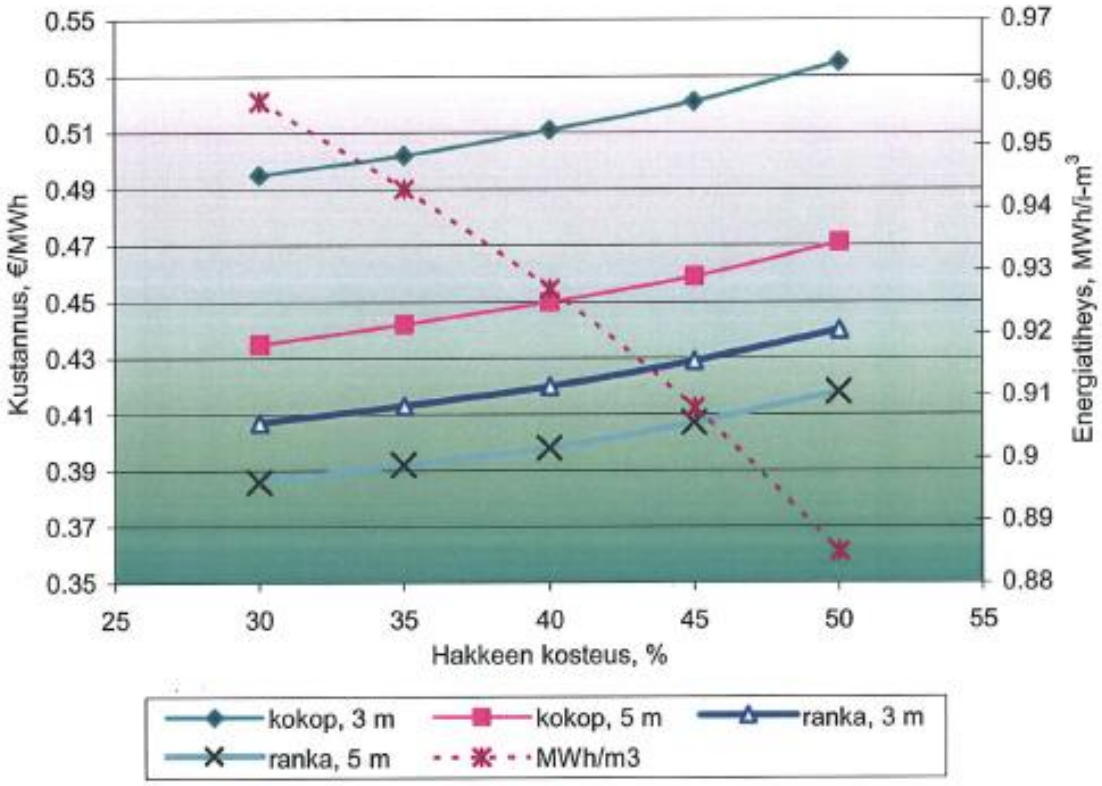
**Kuva 5.3.** Varastokasan oikea ladonta ja peittäminen.

Kuvasta 5.3 nähdään varastokasan oikea muoto sekä hyvin varastoa suojaava peittämistapa. Varastokasan alle tulee asettaa aluspuita siten, että varastosta saadaan hyvin tuulettuva (Äijälä, Kuusinen ja Koistinen 2010, s. 27). Tuulettuvuutta voidaan tehostaa asettamalla kasan alle paksumpia puita ristikon muotoon. Kuvassa 5.3 esitetty varaston lippa tulee olla 0,5-1 metrin muuta varastoa ulompana ja lipan paksuus tulee olla vähintään 0,5 metriä. Varaston ladonta tulee olla ylöspäin siirryttäessä hieman tyvipäähän kallistunut. (Lepistö et al. 2010, s. 20, 22.) Varastokasa tulee latoa mahdollisimman korkeaksi, jotta kasan kastuva pinta-ala on mahdollisimman pieni (Lepistö et al. 2010, s. 21;

Äijälä, Kuusinen ja Koistinen 2010, s. 27). Toisaalta sade ei kastele energiapuita, jos kasa peitetään. Tällöin korkeudella ei ole merkitystä kastumisen osalta. Haketuksen kannalta korkea kasa on parempi, koska hakkurin ei tarvitse siirtyä niin usein kuin matalaa kasaa hakettaessa. Myös aluspuita tarvitaan vähemmän, jos kasa on korkea. Toisaalta korkeaa ladontaa käytettäessä aluspuiden on oltava vahvempia, jotta ne kestävät hakekasan painon.

Energiapuukasa voidaan peittää erilaisilla katemateriaaleilla, jotka estävät veden pääsyn kasaan. Tyypillisesti energiapuukasat voidaan peittää peitepaperilla tai muovilla. Peitepaperi voidaan levittää kourakuormaimeen kiinnitetyn peiteraudan avulla. Peitepaperi voidaan haketuksen yhteydessä hakettaa polttoaineeksi. Tällöin puuvaraston paikalle ei jää jätteitä, eikä niitä tarvitse erikseen kuljettaa pois. Muoviset peitemateriaalit rikkoutuvat pakkasessa helposti, jolloin muovin paloja voi kulkeutua polttoaineen käsittelyjärjestelmiin ja polttoprosessiin. (Lepistö et al. 2010, s. 23.)

Peittämisellä pyritään hakkeen kosteuden pienentämiseen ja polttoaineen arvon suurenemiseen. Toisaalta peittäminen aiheuttaa kustannuksia raaka-aineen tuottajalle, mikä pienentää raaka-aineesta saatavaa tuloa. Peittämisestä aiheutuneiden kustannusten on oltava pienempiä kuin polttoaineen arvon suureneminen. Vuonna 2010 peitepaperin hinta oli 0,5 €/$m^2$ (Lepistö et al. 2010, s. 23). Peitemateriaali aiheuttaa peittämisen suurimman kustannuksen ja työosuus peittämisessä on ainoastaan 20 prosenttia (Hillebrand 2009, s. 6). Hillebrandin (2009, s. 7) tutkielmassa on esitetty kootusti karsitulle rangalle ja kokopuulle peittämisen kustannukset energiayksikköä kohden. Kustannusten muodostuminen esitetään kuvassa 5.4.




**Kuva 5.4.** Energiapuuvaraston peittämisen kustannus energiayksikköä kohden hakkeen kosteuden funktiona sekä puun energiatiheys (Hillebrand 2009, s. 7).

Kuvassa 5.4 on esitetty kustannustietojen lisäksi hakkeen energiatiheys, jonka avulla kustannukset voidaan laskea hakkeen irtotilavuutta kohden. Kuvasta nähdään, että korkeammat kasat ovat edullisempia peittää kuin matalat kasat. Toisaalta kokopuukasat ovat peittämiskustannuksiltaan suurempia kuin rankakasat.

## 5.3 Kosteuden muutos varastoinnissa

Suurin osa Suomessa lämmitykseen käytettävästä hakkeesta kuivataan luonnossa varastokasoissa tai palstoilla. Tällöin hakkeen kosteus on tyypillisesti 30-50 prosenttia. Hyvin onnistuneella luonnonkuivauksella päästään 25 prosentin kosteuteen. (Lepistö et al. 2010, s. 32.) Tällöin hake kuivataan rankana ennen haketusta ja poltetaan haketuksen jälkeen. Pienkokopuun kosteus pienenee alle 40 prosenttiin yhden kesän aikana, jos hakepuukasa on tehty avoimelle paikalle (Hillebrand 2009, s. 5). Palstalla olevat hak-

kuutähteet kuivuvat tienvarsikasoja nopeammin ja hakkuutähteiden kosteus voi laskea 13 viikossa 50-60 prosentista 20-30 prosenttiin (Kulkki et al. 2013, s. 14). Hillebrand (2009, s. 14) toteaa, että optimaalinen kuivausaika palstalla on 1-3 viikkoa, jonka aikana hakkuutähteet kuivuvat alle 40 prosentin kosteuteen. Hillebrandin (2009, s. 5) mukaan hyvällä välivarastopaikalla kuivumistulos on lähes yhtä hyvä kuin palstakuivaamisessa, jos varastointiaika on pitkä. Risutukit kuivuvat hyvissä olosuhteissa alle 40 prosentin kosteuteen noin kolmessa kuukaudessa (Hillebrand 2009, s. 8).

Ympäristö vaikuttaa merkittävästi varastoitavan raaka-aineen kosteuteen. Varjossa sijainneet kokopuukasat ovat 7-17 prosenttia kosteampia kuin avoimella paikalla sijainneet (Hillebrand 2009, s. 6). Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion (Äijälä, Kuusinen ja Koistinen 2010, s. 27) julkaisussa todetaan, että avoimella ja tuulisella varastopaikalla energiapuiden kosteus voi olla useita prosentteja pienempi kuin varjoisella paikalla. Varastokasan peittäminen vaikuttaa noin 6 prosenttia pienkokopuun kosteuteen ja 10-15 prosenttia hakkuutähteiden kosteuteen (Hillebrand 2009, s. 5). Risutukkien peittäminen vaikuttaa noin 4,5 prosenttia niiden kosteuteen (Hillebrand 2009, s. 9).

# 6 HAKETUS

Hakkeen valmistus voidaan suorittaa palstalla, välivarastolla tienvarressa, puuterminaalissa tai käyttöpaikalla. Yleisin hakkeen tuotantopaikka on välivarasto. (Halonen et al. 2003, s. 20.) Välivarastolla tienvarressa hakkeen raaka-ainetta ei tarvitse kuljettaa teitse, koska metsäkone voi kasata hakepuut suoraan haketettavaksi. Tällöin hakkuri syöttää hakkeet suoraan kuljetuskalustoon. Hakkeen kuljetus on helpompaa kuin hakkeen raaka-aineiden, koska hake on tasalaatuista ja sen lastaaminen tapahtuu hakkurilla ja purkamiseen ei tarvita erillistä nosturia.

Hakkeen tuotantomäärä, haketettava raaka-aine ja raaka-aineen koko määrittävät haketuksen toteutustavan (Bioenergianeuvoja 2014a). Hakkuria voidaan käyttää kiinteästi terminaalissa, trailerin päällä, kuorma-autoon asennettuna tai traktoriin kiinnitettynä. Hakkurin tehon lähteenä voi toimia oma moottori tai hakkuria voidaan pyörittää traktorin voimanulosotolla. (Krajnc 2011, s. 13.)

Hakkureiden teho vaihtelee 3-1 000 hevosvoimaa (Röser 2014, s. 1). Tämä vastaa noin 2,2-750 kilowatin tehoa. Suuret rumpuhakkurit voivat olla teholtaan jopa 800 kW (Döring 2013, s. 80). Naimi et al. (2006, s. 2) toteavat, että suurien hakkureiden teho on jopa noin 1 870 kW. Traktorilla pyöritettävien hakkureiden teho on pieni verrattuna suuriin terminaalihakkureihin. Suurimpien yleisesti käytettyjen traktoreiden moottoriteho on noin 200 kW. Tyypillisesti maataloustraktorit ovat teholtaan 100 kW:n molemmin puolin. Terminaalihakkureissa on mahdollista käyttää tehonlähteenä sähköä traktoreissa käytetyn öljyn sijaan.

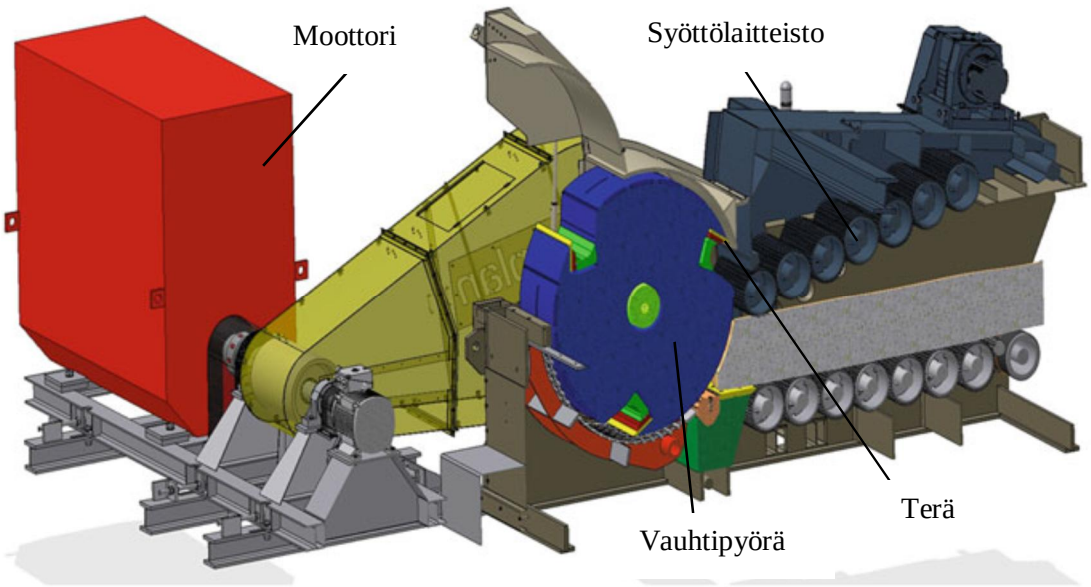
Hakkeen valmistukseen on käytössä useita erityyppisiä hakkureita. Hakkurit voidaan jakaa terien pyörimisnopeuksien tai syöttötavan mukaan (Rinne 2010, s. 25). Rinne (2010, s. 25) jakaa hakkurit ja murskaimet alle 100 kierrosta minuutissa pyöriviin hidaskäyntisiin sekä tavallisesti yli 600 kierrosta minuutissa pyöriviin nopeakäyntisiin. Toinen jakamistapa Rinteen (2010, s. 25) mukaan on pysty- ja vaakasyöttöiset hakkurit. Toisaalta hakkurit voidaan jakaa myös terälaitteen geometrian mukaan. Tällöin hakkurit voidaan jakaa rumpu-, laikka- ja muihin hakkurityyppeihin, jotka voivat olla edellä mainittujen yhdistelmiä (Röser 2014, s. 2). Näiden lisäksi haketus voidaan toteuttaa

ruuvihakkurilla (Krajnc 2011, s. 14). Myös Döring (2013, s. 78) jakaa hakkurit laikka-, rumpu- ja ruuvihakkureihin. Tässä luvussa hakkurit jaetaan terälaitteen geometrian mukaan.

## 6.1 Rumpuhakkuri

Rumpuhakkurissa haketettavat puut syötetään pyörivän sylinterin ulkovaipalle. Sylinterin vaipassa eli rummussa on terät, jotka leikkaavat haketettavasta puusta lastuja. (Döring 2013, s. 79.) Terät voivat olla rummun levyisiä, lyhyempiä tai spiraalimaisesti rummun ympärillä (Rinne 2010, s. 29). Spiraalimaisuus lisää terien viiltävyyttä, koska terien kohtauskulmat ovat kaltevia puuhun nähden.

Suurissa rumpuhakkureissa rummun halkaisija voi olla jopa 2 500 mm (Döring 2013, s. 80). Energiapuuhakkureissa rummun halkaisija on tyypillisesti 700-1 300 mm ja leveys 700-1 500 mm (Rinne 2010, s. 29). Kuvassa 6.1 on suuri rullasyöttöinen rumpuhakkuri.




**Kuva 6.1.** Rullasyöttöinen rumpuhakkuri, moottori ja voimansiirto (Döring 2013, s. 79).

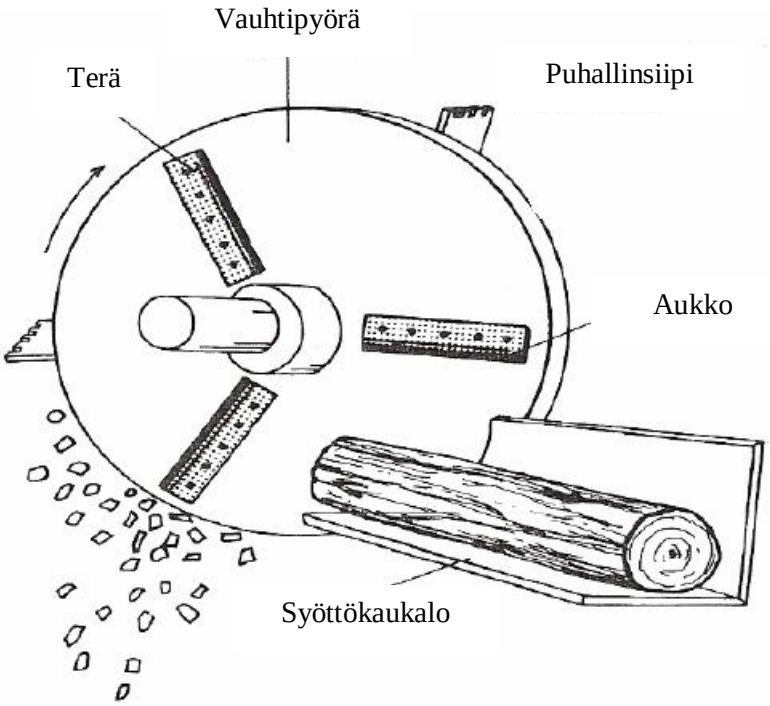
Rumpuhakkurit ovat tehokkaita, suuria kapasiteetiltaan ja ne pystyvät käsittelemään laajasti erilaisia hakkeen raaka-aineita (Röser 2014, s. 2). Rumpuhakkurit pystyvät käsittelemään erimittaisia jätepuun kappaleita sekä hakkuutähdettä. Rumpuhakkurit vievät

vähän tilaa ja ovat käytettävyydeltään hyviä. Laikkahakkureihin verrattuna rumpuhakkurit käsittelevät raaka-aineen tarkemmin, eikä hakepuista jää hukkapaloja. Täten rumpuhakkurit eivät tarvitse erillistä raaka-aineen lajittelua ennen haketusta. (Döring 2013, s. 78.) Rumpuhakkurit soveltuvat ominaisuuksiltaan käyttötarkoitukseen, jossa haketettavat määrät ovat suuria ja raaka-aine on epätasalaatuista.

Hakkeen partikkelikokoon vaikuttavat terien määrä, pyörimisnopeus ja syöttönopeus. Laadukkaan hakkeen valmistamiseen vaaditaan terävät terät. Lisäksi tylsät terät nostavat haketuksen energiankulutusta. Tasalaatuisen hakkeen valmistamiseksi rumpuhakkurin jälkeen tulee olla seula, jonka läpäisevät vain tarpeeksi pienet partikkelit. (Döring 2013, s. 78-79.)

## 6.2 Laikkahakkuri

Laikkahakkurissa on kiekko, jossa on teriä säteen suuntaisesti tai hieman kiekon tangentin suuntaan kallistettuna (Rinne 2010, s. 28). Haketettavat puut syötetään yleisesti 45 asteen kulmassa kiekkoon nähden. Ympäristöön verrattuna puiden syöttö on toteutettu vaakatasossa tai 45 asteen kulmassa vaakatasoon verrattuna hakkurin valmistajasta riippuen. (Döring 2013, s. 80.) Krajnc (2011, s. 13) toteaa syöttökulman olevan 30-40 astetta teräkiekkoon nähden. Jos puiden syöttö halutaan toteuttaa vaakasuorasti, on kiekkoa kallistettava pysty- tai vaakasuunnassa. Puiden syöttö kiekolle voidaan järjestää siten, että kiekon pyörimisliikkeestä aiheutuu nopeuskomponentti puiden suuntaan. Tämän ansiosta teräkiekko vetää haketettavat puut hakkuriin, jolloin erillistä syöttölaitteistoa ei tarvita. Kuvassa 6.2 esitetään puiden syöttö vaakasuorasti kiekon alareunasta vinosti kiekkoon nähden.



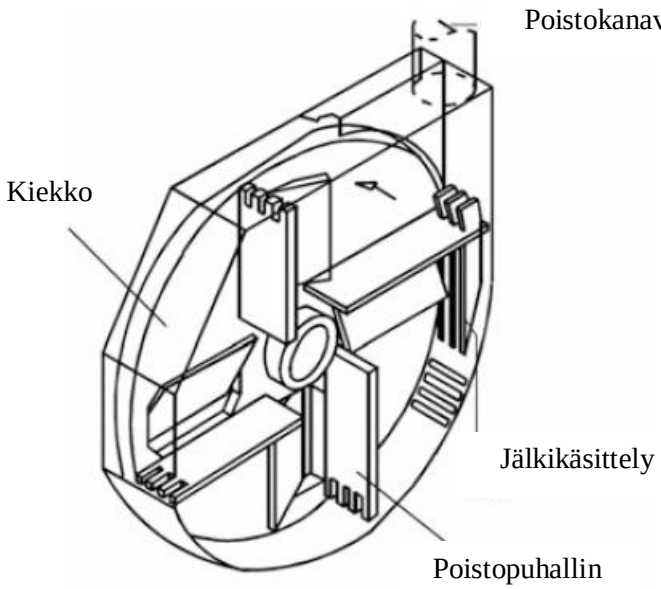

**Kuva 6.2.** Laikkahakkuri, jossa puu syötetään vaakasuorassa vinosti kiekkoon nähden (Naimi et al. 2006, s. 39).

Suurissa laikkahakkureissa kiekon halkaisija on jopa 3 000 mm (Döring 2013, s. 80). Naimi et al. (2006, s. 2) esittävät, että laikkahakkurin kiekko voi olla jopa 3 700 mm. Tällaiset suuret halkaisijat tulevat kyseeseen erittäin suurissa haketuslaitoksissa.

Laikkahakkuri on suosituin hakkurityyppi selluteollisuudessa (Naimi et al. 2006, s. 2; Döring 2013, s. 80). Laikkahakkurit valmistavat rumpuhakkureihin verrattuna tasalaatuisempaa ja tasakokoisempaa haketta. Laikkahakkurit kuluttavat enemmän energiaa hakkeen valmistukseen kuin rumpuhakkurit. (Röser 2014, s. 2.) Laikkahakkurissa terät ovat arkoja epäpuhtauksille ja epätasalaatuisessa raaka-aineessa olevat oksat pääsevät helposti hakkeen sekaan (Rinne 2010, s. 29). Laikkahakkurit ovat rumpuhakkureita kevyempiä ja halvempia, mutta rumpuhakkureissa raaka-aineen syöttö on helpompaa. Lisäksi rumpuhakkurit pystyvät käsittelemään halkaisijaltaan suurempia puita kuin laikkahakkurit. (Naimi et al. 2006, s. 3.) Toisaalta Döring (2013, s. 80) toteaa, että suuret

laikkahakkurit pystyvät käsittelemään jopa 800 mm halkaisijaltaan olevia puita. Nämä halkaisijat riittävät hyvin Suomessa kasvaville puille ja erityisesti energiapuulle.

Hakkeen palakoko riippuu terien ulkonevuudesta laikasta (Döring 2013, s. 81). Hakeprosessia voidaan säätää myös terien määrällä, pyörimisnopeudella sekä syöttönopeudella (Naimi et al. 2006, s. 3). Laikkahakkuri voi sisältää seulanomaisen osan, joka murskaa suuremmat partikkelit laikan jälkeen. Kuvassa 6.3 on esitetty laikkahakkurin jälkiprosessointiosa.

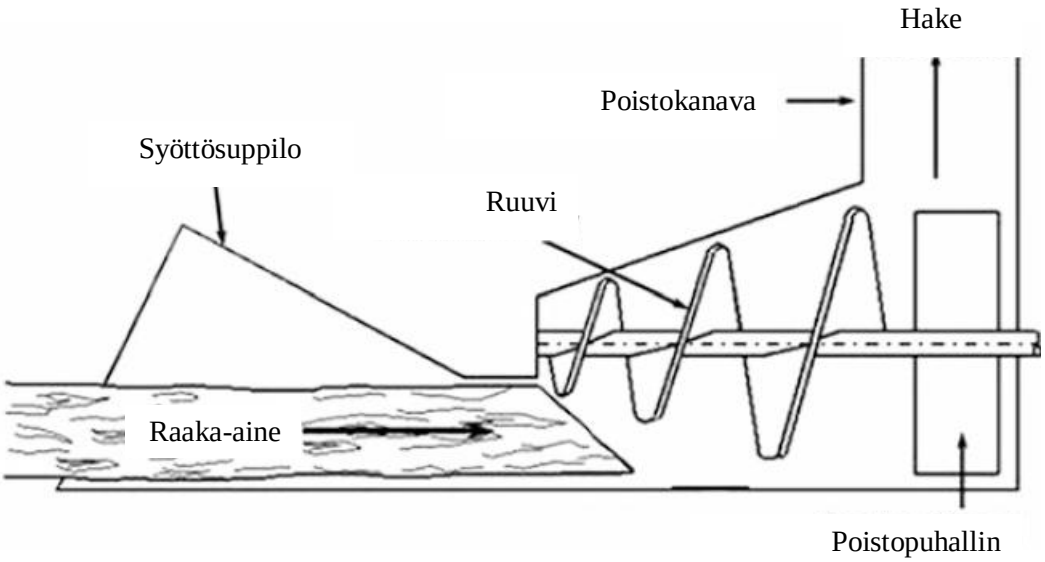



**Kuva 6.3.** Laikkahakkurin jälkiprosessointiosa ja puhallin (Döring 2013, s. 81).

Kuvassa 6.3 esitetty jälkikäsittely on yhdistetty puhaltimeen. Jälkikäsittelyllä parannetaan hakkeen laatua tekemällä hakkeesta tasakokoisempaa. Tasakokoinen hake lisää hakkeen polttolaitteiston käyttövarmuutta.

## 6.3 Ruuvihakkuri

Ruuvihakkurin terä on kartion muotoinen ruuvi, jonka ulkolaidat ovat terävät. Ruuvi on yleensä vaakatasossa ja sijoitettu kapenevaan syöttösuppiloon. (Döring 2013, s. 81.) Kuvassa 6.4 on esitetty ruuvihakkurin periaatekuva.




**Kuva 6.4.** Ruuvihakkurin periaatekuva (Döring 2013, s. 82).

Ruuvihakkuri ei tarvitse erillistä syöttöjärjestelmää, koska ruuvi siirtää raaka-ainetta sisään ja samalla leikkaa raaka-aineen pienemmiksi palasiksi (Döring 2013, s. 81). Kuvasta 6.4 nähdään, että ruuvihakkurin jälkeen akselilla on poistopuhallin.

Ruuvihakkurissa palakokoon vaikuttaa ruuvin spiraalin nousukulma (Döring 2013, s. 81). Naimi et al. (2006, s. 5) eivät käsittele ruuvihakkuria hakkurina. Tämä johtuu todennäköisesti ruuvihakkurin tuottamasta suuresta palakoosta, joka on Naimi et al. (2006, s. 5) mukaan yleensä 50-250 mm. Tämä ei täytä aiemmin todettua hakkeen tavoitepalakokoa, joka on Alakankaan (2000, s. 48.) mukaan 30-40 mm.

## 6.4 Yhteenveto hakkureista

Tässä kappaleessa esitetään hakkureiden ominaisuudet kootusti. Tällöin hakkureiden soveltuvuuksia käyttötarkoituksiin on helppo vertailla. Hakkureiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 6.1.

**Taulukko 6.1.** Hakkureiden ominaisuuksia kootusti (Döring 2013, s. 78; Lepistö et al. 2010, s. 30; Naimi et al. 2006, s. 3; Rinne 2010, s. 29; Röser 2014, s. 2).

| | Ominaista |
|---|---|
| Rumpuhakkuri | - Käsiteltävät raaka-aineet: sahauspinnat, karsittu ranka, kokopuu, latvusmassa ja risutukit<br>- Seuloja vaihtamalla voidaan muuttaa partikkelikokoa<br>- Suuri kapasiteetti<br>- Hyvä käytettävyys<br>- Pieni tilantarve<br>- Tarkka raaka-aineen käsittely<br>- Raaka-aineen syöttö helppoa<br>- Käsittelee halkaisijaltaan suuria puita |
| Laikkahakkuri | - Käsiteltävät raaka-aineet: sahauspinnat, karsittu ranka ja kokopuu<br>- Tasalaatuinen hake<br>- Suurempi energiankulutus kuin rumpuhakkurilla<br>- Ei kestä epäpuhtauksia<br>- Oksat pääsevät helposti terien läpi hakkeeseen<br>- Kevyt<br>- Edullinen |
| Ruuvihakkuri | - Käsiteltävät raaka-aineet: sahauspinnat ja karsittu ranka<br>- Toimintavarma<br>- Ei tarvitse erillistä syöttöjärjestelmää<br>- Usein suuri palakoko |

# 7 HAKKEEN KEINOKUIVAUS JA KUIVAUSLAITTEISTOT

Hakkeen keinokuivauksella pyritään tehokkaampaan kuivaukseen kuin luonnonkuivauksessa. Lepistön et al. (2010, s. 32.) mukaan hakkeen keinokuivauksella voidaan saavuttaa 15 prosentin kosteus. Föhrin (2008, s. 22) tutkielmassa kylmäilmakuivauksella saavutetaan 15 prosentin kosteus. Ihalainen ja Sikanen (2010, s. 12) käyttävät laskelmissaan pelletintuotannon kuivausasteena 11 prosentin kosteutta, johon päästään vain lisälämmönlähteen avulla. Useista lähdetiedoista voidaan päätellä, että kylmäilmakuivauksella voidaan saavuttaa 15 prosentin kosteus ja lämminilmakuivauksella voidaan saavuttaa kylmäilmakuivausta pienempi hakkeen kosteus.

Taloudellisesti hakkeen luonnonkuivaus on järkevää suorittaa ennen keinokuivausta, koska luonnonkuivauksessa kuluva energia ei aiheuta kustannuksia. Keinokuivaus on mahdollista suorittaa myös tuoreelle puulle, mutta kuivaaminen kuluttaa tällöin suuremman määrän energiaa kuin luonnossa esikuivatun puun kuivaaminen. Toisaalta keinokuivaus voi olla ainoa vaihtoehto hakkeen kuivaukselle, jos luonnonolosuhteet eivät kuivata puuta ja hakkeen kuivaaminen on välttämätöntä esimerkiksi varastoinnin tai markkinatilanteen kannalta.

Yleisesti kuivaus voidaan toteuttaa esimerkiksi adsorboimalla kosteus toiseen aineeseen, mekaanisesti puristamalla, jäähdyttämällä tai haihduttamalla. (Föhr 2008, s. 22.) Kuivausmenetelmien jaottelu voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, joita on esitetty taulukossa 7.1.

**Taulukko 7.1.** Kuivausmenetelmien jaottelu eri tapojen mukaan (Holmberg 2007, s. 9; Alpua 2011, s. 14-18; Döring 2013, s. 103-108).

| Kuivaava väliaine | Lämmönsiirtotapa | Kuivurin geometria |
|---|---|---|
| Ilma (kylmä ja lämmin)<br>Savukaasu<br>Höyry | Konvektio (suora-menetelmä)<br>Konduktio (epäsuora-menetelmä )<br>Yhdistelmä | Rumpukuivuri<br>Hihnakuivuri<br>Ruuvikuivuri<br>Kaskadikuivuri<br>Pneumaattinen kuivuri<br>Kerroskuivurit (petikerros-, siilo-, auma- ja kenttäkuivaus) |

Föhrin (2008, s. 22) mukaan ilmakuivaus on yleisin tapa keinokuivata puuta. Ilmakuivauksessa kosteasta puusta siirtyy vettä kuivausilmaan. Ilmakuivauksessa voidaan käyttää ympäristön lämpötilassa olevaa ilmaa tai lämmitettyä ilmaa. Tällöin kyseessä ovat kylmä- ja lämminilmakuivaus. Ilman sijasta kuivauskaasuna voidaan käyttää myös höyryä tai savukaasua. Ilmakuivauksen suuren käytön ja käytettävyyden vuoksi tässä diplomityössä keskitytään pääosin ilmakuivaukseen.

Vesi on puussa yleensä nestemäisessä muodossa. Täten veden täytyy höyrystyä, ennen kuin vesi voi sitoutua ilmaan. Tällöin veden höyrystyminen sitoo energiaa. Energiansäilymislain mukaan energiaa ei häviä, joten prosessiaineiden lämpötilat laskevat veden faasimuutoksen vuoksi. Toisaalta hakkeen lämpötila voi suurentua, jos hakkeen alkuperäinen lämpötila on pienempi kuin kuivausilman lämpötila. Tämä tulee kysymykseen, kun käytetään suurempaa kuivauslämpötilaa kuin ympäristön lämpötila. Tällöin kuivattavan hakkeen lämpötila muuttuu alkutilasta tasapainotilaan. Tasapainolämpötilassa hakkeen lämpötila ei muutu, jolloin veden höyrystäminen pienentää ainoastaan kuivauskaasun lämpötilaa. Ideaalisessa tilanteessa kuivauskaasun entalpia säilyy vakiona (Alpua 2011, s. 27). Myös prosessoitavien aineiden massa ei muutu, mikä tarkoittaa, että hakkeesta poistuvan veden massa siirtyy yhtä suurena massana kuivausilmaan.

Taulukossa 7.1 oleviin hakkeen kuivauslaitteistoihin voidaan jaotella kaikenkokoiset laitteistot. Tavallisesti hakekuivurit ovat varastokuivureita, jolloin kuivurissa voidaan

kuivata sekä varastoida haketta (Föhr 2008, s. 28). Tämä on tyypillistä hakkeen pienkäytössä. Pienet varastokuivurit ovat ilmalla toimivia ja konvektioon perustuvia kuivureita. Pienkäytössä olevissa varastokuivureissa voidaan varastoida esimerkiksi vuoden käyttötarvetta vastaava määrä haketta. Suuremmassa kokoluokassa hakkeen varastointi ei onnistu kuivurissa, koska käytettävät hakemäärät ovat huomattavasti suurempia. Suuren kokoluokan laitteistoja voidaan käyttää teollisuuden, kuten voimalaitosten, hakkeen kuivaukseen. Suuremman kokoluokan kuivurit soveltuvat myös kuivatun hakkeen keskitetylle tuotannolle.

## 7.1 Kylmä- ja lämminilmakuivaus

Kylmäilmakuivauksella voidaan parantaa luonnonkuivauksen kuivaustulosta. Toisaalta myös kylmäilmakuivaus on säästä riippuvaa. (Raitila ja Heiskanen 2014, s. 6.) Tämä asettaa rajoitteita kylmäilmakuivauksen kaupalliselle toiminnalle. Talvella hakkeen kysyntä on suurinta, mutta kesällä kuivausolosuhteet ovat hyvät. Tällöin kylmäilmakuivauksella tuotettu myytävä hake edellyttää lähes vuoden haketarvetta vastaavat hakevarastot. Tämä kasvattaa varastointikustannuksia merkittävästi. Lisäksi kuivauslaitteistojen tulee olla suuria, koska kylmäilmakuivaus on lämminilmakuivausta hitaampaa ja kuivauskausi on lyhyt.

Lämminilmakuivurit voivat toimia ympärivuotisesti säästä riippumatta (Raitila ja Heiskanen 2014, s. 6). Tällöin varastot voivat olla pienempiä ja haketta voidaan tuottaa kysynnän mukaan. Toisaalta myös lämminilmakuivauksessa kannattaa hyödyntää korkeita ulkolämpötiloja ja alhaisia ilman kosteuspitoisuuksia kuivausajankohtaa valitessa. Tällä voidaan parantaa kuivauksen kannattavuutta.

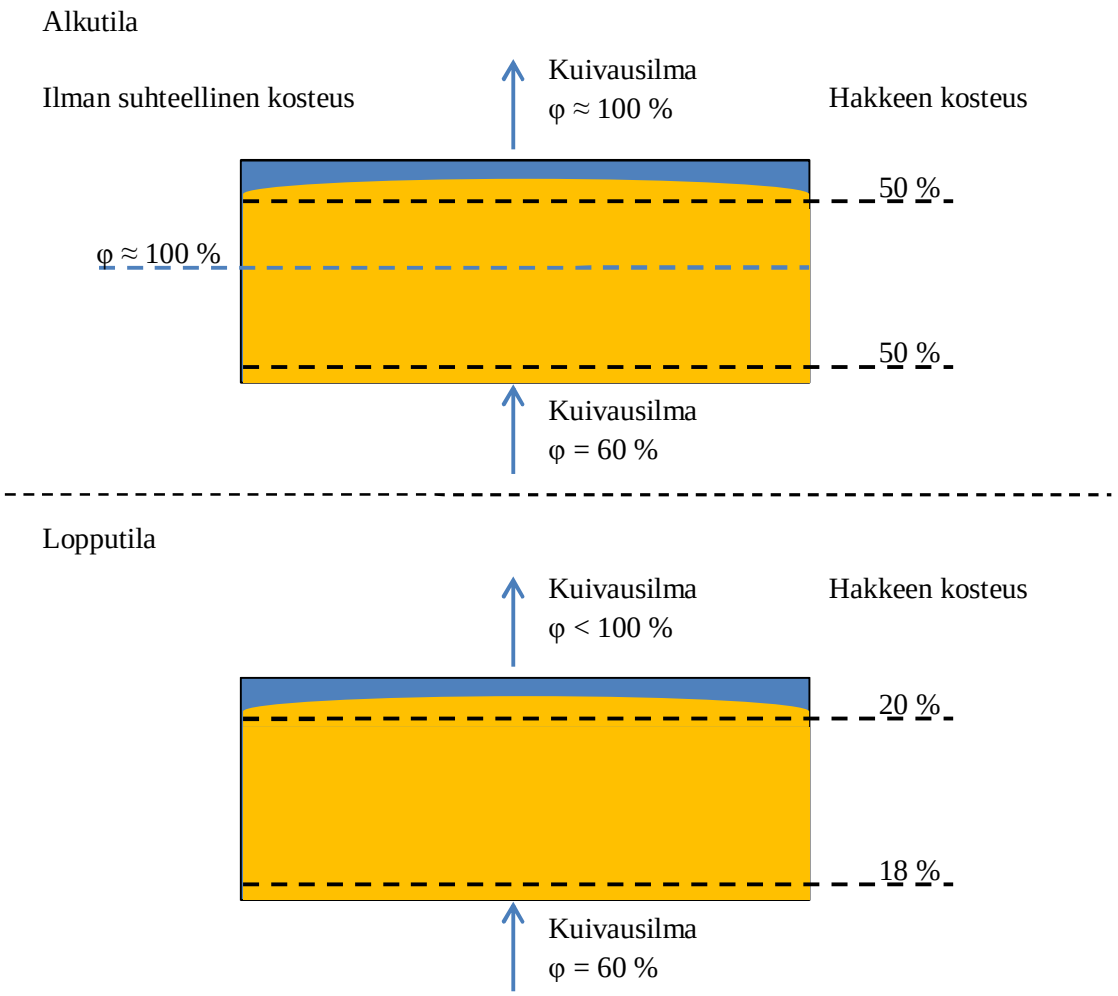
Yleisesti hakkeen kuivaaminen tapahtuu Suomessa kylmäilmakuivauksella, mutta suuren kokoluokan lämpölaitokset kuivaavat haketta hukkalämmöllä (Lepistö et al. 2010, s. 33). Myös Föhr (2008, s. 32) toteaa tutkielmassaan, että pientaloissa ja maatiloilla yleisin kuivaustapa on kylmäilmakuivaus, jonka suosio on kasvanut nopeasti.

## 7.2 Kuivauksen jatkuvuuteen perustuva jaottelu

Taulukossa 7.1 on jaoteltu hakkeen kuivausmenetelmät kolmella eri tavalla. Kuivaustapahtuman kannalta jaottelun voi tehdä myös panostyylisiin ja jatkuvatoimisiin kuivureihin. Panostyyliset kuivurit ovat yleisiä nykyisissä pienissä hakkeen kuivausmenetelmissä. Panoskuivurissa kuivuriin siirretään kuivattava erä, joka poistetaan kokonaisuudessaan kuivauksen jälkeen. Jatkuvatoimisessa prosessissa kuivuriin syötetään kuivattavaa materiaalia ja poistetaan kuivattua tuotetta samanaikaisesti.

### 7.2.1 **Panoskuivaus**

Panoskuivauksessa prosessi etenee kohti tasapainotilaa, jolloin toiminta-arvot ovat vakiot. Hakkeen kuivauksessa tällainen tila saavutetaan, kun kuivausilma ei sido enää kosteutta hakkeesta. Tällöin prosessissa kuluu energiaa, mutta hakkeen kuivumista ei tapahdu. Täten tasapainotila ei ole toivottu todellisessa prosessissa. Ennen kuin täydellinen tasapaino saavutetaan, erä saavuttaa halutun kosteuden ja tilalle vaihdetaan uusi erä. Täten panoskuivurissa aiheutuu katkoksia kuivauksen yhteydessä. Kuvassa 7.1 on esitetty panoskuivauksen periaate varastokuivurissa.




**Kuva 7.1.** Panoskuivauksen alku- ja lopputilan periaatekuvat arvioiduilla toiminta-arvoilla ja loppukosteudella 20 prosenttia.

Kuvasta 7.1 nähdään, että esimerkkitapauksen toiminta-arvot muuttuvat alku- ja loppupisteiden välillä merkittävästi. Oletetaan, että kuivuri on mitoitettu kuivaustapahtuman keskimääräisen hakkeen kosteuden mukaan. Tällöin alkutilassa ilman suhteellinen kosteus saavuttaa maksimaalisen arvon ennen kuin ilma siirtyy hakekasan pintaan. Tämä arvo pyritään mitoittamaan lähelle 100 prosenttia, jolloin kuivurin hyötysuhde on hyvä. Kun ilma saavuttaa maksimikosteuspitoisuuden, ilma ei sido kosteutta hakkeesta itseensä. Tällöin yläpuolinen hakepatja aiheuttaa prosessin kannalta ylimääräistä vastapainetta ja kasvattaa puhaltimen tehoa. Tämä kasvattaa prosessin sähkönkulutusta.

Lopputilassa hakkeen kosteus on pienempi kuin puun syiden kyllästymispiste eli PSK. Tällöin puusta siirtyy vähemmän kosteutta kuivausilmaan, jolloin ilma ei saavuta lähelle 100 prosentin suhteellisen kosteuden arvoa. Tämä huonontaa kuivurin hyötysuhdetta. Lopputilassa hakekasassa esiintyy myös kosteusjakauma, koska alemmat hakekerrokset ovat kuivuneet pienemmän kosteuspitoisuuden ja korkeamman lämpötilan omaavassa ilmassa. Jos hakkeen täytyy alittaa tietty kosteus, alimmat kerrokset kuivuvat vaadittuun tasoon nähden liian paljon. Tällöin prosessissa kuluu ylimääräistä energiaa.

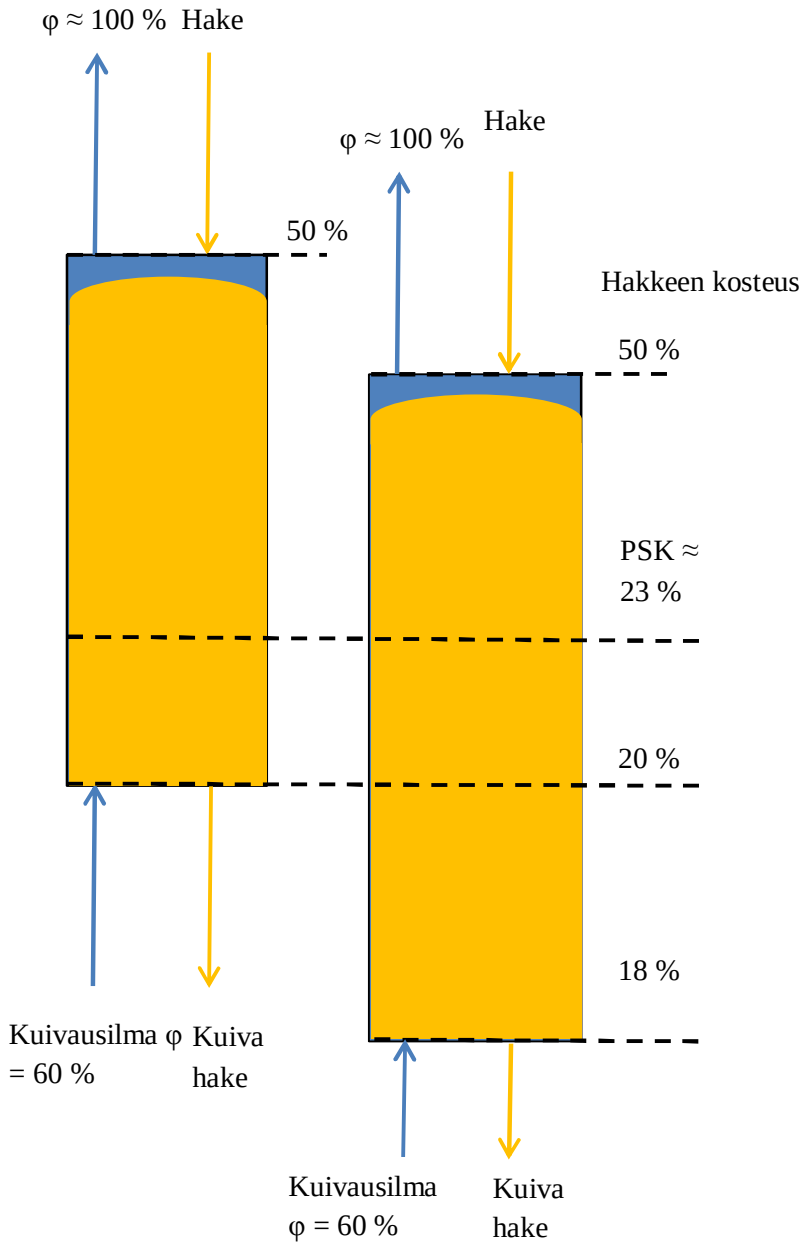
### 7.2.2 **Jatkuvatoiminen kuivaus**

Jatkuvassa prosessissa voidaan välttyä panoskuivaukselle tyypillisistä ongelmista. Jatkuvassa kuivausprosessissa polttoaineen ja ilman virtaussuunnat ovat kuivausteknisesti merkittävässä asemassa. Kuivauksen kannalta tehokkainta on vastavirtakuivaus, jossa polttoaine kulkee ilman kanssa vastavirtaan. Tällöin pienimmän kosteuden sisältämä ilma kuivaa pienimmässä kosteudessa olevaa haketta, jolloin kuivaaminen on tehokkainta. Tällöin vastavirtakuivausprosessissa PSK:n raja-arvoa pienemmän kosteuden omaavat hakkeet kuivuvat ilmavirtauksen suunnassa ensin, jolloin PSK rajan jälkeistä ilmaa käytetään kosteampien kerrosten kuivaamiseen. Tällöin kuivuri hyödyntää kuivausilmaa mahdollisimman tehokkaasti virtauksien kannalta. Kuivaus voidaan toteuttaa myös myötävirtauksena, jolloin virtaukset etenevät samaan suuntaan. Tällöin suurimman kosteuden omaava ilma kuivaa pienimmän kosteuden omaavaa haketta, jolloin kosteuden sitoutuminen ilmaan ei ole yhtä tehokasta kuin vastavirtakuivauksessa.

Myötävirtakuivausta voidaan hyödyntää esimerkiksi rumpukuivureissa, jos kuivauslämpötilat ovat erittäin korkeita ja kuivattavat materiaalit ovat herkkiä korkeille lämpötiloille. Myötävirtakuivauksessa kuuma kuivauskaasu jäähtyy nopeasti kohdatessaan kostean materiaalin kuivurin alussa (Amos 1998, s. 6). Jatkuvatoiminen kuivaus voidaan toteuttaa myös ristivirtauksella tai muulla virtausgeometrialla. Tällainen voi tulla kyseeseen, jos polttoaineen siirtäminen ja kuivausgeometria vaativat kyseisiä virtausgeometrioita.

Jatkuvatoimisen kuivurin toiminta-arvot vakioituvat kuivurin toimiessa riittävän kauan. Tällöin kuivurin toimintaa on helppo säätää ja hallita. Toisaalta jatkuvatoiminen kuivuri vaatii kuivattavan materiaalin syöttö- ja poistolaitteet, jotka toimivat prosessin aikana.

Kyseiset laitteistot mahdollistavat tasaisen ja jatkuvan tuotantokapasiteetin, jolloin tuotteen käsittelylle ei tarvita kookkaita siirtelyjärjestelmiä erän vaihdon yhteydessä. Laitteiston käyttöaste on myös suurempi, koska erien vaihdoissa ei kulu tuotantoaikaa. Kuvassa 7.2 esitetään kahden eri loppukosteuden omaavan hakkeen jatkuvat vastavirtakuivausprosessit vakiokuivaustehoilla.




**Kuva 7.2.** Hakkeen jatkuvatoiminen vastavirtakuivaus tavoitekosteuksiin 20 ja 18 prosenttia vakiokuivausteholla.

Kuvassa 7.2 on havainnollistettu jatkuvan kuivausprosessin lisäksi loppukosteuden vaikutusta prosessiin ja laitteistoon. Kuvassa 7.2 esitetyissä tapauksissa kuivaustehot ovat samat molemmissa prosesseissa. Myös kuivausilman on oletettu olevan samassa lämpötilassa. Tällöin 18 prosenttisen hakkeen kuivaaminen vaatii enemmän ilmaa ja tuotantokapasiteetti on pienempi kuin 20 prosenttisella hakkeella. Kuvassa 7.2 PSK:n raja on esitetty havainnollisuuden vuoksi samalle korkeustasolle. Kuivuri on alaosasta pidempi, koska kosteuden pieneneminen 20 prosentista 18 prosenttiin aiheuttaa kosteuden hitaamman sitoutumisen kuivausilmaan. Edettäessä kuivausilman suunnassa 20 prosentin taso on esitetty samassa tasossa molemmissa tapauksissa. Todellisessa tapauksessa 20 prosentin taso oikeanpuoleisessa prosessissa voi poiketa kuvasta 7.2, koska vasemman puoleisessa tapauksessa 20 ja 23 prosentin välinen kuivaus tapahtuu kuivemmalla ilmalla, jolloin kosteuden sitoutuminen on tehokkaampaa. Toisaalta oikeanpuoleisessa tapauksessa hakkeen massavirta on pienempi, joka siirtää tasoja alaspäin. Kyseisen tason sijainti riippuu useasta tekijästä ja erityisesti kuivattavan hakkeen ominaisuuksista ja kyvystä vapauttaa vettä ilmaan.

Oikeanpuoleisessa tapauksessa 50 prosentin taso on alempana kuin vasemmanpuoleisessa tapauksessa. Tämä aiheutuu siitä, että molemmissa tapauksissa samansuuruinen kuivausilmavirta on jo sitonut kosteutta hakkeen kosteustasoilla välillä 18-20 prosenttia, jolloin välillä 20-50 prosenttia ilman kyky sitoa vettä ei ole yhtä suuri kuin vasemmanpuoleisessa tapauksessa. Jos yläpuoliset hakekerrokset olisivat yhtä suuret, oikeanpuoleisessa tapauksessa suhteellisen kosteus saavuttaisi maksiarvon ennen hakkeen pintaa, jolloin yläpuolinen kerros aiheuttaisi ylimääräistä vastapainetta. Kokonaisuudessaan kuivurin dimensiot kuivausilmavirtauksen suunnassa kasvavat, kun loppukosteuden arvo pienenee. Tämän aiheuttaa suuremmilla kosteuksilla helpommin poistuvan vapaan veden ja pienillä kosteuksilla hitaasti poistuvan sidotun veden erot siirtyä kuivausilmaan. Kuivurin ja hakepatjan pituuden kasvaessa vastapaine ja puhallinteho kasvavat.

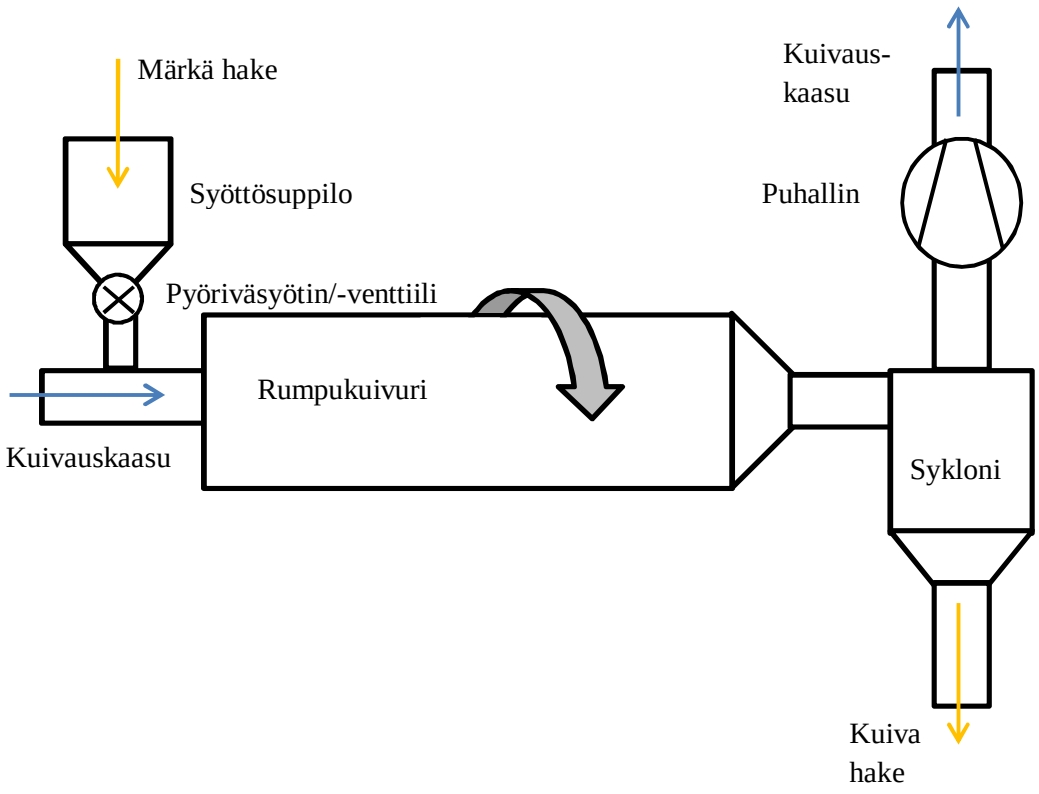
## 7.3 Kuivurin geometriaan perustuva jaottelu

Taulukossa 7.1 kuivurit jaotellaan geometrian mukaan rumpukuivureihin, hihnakuivureihin, ruuvikuivureihin, kaskadikuivureihin, pneumaattisiin kuivureihin ja kerroskuivu-

reihin. Tässä kappaleessa ruuvikuivurit jätetään tarkastelematta, koska kyseisen kuivurin käyttö kiinteän biomassan kuivauksessa on harvinaista (Holmberg 2007, s. 10).

### 7.3.1 **Rumpukuivuri**

Rumpukuivuri on yleisin kuivausmenetelmä biomassan kuivauksessa. Rumpukuivuri on tyypillisesti jatkuvatoiminen suorarumpukuivuri, missä hake pyörii hitaasti pyörivässä rummussa. Hake nousee pyörivän rummun mukana seinämille ja tippuu kuivauskaasun läpi. Tällöin lämpö siirtyy konvektiolla kuivauskaasusta biomassaan. Kuivauskaasuna voi olla ilmaa tai savukaasuja. Tyypillisesti biomassat ja kuivauskaasut kulkevat samaan suuntaa rumpukuivurissa, jolloin kuumimmat kaasut kohtaavat kosteimman biomassan. Vastavirtakuivuria käytetään kuivattaville materiaaleille, jotka eivät ole herkkiä korkeille lämpötiloille. Vastavirtakuivauksessa on suuremmat paloturvallisuusriskit, koska kuumat kaasut kohtaavat kuivan materiaalin. (Amos 1998, s. 5-6; Alpua 2011, s. 14.) Kuvassa 7.3 on esitetty rumpukuivurin periaate, jossa kuivauskaasut ja hake kulkee samaan suuntaan.




**Kuva 7.3.** Suorarumpukuivuri, jossa kuivauskaasut ja hake kulkevat samaan suuntaan (Amos 1998, s. 6).

Hihnakuivuriin verrattuna rumpukuivurissa voidaan käyttää korkeampia kuivauslämpötiloja (Döring 2013, s. 105). Holmbergin (2007, s. 10) tutkielmassa rumpukuivurin kuivauslämpötila on 200-600 °C. Amos (1998, s. 7) toteaa rumpukuivurin kuivauskaasujen sisäänmenolämpötilaksi 232-1 093 °C ja ulostulolämpötilaksi 71-110 °C. Amos toteaa myös, että suurimmassa osassa kuivureita ulostulolämpötila on yli 104 °C, jotta hapot ja hartsit eivät tiivistyisi kuivurin pinnoille. Mikäli hakkeen kuivaamisessa kuivausilma johdetaan ulos, kuivauslämpötilan tulisi olla alle 100 °C. Lämpötilan kasvaessa yli 100 °C:een ulos pääsevien hiilivetyjen määrä kasvaa nopeasti. (Yrjölä 2006, s. 15.) Kyseiset tutkimukset ovat ristiriidassa keskenään kuivauslämpötilojen osalta. Amoksen tutkielman happojen tiivistyminen liittyy todennäköisesti savukaasujen happojen, kuten rikkihapon tiivistymiseen. Rikkihapon tiivistyminen tulee kyseeseen kun käytetään runsasrikkisiä polttoaineita kuten turvetta. Ilmakuivauksessa kuivaavat kaasut eivät ole osallistuneet palamisreaktioon. Täten rikkihapon tiivistymistä ei tapahdu, koska prosessissa ei synny rikin oksideja ja edelleen rikkihappoa. Kyseisten tietojen pohjalta voidaan todeta, että hakkeen kuivauksessa kuivauslämpötiloihin tulee kiinnittää huomiota käytettävän kuivauskaasun mukaan. Jos kuivurissa polttoaine ja kuivauskaasu kulkevat samassa suunnassa, märkä polttoaine jäähdyttää kuuman kaasun nopeasti, jolloin lämpötilat pysyvät alhaisempina kuivurin sisällä.

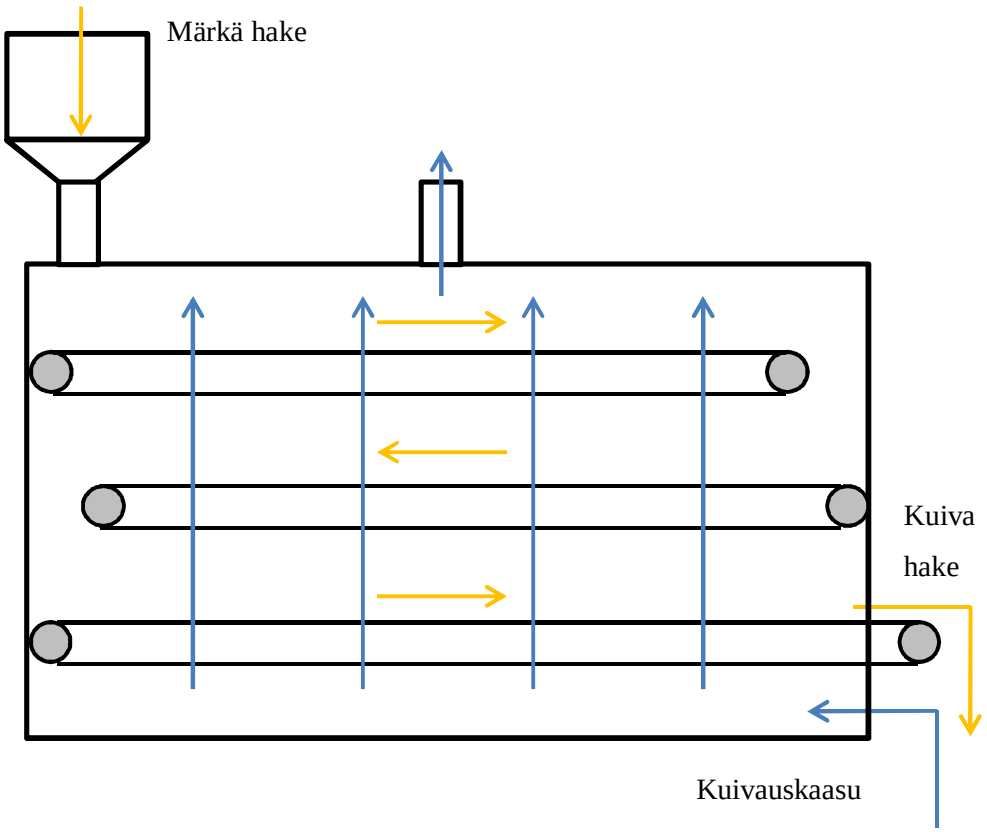
Epäsuorassa rumpukuivurissa kuivauskaasut kulkevat rummun seinämien sisällä lämmittäen rummun sisäpintaa. Tällöin lämpö siirtyy konvektiolla kuivauskaasusta rumpuun ja rummusta konduktiolla ja säteilemällä biomassaan. Menetelmää käytetään materiaaleille, jotka pilaantuvat savukaasuista tai reagoivat ilman kanssa. Suoran ja epäsuoran menetelmän yhdistelmässä kuivauskaasu kulkee aluksi rummun keskiakselilla lämmittäen rummun sisältöä. Akselilta kaasu johdetaan rummun sisälle, jolloin kaasu on kosketuksessa kuivattavan materiaalin kanssa. Tällöin akselin sisällä oleva kaasu lämmittää hakkeen lisäksi rummun sisällä olevaa kaasua. Kyseistä menetelmää voidaan käyttää paloturvallisuuden parantamiseksi ja lämpötilatasojen rajoittamiseksi. (Amos 1998, s. 7; Alpua 2011, s. 14.)

Rumpukuivurin etuina ovat sen soveltuvuus erilaisille partikkeleille, vahva rakenne ja pienet huoltokustannukset. Huonoina puolina ovat pöly- ja hajupäästöt, tukkeumat suurilla kuoren kappaleilla ja paloturvallisuusriskit kuivurin jälkeen ja ennen kuivuria.

(Holmberg 2007, s. 10.) Nummelin, Hankalin ja Raiko (2014, s. 21) esittävät eduiksi myös suuren kapasiteetin, pienemmän ominaisenergiankulutuksen hihnakuivureihin verrattuna ja soveltuvuuden eri kosteuden omaaville polttoaineille. Kuivurin etuna Holmberg mainitsee soveltuvuuden erilaisille partikkeleille, mutta huonona puolena mainitaan tukkeumat suurilla kuoren kappaleilla. Rumpukuivurissa materiaali liikkuu rummun sisällä, jossa on ulkonevia listoja hakkeen liikkuvuuden parantamiseksi. Tällöin on mahdollista, että suuret kappaleet voivat tarttua kuivuriin ja aiheuttaa tukoksen. Hihnakuivurissa tukkeuma on lähes mahdoton, koska materiaalit eivät liu'u pinnoilla ja kuivurin rakenteissa ei ole ulkonevia liikkuvia kappaleita. Täten voidaan todeta, että molemmat kuivurit ovat soveltuvia erilaisille kuivattaville kappaleille, mutta hihnakuivuri on toimintavarmempi suurilla kappaleilla. Priimatun hakkeen tuotannossa kuivattava hake on mahdollisimman tasalaatuista haketuksen jälkeen, jolloin suuret kappaleet ovat epätodennäköisiä kuivauksessa. Täten rumpukuivuri soveltuu priimatun hakkeen raaka-aineen kuivaukseen.

### 7.3.2 **Hihnakuivuri**

Hihnakuivuri eli toisilta nimiltään viirakuivuri tai kerroskuivuri, on yleisin kuivurityyppi käytettäessä matalia kuivauslämpötiloja. Hihnakuivurilla tarkoitetaan kuivuria, jossa materiaalia kuivataan hihnan päällä puhaltamalla ilmaa hihnan läpi. Samanaikaisesti hihna kuljettaa polttoainetta kuivurissa eteenpäin, jolloin prosessista saadaan jatkuva. Polttoaineen ominaisuudet vaikuttavat polttoainekerroksen yli vallitsevaan paine-eroon ja siten myös kerroksen paksuuteen. Lämmitetty ulkoilma voidaan puhaltaa hihnan ja patjan läpi ala- tai yläpuolelta. Yläpuolisella puhalluksella paine-erot patjan läpi ovat suuremmat ja pölypäästöt pienemmät kuin alapuolisella puhalluksella. Hihnakuivurissa hihna on tyypillisesti kudottu polymeeriviira, jota käytetään muun muassa paperikoneissa. Korkeampia kuivauslämpötiloja käytettäessä hihnan materiaali voi olla metallia. Hihnakuivurissa voi olla yksi tai useampia kuivauskerroksia. Kuvassa 7.4 on esitetty monivaiheisen hihnakuivurin periaatekuva. (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 23.)




**Kuva 7.4.** Monikerroksisen hihnakuivurin periaatekaavio (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 23).

Kuvasta 7.4 nähdään, että hake kulkee monivaiheisessa hihnakuivurissa edestakaisin siirtyen seuraavalle hihnalle. Yksikerroksisessa kuivurissa hake kuivaa yhdellä kerroksella, jolloin hihnan toisessa päässä on kuivaa ja toisessa päässä märkää haketta. Tällöin kuivassa päässä kuivausilma ei ehdi sitoa kosteutta itseensä niin, että ilman kosteus lähestyisi 100 prosenttia. Tällöin kuivauksen hyötysuhde laskee. Monikerroksisessa hihnakuivurissa ei ole kyseistä ongelmaa, koska kuivausilma käytetään useampaan kertaan eri kerroksissa. Kuvasta 7.4 nähdään, että alimman kerroksen oikeassa laidassa kuivausilma läpäisee kuivimman kohdan hakepatjasta. Kyseinen ilma siirtyy seuraavaan kerrokseen, jolloin läpäisykohdassa kuivausilma läpäisee keskimmäisen kerroksen kosteimman kohdan. Täten monivaiheisessa hihnakuivurissa kuivausilman kosteuserot tasoittuvat kerrosten edetessä.

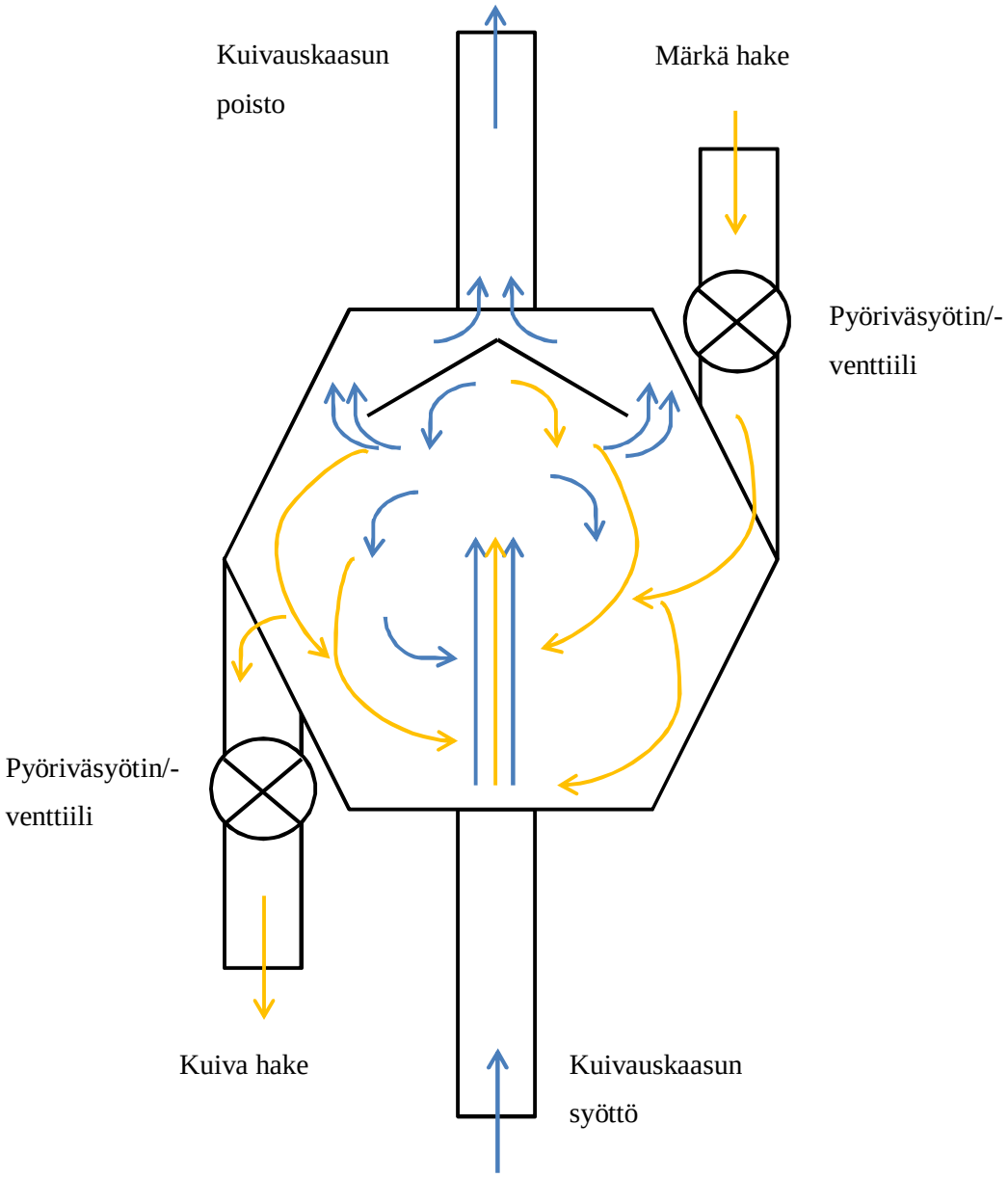
Hihnakuivurissa tyypilliset kuivauslämpötilat ovat 80-120 °C (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 23). Döring (2013, s. 102) rajaa tyypilliset hihnakuivurin kuivauslämpö-

tilat välille 90-110 °C. Holmberg (2007, s. 10) rajaa kuivauslämpötilat 30-150 °C välille. Maksimilämpötila määräytyy VOC-yhdisteiden eli haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöjen kasvamisen mukaan (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 23). VOC-yhdisteet ovat hiilivetyjä tai hiilivetyjen kaltaisia muita yhdisteitä. Kyseiset lämpötila-alueet täsmäävät hyvin myös Yrjölän (2006, s. 15) tutkielmassa esitettyyn 100 °C rajaan, jonka jälkeen vapautuvien hiilivetyjen määrä kasvaa nopeasti.

Hihnakuivurin etuja ovat sen soveltuvuus erilaisille kuivattaville materiaaleille, säädettävyys, sekundäärilämpöjen hyödyntäminen, kestävä ja yksinkertainen rakenne ja korkea käytettävyys. Rumpukuivuriin verrattuna hihnakuivurissa on pienemmät paloturvallisuusriskit ja päästöt, mutta hihnakuivurissa on suurempi investointikustannus, korkeampi käyttöteho, suurempi koko ja suuremmat huoltokustannukset. (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 23-24.) Holmberg (2007, s. 10) toteaa, että hihnakuivurin huonoihin puoliin kuuluu paloturvallisuusriski kuivurin sisällä. Tämä johtuu oletettavasti siitä, että kuivurin sisällä on ilmaa. Tällöin ilman sisältämä happi mahdollistaa palamisen kuivurin sisällä. Holmbergin tutkimuksessa rumpukuivauksen kuivauskaasuna käytetään savukaasuja, jolloin kuivurin sisällä on erittäin vähän happea ja palaminen on lähes mahdotonta.

### 7.3.3 **Kaskadikuivuri**

Kaskadikuivuria on hyödynnetty biomassan kuivauksessa Euroopassa ja erityisesti Ruotsissa (Alpua 2011, s. 15). Kaskadikuivurissa kuivattava materiaali syötetään kuuman kuivauskaasun kanssa suljettuun kammioon. Kuivauskaasuna voidaan käyttää ilmaa tai savukaasuja. Kammiossa materiaali leijuu kuivauskaasun kanssa kammion yläosaan. Yläosasta materiaali putoaa alas ja nousee kaasun virtauksen ansiosta uudelleen ylös. Osa materiaalista poistuu kammion sivuista kuivattuna materiaalina. Kuivauskaasu poistuu kammion yläosasta. Kuivausaika on muutaman minuutin ja kuivauslämpötila on 160-280 °C. (Amos 1998, s. 9; Holmberg 2007, s. 10.) Kaskadikuivuria voidaan pitää eräänlaisena leijukerroskuivurina (Alpua 2011, s. 15). Kuvassa 7.5 on esitetty kaskadikuivurin toimintaperiaate.




**Kuva 7.5.** Kaskadikuivurin toimintaperiaate (Amos 1998, s. 12).

Kaskadikuivuri soveltuu eri partikkelikokoisen biomassan kuivaamiseen. Kuivurin ulkomitat ovat kohtuulliset ja rakenne on yleisesti vahva. Kuivuri on altis korroosiolle ja eroosiolle. Heikkouksia ovat myös paloturvallisuusriski kuivurin jälkeen kuivatussa hakkeessa ja alasajon aikana sekä pitkien kuivattavien kappaleiden kiertyminen pyörivien osien ympärille. (Holmberg 2007, s. 10.)

### 7.3.4 **Pneumaattinen kuivuri**

Pneumaattisessa kuivurissa kuivattava materiaali johdetaan suuren virtausnopeuden ja lämpötilan omaavaan kaasuun. Virtauksessa materiaali luovuttaa kosteutta kuivauskaasulle. Kuivauksen jälkeen partikkelit ja kaasu erotetaan toisistaan syklonilla. Kuivauskaasuna voi olla ilmaa, savukaasuja tai tulistettua höyryä. (Amos 1998, s. 7; Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 21-22).

Pneumaattisessa kuivauksessa kuivausaika on lyhyt ja laitteistot ovat pienikokoisia esimerkiksi rumpukuivuriin verrattuna. Höyryllä toimivissa kuivureissa lämmönkulutus on pieni, jos kuivuri on varustettu lämmöntalteenotolla eli LTO:lla. Savukaasulla toimivat kuivurit ovat vahvarakenteisia. Kuivurin ominaissähkönkulutus on suuri, koska kuivauskaasu kiihdytetään suureen nopeuteen ja polttoainepartikkelit joudutaan pienentämään mekaanisesti ennen kuivausta. Polttoainepartikkelien tulee olla pieniä, jotta polttoaine muodostaa ilman kanssa sopivan seoksen. Täten pneumaattiset kuivurit eivät sovellu erikokoisille partikkeleille yhtä hyvin kuin muut kuivurityypit. Myöskään liian pienet partikkelit eivät sovellu priimatun hakkeen tuotantoon. Kyseisten kuivurien huonoina puolina ovat myös korroosion ja eroosion aikaansaamat suuret huoltokustannukset sekä tulipaloriskit. Höyryllä toimivissa kuivureissa on esiintynyt vuotoja. (Holmberg 2007, s. 10; Amos 1998, s. 7.)

### 7.3.5 **Kerroskuivaus**

Kerroskuivauksessa kuivuminen tapahtuu polttoainekerroksen läpi puhallettavan ilman vaikutuksesta. Jos puhallettavan ilman nopeus pysyy alle polttoainepartikkelien leijutusnopeuden, kuivausta kutsutaan kiinteäkerroskuivaukseksi. Kerroskuivaus voidaan toteuttaa panosperiaatteella tai jatkuvatoimisena prosessina. Jatkuva prosessi vaatii polttoaineen syöttö- ja poistolaitteistot. Kerroskuivureita ovat muun muassa petikerros-, siilo-, auma- ja kenttäkuivuri. Osa hakkeen kuivauksen tutkijoista toteaa myös hihnakuivurin kuuluvan kerroskuivaustekniikkaan. (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 23-25.) Suomessa pienkäytössä tapahtuva kuivaus on yleensä kiinteäkerroskuivausta kylmällä ilmalla.

Petikerroskuivurissa polttoaine syötetään kuivurin arinatasolle kuivurin päädystä. Arinataso kuljettaa polttoaineen kuivurin läpi toiseen päätyyn, josta kuivan polttoaineen poisto tapahtuu. Kuivausilma puhalletaan arinatason läpi polttoainekerrokseen. Petikerroskuivurin etuja ovat yksinkertainen ja vahva rakenne sekä alhaisten kuivauslämpötilojen mahdollistama ylijäämälämpöjen hyödyntäminen. Polttoaineen kuivaaminen kestää useita tunteja riippuen hakkeen loppukosteudesta. (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 25.)

Siilokuivurissa polttoaine kuivataan varastointisiiloissa. Kuivurin periaate on lähes vastaava kuin petikerroskuivurissa, mutta polttoaineen syöttö toteutetaan siilon yläosasta ja poisto siilon pohjalta. (Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 26-27.) Nummelin, Hankalin ja Raiko (2014, s. 26-27) esittävät, että siilo- ja petikerroskuivureissa kuivausilma puhalletaan vertikaalisti. Kuivauksen kannalta kostean polttoaineen syöttösuunta aiheuttaa kuivausolosuhteille eroja. Vaakasuuntainen polttoaineen liikuttaminen aiheuttaa kuivattavan materiaalin kosteuseroja polttoaineen etenemissuunnassa. Tällöin kuivaustilanne on osittain vastaava kuin kuvassa 7.1, jossa on esitetty panoskuivauksen periaate. Kuivurin alkuvaiheessa tilanne on panoskuivauksen alkutila ja lopussa tilanne on panoskuivauksen lopputila. Tällöin kuivauksen hyötysuhteet laskevat kappaleessa 7.2.1 esitetyillä perusteilla. Siilokuivaus toimii kuten kuvassa 7.2 esitetty jatkuvatoiminen kuivausprosessi, jossa vastaavia haasteita ei ole.

Aumakuivauksessa polttoaine kuivataan polttoaineaumassa. Tällöin aumaan muodostetaan ilmatunneli esimerkiksi merikonteista, joista kuivausilma johdetaan aumaan. Aumakuivauksessa kuivausajat ovat pitkiä ja loppukosteus vaihtelee merkittävästi. Kuivausmenetelmä on riippuvainen sääoloista. (Alpua 2011, s. 18; Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 28.)

Kenttäkuivauksessa polttoaine levitään asfalttikentälle noin 5-15 senttimetrin paksuiseksi kerrokseksi. Polttoaineen kuivaus tapahtuu auringon säteilyenergian ja tuulen vaikutuksesta. Polttoainekerrosta käännellään kuivauksen aikana. Koska polttoaineen kuivaus tapahtuu ulkona, on menetelmä erityisen riippuvainen sääoloista ja polttoaineen kuivausta voidaan toteuttaa ainoastaan kausiluontoisena. Kenttäkuivausta hyödynnetään palaturpeen tuotannossa. (Alpua 2011, s. 18; Nummelin, Hankalin ja Raiko 2014, s. 29.)

### 7.3.6 **Yhteenveto kuivureista**

Tässä kappaleessa esitetään kuivureiden ominaisuudet kootusti geometrian mukaan jaoteltuna. Kuivureiden ominaisuudet ovat taulukossa 7.2.

**Taulukko 7.2.** Kuivureiden hyvät ja huonot puolet kuivurien geometrian mukaan jaoteltuna (Alpua 2011, s. 18; Amos 1998, s. 7; Döring 2013, s. 105; Holmberg 2007, s. 10; Nummelin, Haikalin ja Raiko 2014, s. 21, 25, 28).

| | Hyvät puolet | Huonot puolet |
|---|---|---|
| Rumpukuivuri | - Soveltuu heterogeeniselle hakkeelle<br>- Vahva rakenne<br>- Pienet huoltokustannukset<br>- Mahdollisuus korkeisiin lämpötiloihin<br>- Suuri kapasiteetti<br>- Pienempi ominaisenergiankulutus hihnakuivureihin verrattuna<br>- Soveltuu laajalle kosteusalueelle | - Pöly- ja hajusaasteet<br>- Tukkeutumisvaara erittäin suurilla partikkeleilla<br>- Tulipaloriski |
| Hihnakuivuri | - Soveltuu heterogeeniselle hakkeelle<br>- Alhainen lämpötila<br>- Vahva rakenne<br>- Säädettävyys<br>- Käytettävyys | - Suuri koko<br>- Tulipaloriski<br>- Suuri investointi<br>- Huoltokustannukset<br>- Omakäyttöteho |
| Kaskadikuivuri | - Soveltuu heterogeeniselle hakkeelle<br>- Vahva rakenne<br>- Kohtuullinen koko | - Korroosio ja eroosio<br>- Tulipaloriski<br>- Pitkät kappaleet eivät sovellu |
| Pneumaattinen kuivuri | - Pieni koko<br>- Lyhyt kuivausaika<br>- Savukaasukuivuri: vahva rakenne<br>- Höyrykuivuri: pieni energiankulutus | - Ei sovellu heterogeenisille partikkeleille, kuten muut kuivurit<br>- Korroosio ja eroosio<br>- Tulipaloriski<br>- Vuodot<br>- Omakäyttöteho |
| Kerroskuivaus (yleisiä kaikille kerroskuivureille) | - Yksinkertainen<br>- Alhainen lämpötila | - Useasti pitkä kuivausaika<br>- Loppukosteuden vaihtelut |

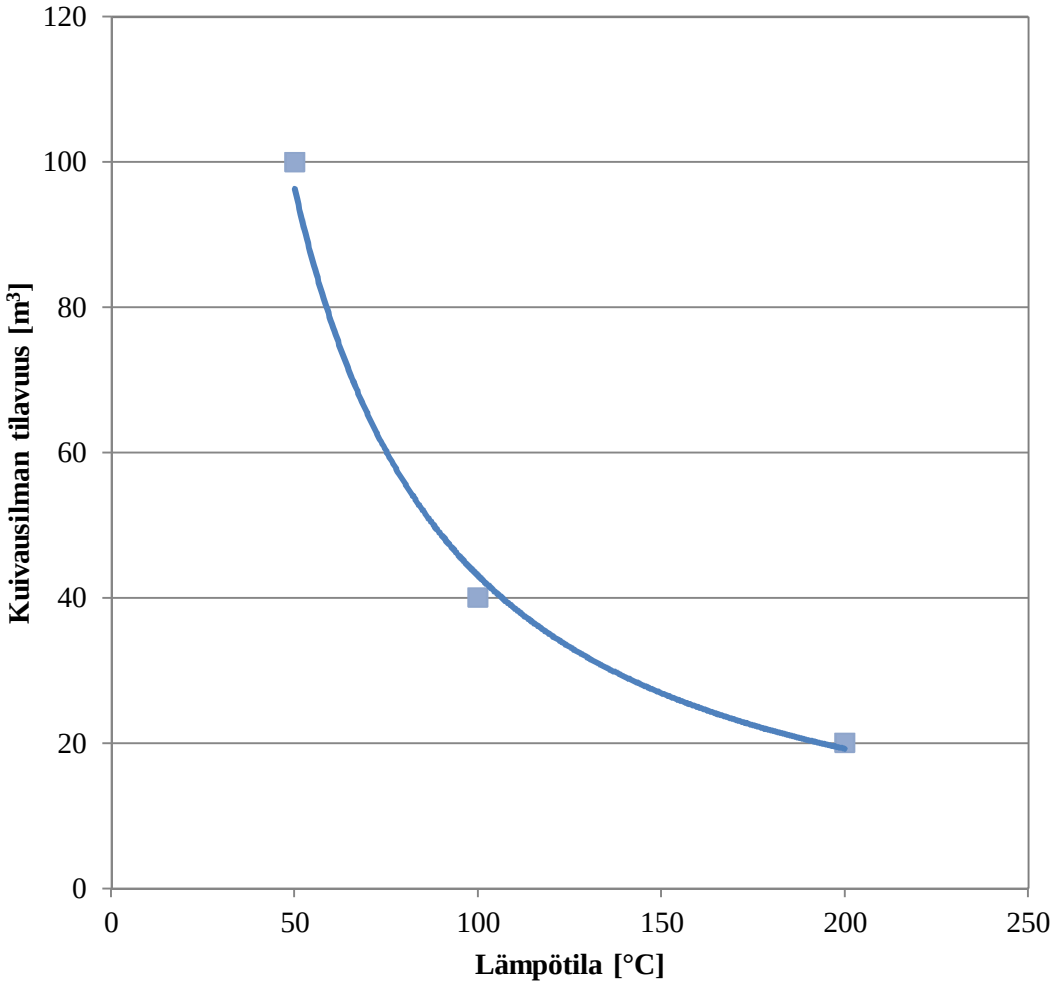
# 8 KEINOKUIVAAMISEN ENERGIANKULUTUS

Kuivauksessa puusta poistetaan vettä. Biopolttoaineiden kuivauksessa kosteutta alennetaan höyrystämällä vettä. Tällöin kuivaustapahtumassa veden höyrystäminen sitoo energiaa veden latenttilämmön verran.

## 8.1 Veden poistaminen

Härkönen (2012, s. 12) toteaa, että puun soluonteloissa olevan vapaan veden poistaminen sitoo veden höyrystämiseen kuluvan energiamäärän, joka on 25 celsiusasteen lämpötilassa 2,443 MJ/kg vettä. Tämä vastaa arvoa 0,68 kWh/kg vettä. Härkönen (2012, s. 13) arvioi, että soluseiniin sitoutuneen veden kuivaaminen sitoo huomattavasti enemmän energiaa ja veden poistamiseen kuluva energiamäärä kasvaa lineaarisesti kyllästymispisteestä ollen kolminkertainen veden höyrystymislämpöön nähden, kun kaikki vesi on poistettu. Tämä vastaa suurimmillaan arvoa 2,04 kWh/kg vettä. Myös Hukka (1996, s. 21) toteaa, että puun kuivuminen kuluttaa enemmän energiaa PSK-rajan alapuolella ja veden höyrystymislämmön lisäksi kuluvaa energiaa kutsutaan sorptioenergiaksi.

Jos puuta kuivataan lämmittämällä, veden höyrystäminen kuluttaa edellä mainitun latenttilämmön verran energiaa ennen kuin PSK-raja saavutetaan. Prosessin häviöt kasvattavat kuivauksen energiankulutusta. Todellisuudessa kuivaaminen tapahtuu usein puhallettavalla ilmalla, jolloin prosessin energiankulutus ei suoraan aiheudu veden höyrystämisestä. Tällöin kyseessä on ilman kyky sitoa vettä itseensä. Tällöin hake luovuttaa kosteutta ilmalle. Kärsämäen kehityskeskus Oy:n (2005, s. 44) mukaan kuivausilman tilavuusvirran ja lämpötilan suhde on kuvan 8.1 mukainen, kun 1 kilogramma vettä poistetaan hakkeesta.




**Kuva 8.1.** Kuivausilman tilavuus lämpötilan funktiona yhden vesikilogramman haihduttamista varten (Kärsämäen kehityskeskus Oy:n 2005, s. 44).

Kuvassa 8.1 olevan käyrän avulla voidaan laskea kuivaukseen tarvittava lämpöenergia. Tämä saadaan, kun tiedetään ilman tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmitettävän kuivausilman alkulämpötila. Kun oletuksena käytetään, että ilman alkulämpötila on 20 celsiusastetta ja muille arvoille käytetään tyypillisiä taulukkoarvoja, saadaan lämmitysenergian tarpeeksi kaikille pisteille noin 1 kWh/kg vettä. Tästä voidaan päätellä, että Kärsämäen kehityskeskus Oy:n (2005, s. 44) tutkimuksen lähtökohtana on todennäköisesti ollut kyseinen ominaislämpöenergiankulutus tai laskelmat osuvat muutoin arvoon 1 kWh/kg vettä. Kyseistä arvoa käytetään useissa lähteissä kuivauksen vaatimaksi energiaksi. Uskottavien tutkimustulosten aikaansaamiseksi on selvitettävä tarkemmin kui-

vauksen energiankulutukset. Tässä kappaleessa selvitään kuivauskaasun lämmittämiseen ja puhaltamiseen vaadittavat energiamäärät useisiin eri lähteisiin sekä omiin laskelmiin perustuen.

### 8.1.1 **Lämmönkulutus**

Kuivaustapahtumassa kuivauskaasu, joka tyypillisesti on ilmaa, voi sitoa tietyssä tilapisteessä vakiomäärän vettä itseensä. Ilman vedensitomiskyky kasvaa, kun ilmaa lämmitetään. Lämmittämällä kuivausilmaa saavutetaan pienemmällä massavirralla sama kuivausteho kuin kylmällä ilmalla. Tällöin puhallukseen tarvittava teho pienenee. Toisaalta ilman lämmittäminen kuluttaa lämpöenergiaa. Lämmityksen vaikutus veden sitomiskykyyn voidaan todeta jäljempänä esitettävän kuvan 8.2 Mollier-diagrammista.

Kuivaustapahtumassa ilman kosteus kasvaa ja ilma jäähtyy. Veden sitominen loppuu viimeistään, kun ilma saavuttaa suhteellisen kosteuden maksimiarvon 100 prosenttia. Tällöin ilmaa ei voida hyödyntää enää kuivaukseen. Jos ilmaa lämmitetään uudestaan, ilma voi sitoa uudelleen vettä kuivattavasta materiaalista. Tällöin kyseessä on monivaiheinen kuivausprosessi, joka mahdollistaa myös alhaisempien kuivauslämpötilojen käytön. Lämpöenergiankulutuksen pienentämiseksi kosteaa kuivausprosessista poistuvaa ilmaa voidaan hyödyntää ympäristön ilman lämmittämiseen ennen varsinaista lämmitystä, jolloin kyseessä on LTO. Tällöin kuivausprosessista poistuvan ilman on oltava suuremmassa lämpötilassa kuin ympäristön lämpötila. Energiatehokkuuden parantamiseksi prosessiin voidaan toteuttaa myös kuivauskaasun osittainen takaisinkierrätys tai kuivauskaasua voidaan lämmittää portaittain usealla eri lämpötilassa olevalla lämmönlähteellä. (Alpua 2011, s. 13.)

Niemitalo (2010, s. 6) toteaa, että yleisesti hakkeen kuivaus vaatii 1 kWh/kg vettä kuivausenergiaa. Pastren (2002, s. 64) tutkimuksessa kuivauksen lämpöenergian kulutus on keskimäärin 950 kWh/t vettä. Tämä vastaa 0,95 kWh/kg vettä. Wiik et al. (2008, s. 27) mukaan tyypillinen polttoaineen energiantarve kuivauksessa on 3 050 kJ/kg vettä, joka vastaa arvoa 0,85 kWh/kg vettä. Holmbergin (2007, s. 10) tutkielmassa lämpöenergian kulutus rumpukuivurissa on 0,97-1,171 kWh/kg vettä, kaskadikuivurissa 1,61 kWh/kg vettä ja pneumaattisessa kuivurissa 1,03 kWh/kg vettä. Holmbergin tutkielmassa kaska-

dikuivurissa käytetään kuivauskaasuna savukaasua ja savukaasuhäviöitä sisältyy 0,69 kWh/kg vettä edellä mainittuun energiankulutukseen. Lisäksi kyseisessä tutkielmassa todetaan, että pneumaattisessa kuivurissa voidaan kuivauksessa käyttää höyryä, jolloin lämmönkulutus on ainoastaan 0,11-0,28 kWh/kg vettä, jos prosessissa on LTO. Rajalan (2013, s. 74-77) tutkimuksessa kuivauksen lämpöenergiankulutus on pienimmillään noin 1,25 kWh/kg vettä, mikä on hieman enemmän kuin muissa lähteissä. Rajalan tutkimuksessa on käytetty yksivaiheista viirakuivuria, ulkoilma on ollut kylmää ja ulkoilman kosteus on ollut 90 prosenttia. Nämä tekijät ovat vaikuttaneet kuivauksen energiankulutukseen.

Edellä esitettyjen lähteiden mukaan kuivausprosessin lämmönkulutus vaihtelee kuivurityyppien ja kuivaustavan mukaan. Lämmönkulutus vaihtelee lähteittäin 1 kWh/kg vettä molemmin puolin noin ± 10 prosenttia. Poikkeuksena on Rajalan (2013, s. 74-77) tutkielma, jossa energiankulutus on hieman suurempi.

### 8.1.2 **Sähkönkulutus**

Kylmäilmakuivauksessa puhaltimen energiankulutus vaihtelee 4,5-20 kWh/i-$m^3$ alkukosteuden ollessa 40-50 % ja loppukosteuden 15 %. Sopivaa aksiaalipuhallinta käytettäessä useamman vuoden keskiarvo on 10 kWh/i-$m^3$. Keskipakopuhaltimilla sähkönkulutus on suurempaa. (Föhr 2008, s. 30.) Lepistö et al. (2010, s. 33) toteavat, että kylmäilmakuivauksessa sähkönkulutus on 6-10 kWh/i-$m^3$, kun ympäröivä ilma on lämmintä ja suhteellisen kuivaa. Tällöin voidaan päätellä, että kosteus laskee noin 30 prosenttia ja sähkönkulutus on vastaavasti 10 kWh/i-$m^3$. Täten sähkönkulutus on keskimäärin 0,33 kWh/i-$m^3$ yhtä kosteuden prosenttiyksikköä kohden.

Puhaltimen energiankulutus voidaan selvittää poistettavaa vesikiloa kohden edellä mainittuja lähdetietoja käyttäen. Käytetään hakkeen alkukosteutena keskiarvoa 45 prosenttia ja loppukosteutena 15 prosenttia. Alkukosteudessa hakkeen irtotiheys on 325 kg/i-$m^3$ (Härkönen 2011, s. 2). Tällöin poistettavaksi vesimääräksi saadaan 114,7 kg/i-$m^3$ kyseisessä kuivausprosessissa. Energiankulutukseksi arvioidaan 10 kWh/i-$m^3$, joka vastaa arvoa 0,087 kWh/kg vettä.

Jos tarkastellaan tietyn hake-erän kuivumista, on sähkönkulutus kuivausprosessissa kuivauksen alkuvaiheessa pienempää kosteuden prosenttiyksikköä ja kuivattavaa vesikiloa kohden kuin loppuvaiheessa. Tämä aiheutuu siitä, että aluksi poistuva vesi poistuu nopeammin ja pienemmällä energialla kuin lopussa poistuva vesi. Loppuvaiheessa osa poistuvasta vedestä on soluseinämiin sitoutunutta vettä, jonka poistaminen kuluttaa veden höyrystymislämmön lisäksi sorptioenergiaa. Jatkuvassa prosessissa energiankulutuksen voidaan olettaa olevan lähes vakio, jos tarkastellaan koko prosessia. Tätä on käsitelty aiemmin kappaleessa 7.2.1 ja 7.2.2.

## 8.2 Esimerkkilaskelma ilmakuivauksen energiankulutukselle

Tarkastellaan hakkeen kuivaamisen energiankulutusta kostean ilman Mollier-piirroksen avulla. Kuivausilman lämmityksen yhteydessä ilman sisältämä absoluuttinen kosteus ω pysyy vakiona. Tällöin Mollier-piirroksen mukaan (kuva 8.2) ilman suhteellinen kosteus φ pienenee ja kuivausilman vedensitomiskyky suurenee. Täten ilman lämmityksellä voidaan parantaa kuivauksen tehokkuutta. Lasketaan ja piirretään Mollier-piirrokseen kuivausprosessin energiakulutukset lämmin- ja kylmäilmakuivaukselle.

### 8.2.1 Laskelmien oletukset

Oletetaan kaikissa tapauksissa ilman suhteelliseksi kosteudeksi 60 prosenttia. Tarkasteltaviksi ympäristön lämpötiloiksi valitaan lämminilmakuivauksessa -20 °C, 0 °C, 10 °C ja 20 °C. Lämminilmakuivauksen kuivausilman lämpötilana käytetään 70 °C. Kylmäilmakuivauksessa ympäristön lämpötilana käytetään 20 °C. Kylmäilmakuivauksessa alhaisia ulkolämpötiloja ei ole järkevää käyttää, koska ilman vedensitomiskyky heikkenee merkittävästi lämpötilan pienentyessä. Tämä nähdään kuvasta 8.2, jossa Mollier-piirros suppenee pieniin lämpötiloihin mentäessä ja tällöin hakkeen kuivaaminen vaatii suuren määrän kuivausilmaa ja kuivaaminen hidastuu.

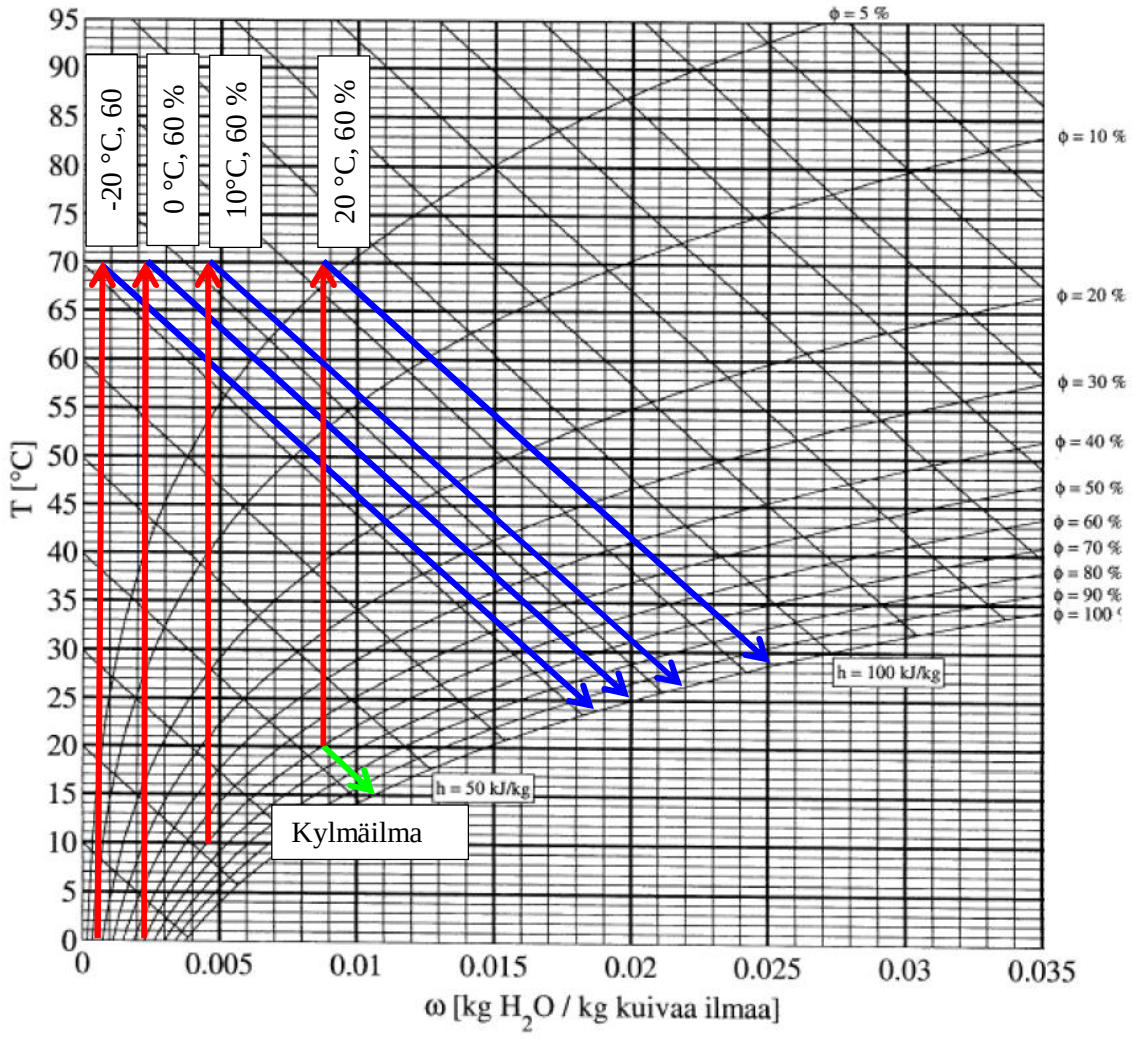
Laskelmissa on käytetty 80 % vakiohyötysuhdetta lämmönkulutuksessa kaikille kuivaustapahtumille, mikä huomioi prosessien lämpöhäviöt. Alpua (2011, s. 28) on käyttänyt vastaavaa kuivaushyötysuhdetta tutkielmassaan hakkeen kuivauksesta. Laskelmat eivät huomioi erikseen polttoaineen lämmittämiseen ja jään sulattamiseen kuluvaa energiaa.

Täten puun sisältämän veden on oletettu olevan nestemäisenä. Kuivausta tarkastellaan ilman vedensitomiskyvyn mukaisesti, eikä puun kuivauksen PSK-rajan alapuolista sorptioenergiaa huomioida. Sorptioenergia esiintyy kuivauksessa, kun puun kosteus on alle 23 prosenttia. Laskelmien tarkoituksena on vertailla saatuja tuloksia lähteissä mainittuihin energiankulutuksiin. Laskelmista saadaan vertailukelpoisia arvoja ympäristön lämpötilan vaikutuksesta, kun muut parametrit pidetään vakiona. Laskelmissa selvitetään myös LTO-prosessin toiminta-arvot. Oletetaan LTO:n lämmönvaihtimen asteisuudeksi 5 °C. Ilman ominaislämpökapasiteeteissa huomioidaan ilman sisältämän veden osuus kaikissa tehdyissä laskelmissa.

### 8.2.2 **Kuivaustapahtuma Mollier-piirroksessa ja toiminta-arvot**

Mollier-piirroksesta (kuva 8.2) nähdään ilman suhteellisen ja absoluuttisen kosteuden muutokset ilman lämpötilan funktiona. Mollier-piirroksesta voidaan lukea myös kostean ilman entalpia. Piirros on tärkeä apuväline ilmakuivausta tutkittaessa.

Kuvassa 8.2 on esitetty ideaaliset kuivaustapahtumat aiemmin esitetyille kuivurin toiminta-arvoille. Ideaalisessa kuivausprosessissa ei tapahdu lämpöhäviöitä ja kuivausilma saavuttaa 100 prosentin suhteellisen kosteuden. Kuivausta tarkastellessa oletetaan, että kuivausprosessi on jatkuva ja hakkeen lämpötila pysyy vakiona tietyssä pisteessä. Tällöin kuivaustapahtumat voidaan olettaa isentalpisiksi kuivausilman osalta. Todellisessa prosessissa tapahtuu lämpöhäviöitä, jolloin entalpia pienenee ja kuivausilma ei saavuta 100 prosentin suhteellista kosteutta. (Alpua 2011, s. 27-28.)




**Kuva 8.2.** Kostean ilman Mollier-piirros ja ideaaliset kuivaustapahtumat kylmä- ja lämminilmakuivurissa eri ympäristön lämpötilan arvoilla (Alpua 2011, Liite 2, s. 27 ; Raitila ja Heiskanen 2014, s. 14-16).

Kuvassa 8.2 vihreällä on merkitty ideaalinen kylmäilmakuivaus edellä kuvatuilla lähtöarvoilla. Punaisella on merkitty lämminilmakuivauksen lämmitysvaiheet ja sinisellä on merkitty kuivausvaiheet. Kuvasta 8.2 voidaan lukea ilman absoluuttisten kosteuksien muutokset kuivaustapahtumissa, joista saadaan ilman vedensitomiskyky. Tästä saadaan yhden vesikilogramman poistamiseen tarvittava ilmamassa. Massan ja ilman ominaislämpökapasiteetin avulla saadaan kuivausilman lämmitykseen kuluva energia.

Mollier-piirroksen pohjalta tehtyjen laskelmien tuloksena saadaan ideaalisen kuivaustapahtuman toiminta-arvot. Lasketaan myös LTO:a hyödyntävän prosessin energiankulutus. Taulukossa 8.1 on esitetty kootusti laskelmien tulokset eri kuivaustapahtumille.

**Taulukko 8.1.** Lasketut energiankulutukset kylmä- ja lämminilmakuivauksessa.

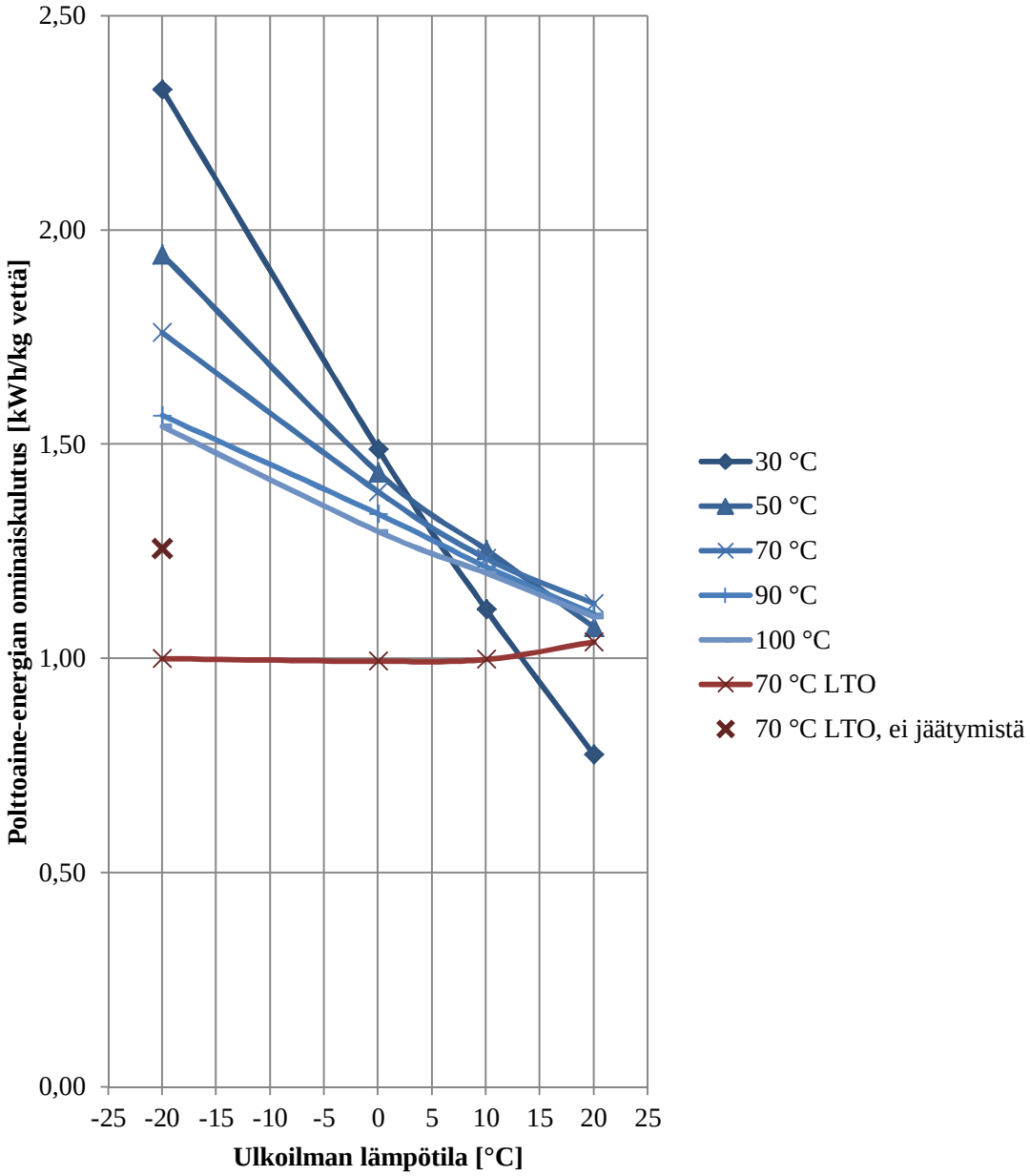
| Kuivaustapa | | Kylmäil-ma | Lämminilma | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ympäristö | | | | | | |
| Lämpötila | °C | 20 | -20 | 0 | 10 | 20 |
| Suhteellinen kosteus | % | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Absoluuttinen kosteus | kg/kg | 0,0088 | 0,0007 | 0,0022 | 0,0046 | 0,0088 |
| Lämmitys | | | | | | |
| Lämpötila lämmitettynä | °C | 20 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Absoluuttinen kosteus | $kg_{vesi}/kg_{ilma,k}$ | 0,0088 | 0,0007 | 0,0022 | 0,0046 | 0,0088 |
| Lämpötilan muutos | | 0 | 90 | 70 | 60 | 50 |
| Lopputila | | | | | | |
| Lämpötila | °C | 15 | 24 | 25 | 26,5 | 29 |
| Suhteellinen kosteus | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Absoluuttinen kosteus | $kg_{vesi}/kg_{ilma,k}$ | 0,0105 | 0,0186 | 0,02 | 0,022 | 0,025 |
| Saavutetut tulokset | | | | | | |
| Poistettu vesi | $kg_{vesi}/kg_{ilma,k}$ | 0,0017 | 0,0179 | 0,0178 | 0,0174 | 0,0162 |
| Ominaisilmamäärä | $kg_{ilma,k}/kg_{vesi}$ | 588,2 | 55,9 | 56,2 | 57,5 | 61,7 |
| Ominaisilmamäärä | $kg_{ilma}/kg_{vesi}$ | 593,4 | 55,9 | 56,3 | 57,7 | 62,3 |
| Häviöllinen prosessi, ei LTO | | | | | | |
| Ominaislämpökapasiteetti | kJ/kg K | - | 1,008 | 1,015 | 1,026 | 1,044 |
| Tarvittava lämmitysenergia | $kJ_{id}/kg_{vesi}$ | - | 5070 | 4001 | 3554 | 3250 |
| Tarvittava lämmitysenergia | $kWh_{id}/kg_{vesi}$ | - | 1,41 | 1,11 | 0,99 | 0,90 |
| Kuivurin lämpöhyötysuhde | | - | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Lämmitysenergian kulutus | $kWh/kg_{vesi}$ | - | 1,76 | 1,39 | 1,23 | 1,13 |
| Sähkönkulutus | $kWh/kg_{vesi}$ | 0,087 | 0,0082 | 0,0083 | 0,0085 | 0,0091 |
| Häviöllinen prosessi, LTO | | | | | | |
| Lämmönvaihtimen asteisuus | °C | - | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Ominaislämpökapasiteetti | kJ/kg K | - | 1,010 | 1,017 | 1,027 | 1,044 |
| Tarvittava lämmitysenergia | $kJ_{id}/kg_{vesi}$ | - | 2880 | 2862 | 2875 | 2991 |
| Tarvittava lämmitysenergia | $kWh_{id}/kg_{vesi}$ | - | 0,80 | 0,79 | 0,80 | 0,83 |
| Kuivurin lämpöhyötysuhde | | - | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Lämmitysenergian kulutus | $kWh/kg_{vesi}$ | | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 1,04 |
| Sähkönkulutus | $kWh/kg_{vesi}$ | 0,087 | 0,0082 | 0,0083 | 0,0085 | 0,0091 |

Taulukossa 8.1 esitetyt laskelmat ovat vertailukelpoisia kuivausprosesseja eri lämpötiloilla. Taulukon 8.1 toiminta-arvot pätevät oletuksien mukaiselle kuivaukselle ja jokaiselle kuivurille tulee laskea yksilöllisesti kuivausteknologian mukaiset toiminta-arvot. Taulukosta 8.1 nähdään, että kylmäilmakuivauksessa ei kuluteta lämpöenergiaa, mutta sähköenergian kulutus on noin kymmenkertainen lämminilmakuivaukseen verrattuna. Kylmäilmakuivaus on erittäin säästä riippuvaa, jolloin se ei sovellu jatkuvaan kaupalliseen hakkeen kuivaukseen. Täten kylmäilmakuivausta ei käsitellä tarkemmin. Toisaalta kylmäilmakuivaus soveltuu hyvin esimerkiksi omakotitalon hakkeen kuivaukseen, koska tällöin sääriippuvuudella ei ole suurta merkitystä.

### 8.2.3 **Lämmönkulutus**

Taulukosta 8.1 nähdään, että kuivauksen lämmönkulutus suurenee, kun ympäristön lämpötila pienenee, jos prosessissa ei ole LTO:a. LTO:lla varustetussa prosessissa ulkoilman lämpötilalla ei ole huomattavaa merkitystä kuivauksen energiankulutukselle. Toisaalta kylmä ulkoilma voi aiheuttaa ongelmia LTO:lle. Vesi tiivistyy LTO:ssa ja voi jäätyä lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinnoille pakkasella. Tämä voi aiheuttaa lämmönvaihtimen tukkeutumisen. Yksinkertaisimmillaan jäätyminen voidaan estää siten, että pidetään kostean eli kuivausilman poistopuolen lämpötila yli 0 °C. Ulkoilman ollessa -20 °C kyseisen jäätymättömän häviöllisen prosessin lämmönominaiskulutukseksi saadaan 1,26 kWh/kg vettä. Tällaisen kuivaustapahtuman ominaisenergiankulutus on esitetty graafisesti kuvassa 8.3.

Kuvassa 8.3 ovat käyrät myös 30-100 °C kuivauslämpötiloilla tapahtuvasta kuivauksesta. LTO:llinen kuivaus on esitetty havainnollisuuden vuoksi vain lämpötilalla 70 °C. LTO:lla varustetuissa prosesseissa ominaisenergiankulutus riippuu vain hyvin vähän kuivauslämpötilasta ja 70 °C lämmönkulutus on lähes keskimääräinen 30-100 °C lämpötilaväliltä. Kyseisissä prosesseissa ominaislämmönkulutus pienenee hieman, kun kuivauslämpötila suurenee ja muut arvot pysyvät vakiona. Laskelmat ovat toteutettu vastaavasti kuin edellä mainittu laskelma 70 °C kuivauslämpötilalle.




**Kuva 8.3.** Hakkeen kuivauksen ominaislämpöenergiankulutus yhden vesikilogramman poistamiseksi eri kuivaus- ja ulkoilman lämpötiloilla.

Kuivauksen ominaisenergiankulutus riippuu kuivauslämpötilasta kuvan 8.3 mukaisesti ulkoilman lämpötilan funktiona. Yleisesti kuivauksen lämpöenergiankulutus pienenee, kun kuivausilman lämpötila suurenee. Poikkeuksena on 30 °C kuivaus yli 7 °C ulkolämpötilalla, jonka ominaisenergiankulutus on pienin ilman LTO:a olevista prosesseista.

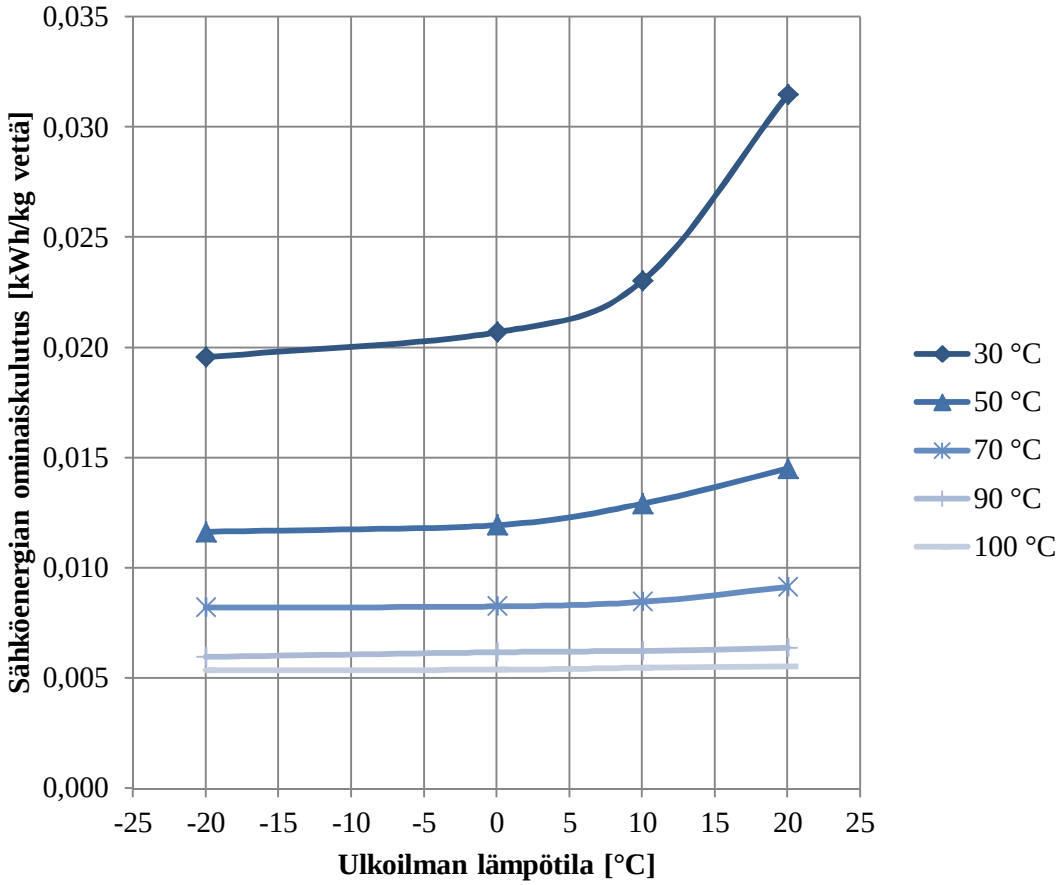
Myös 40 °C kuivauksen ominaisenergiankulutus pienenee alle korkeampien lämpötilatasojen, kun ulkoilman lämpötila on suurempi kuin 17 °C. Kyseisissä kuivaustapahtumissa lämmönkulutus pienenee alle muilla lämpötiloilla toteutetun kuivauksen, mutta sähkönkulutus vastaavasti kasvaa. Nämä nähdään kuvista 8.3 ja 8.4.

Kuvasta 8.3 nähdään, että LTO prosessi kuluttaa huomattavasti vähemmän lämpöenergiaa kuin ilman LTO:a tapahtuva prosessi. LTO:n merkitys pienenee, kun ulkoilman lämpötila kasvaa. Tämä johtuu siitä, että ulkoilman lämpötila lähestyy kuivauksen jälkeistä ilman lämpötilaa. Kuvassa 8.3 on esitetty myös piste, jossa on LTO:lla varustetun prosessin ominaisenergiankulutus, kun jäätyminen on estetty. Piste on esitetty ulkoilman lämpötilalle -20 °C, jolloin LTO:sta saatu hyöty pienenee noin kolmasosan.

### 8.2.4 **Sähkönkulutus**

Puhaltimen sähkönkulutusta on vaikea arvioida, koska hakepatjan aiheuttamaa vastapainetta ei tiedetä. Täten sähkönkulutukselle käytetään kappaleessa 7.2.2 arvioitua määrää suhteutettuna vaadituilla kuivausilman massoilla. Taulukon 8.1 mukaan sähköenergiankulutus suurenee, kun ulkoilman lämpötila suurenee. Tämä aiheutuu siitä, että kylmässä ulkoilmassa on vähemmän vettä kuin suuremmassa lämpötilassa olevassa ilmassa. Jos kuivauslämpötila pidetään vakiona, kuivempaa ilmaa ja puhallusenergiaa tarvitaan vähemmän.

LTO pienentää esitetyissä kuivaustapahtumissa lämpöenergiankulutusta, mutta sähköenergiankulutus ei muutu LTO:n seurauksena. Sähköenergian kulutukseen voidaan vaikuttaa kuivausilman lämpötilaa muuttamalla. Sähköenergianominaiskulutus eri kuivauslämpötiloilla on kuvan 8.4 mukainen.

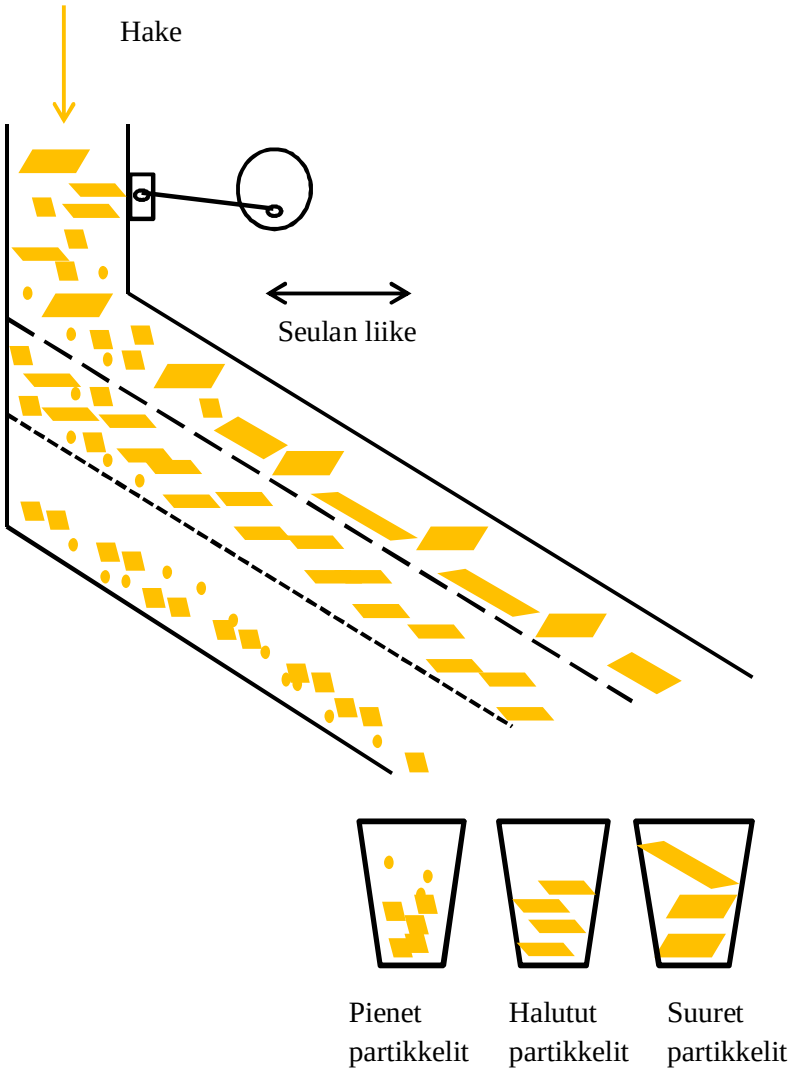



**Kuva 8.4.** Hakkeen kuivauksen ominaissähköenergiankulutus yhden vesikilogramman poistamiseksi eri kuivaus- ja ulkoilman lämpötiloilla.

Kuvasta 8.4 nähdään, että sähkönkulutus suurenee, jos kuivauslämpötila pienenee. Sähkönkulutus suurenee myös, jos ulkoilman lämpötila kasvaa. Sähkönkulutuksen muutokset eri kuivauslämpötiloilla perustuvat ilman vedensitomiskykyyn ja puhallettavaan ilmamäärään.

# 9 HAKKEEN SEULONTA JA TASALAATUISUUS

Hakkeen seulonnalla tasataan hakkeen partikkelikokoa. Seulonnalla valitaan tietyn partikkelikoon hakepalat käyttökohteen mukaisesti. Seulonnalla voidaan poistaa liian suuret ja liian pienet partikkelit. Toisaalta seulonta voidaan toteuttaa myös siten, että vain liian suuret tai liian pienet partikkelit poistetaan. Kuvassa 9.1 on esitetty seulonnan periaatekuva, jossa poistetaan liian suuret ja liian pienet hakepalat eri jakeiksi.




**Kuva 9.1.** Kaksivaiheisen reikäseulonnan toimintaperiaate täryseulassa (Johansson 2000, s. 117; Jaakkola 2014, s. 27).

Kuvassa 9.1 esitetyssä seulonnan periaatekuvassa on esitetty seulajakeiden muodostuminen. Hakkeesta seulotaan ensimmäisellä seulalla ylikokoiset partikkelit. Tämän jälkeen seulotaan liian pienet partikkelit, jolloin lopputuloksena ovat halutun kokoiset partikkelit. Tällöin jakeita muodostuu kolme. Liian suurien ja pienien partikkelien kokoa rajaavat ainoastaan haluttujen partikkelien ylä- ja alarajat. Jos suuria tai pieniä partikkeleita halutaan edelleen seuloa, pitää seulatasojen määrää kasvattaa.

## 9.1 Seulontamenetelmät

Hakkeen seulonta voidaan toteuttaa hakkuriin liitetyn seulan avulla tai erillistä seulontalaitteistoa hyödyntäen. Hakeseulat jaetaan reikä- ja kiekkoseuloihin seulan muotojen perusteella (Johansson 2000, s. 116). Johanssonin aineisto perustuu metsäteollisuuden hakeseulontaan, jossa haketta seulotaan muun muassa paperinvalmistukseen. Paperinvalmistuksessa hakkeen seulonnasta on pitkä kokemus, jota voidaan hyödyntää myös priimatun hakkeen valmistuksessa. Jaakkola (2014, s. 26) toteaa, että hake tulee seuloa ennen polttamista ja käytettäviä seulatyyppejä ovat kiekko-, rumpu-, tähti-, ja täryseula. Kyseiset seulat voidaan jakaa Johanssonin jakotavan mukaan siten, että kiekko- ja tähtiseula ovat kiekkoseuloja ja rumpu- ja täryseula ovat reikäseuloja.

Kiekkoseula koostuu sylinterin muotoisista akseleista, joiden kehällä on ulkonevia kiekon muotoisia levyjä. Tähtiseulassa kiekkojen tilalla on kulmikkaita tähtipyöriä. Akselit ovat lähekkäin ja pyörivät samaan suuntaan. Halutun kokoiset hakepalat menevät kiekkojen välistä ja putoavat alas. Liian suuret kappaleet kulkevat kiekkoseulan yli. Haluttu partikkelikoko säädetään kiekkojen asettelulla ja pyörimisnopeudella. (Jaakkola 2014, s. 26; Johansson 2000, s. 121.) Kiekkoseulat ovat yleisiä lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksilla. Kyseisissä laitoksissa olevilla kiekkoseuloilla tikut aiheuttavat syöttölaitteiden ongelmia, koska tikut pääsevät putoamaan kiekkoseulan läpi pystyasennossa ja kulkeutumaan syöttölaitteille. (Rinne 2010, s. 11.)

Rumpuseulassa on kaksi sylinteriä sisäkkäin, joista sisempään syötetään seulottava materiaali. Materiaalin liian suuret partikkelit jäävät sisempään sylinteriin ja muu materiaali putoaa ulomman sylinterin sisäkehälle. (Jaakkola 2014, s. 26-27) Jaakkola ei mainitse tutkielmassaan liian pienten partikkelien poistamistapaa, eikä materiaalin liikuttamista-

paa rummussa. Materiaalia liikutetaan rumpua pyörittämällä, jolloin partikkeleilla on mahdollisuus tippua seulaverkon läpi. Oletettavaa on, että liian pienet partikkelit poistuvat ulomman rummun läpi ja hyväksytyt jäävät ulompaa rumpuun. Toisaalta rumpuseula voidaan toteuttaa useammalla rummulla, jolloin seulasta saadaan useampia jakeita.

Täryseulassa hyväksytyn kokoiset partikkelit erotetaan ritilätason läpi tärinän avulla (Jaakkola 2014, s. 27). Täten täryseula toimii vastaavasti kuten rumpuseula, mutta materiaalin liikuttelu tapahtuu tärinän avulla, kun rumpuseulassa liike perustuu rummun pyörimiseen. Myös täryseula voi koostua useista erilaisista seuloista, jolloin seulasta saadaan useita eri jakeita. Täryseulan periaate on esitetty kuvassa 9.1.

## 9.2 Seulonnan vaikutukset

Hakkeen palakoon vaihtelu vaikuttaa muun muassa polttoaineen käsittelyyn ja syöttöön, palamiseen kattilassa ja hakkeen tiiveyteen esimerkiksi kuljetuksissa. Hakkeen joukossa olevat pienemmät partikkelit ja tikut vaikeuttavat hakkeen syöttöä kattilaan (Kulkki et al. 2013, s. 16). Niemitalo (2011, s. 5) pitää hakkeessa olevia tikkuja suurempana ongelmana kuin hienoainesta hakkeen seassa. Niemitalo toteaa, että normaalikokoiset hakepalat estävät puujauhon kerrostumisen kuljettimiin, mutta tikut aiheuttavat tukoksia ja holvaamista. Niemitalo toteaa, että suurimmat ongelmat pienkattiloilla johtuvat syötön epätasaisuudesta, joka johtuu hakkeen heterogeenisestä palakoosta ja kosteudesta. Rinne (2010, s. 11-12) toteaa, että polttoaineen käsittelyn kannalta haitallisimpia ovat pitkät tikut. Rinne toteaa, että tikut saattavat haitata suurissakin voimalaitoksissa, mutta pienillä voimalaitoksilla tikut ovat haitallisempia ja ongelmat yleisempiä. Rinne toteaa, että tikut aiheuttavat erityisesti ongelmia pienissä ruuvikuljettimissa, mutta myös holvaamista esimerkiksi siiloissa ja syöttösuppiloissa.

Murskaamalla tuotetussa hakkeessa on liikaa hienoainesta ja suuria partikkeleja pienkattiloiden käyttöön. Arinakattiloissa hienoaines kulkeutuu osittain palamattomana tuhkan joukkoon ja ylisuuret kappaleet eivät ehdi palaa kokonaan. (Rinne 2010, s. 12.) Tällöin polttoaineen palavia komponentteja kulkeutuu tuhkan mukana pois laitokselta. Täten osa hankitusta polttoaineesta ei tuota energiaa ja lisäksi hävitettävän tuhkan määrä kas-

vaa. Lisäksi isot partikkelit kulkeutuvat osin palaneena tuhkaan, jolloin palaminen voi jatkua tuhkan seassa ja suurentaa tuhkan käsittelyjärjestelmän lämpötilaa tarpeettomasti. Tästä voi aiheutua paloturvallisuusriski laitokselle.

Leijukerroskattilassa, joita suuremmat voimalaitokset käyttävät, voidaan polttaa laajasti erikoisia partikkeleja, mutta ongelmia esiintyy erityisesti kuivalla ja todella kostealla hakkeella. Liian suuret kuivat partikkelit nostavat liikaa petilämpötiloja. Tämä aiheutuu siitä, että liian suuret partikkelit palavat petin alaosassa. Tällöin joudutaan käyttämään kiertokaasupuhallinta tai kastelemaan haketta. (Rinne 2010, s. 12.) Kiertokaasupuhaltimen käyttö kasvattaa laitoksen ominaissähkönkulutusta ja pienentää palamislämpötilaa. Tällöin laitoksen hyötysuhde laskee. Polttoaineen kastelu pienentää polttoaineen lämpöarvoa ja vähentää polttoaineesta hyödynnettävää energiamäärää.

Liian pienet partikkelit kasvattavat tulistinlämpötiloja ja voivat kasvattaa hiukkaspäästöjä (Rinne 2010, s. 12). Tämä aiheutuu siitä, että leijukerroskattilassa puhallusilman nopeus ylittää pienten partikkelien leijutusnopeuden. Tällöin partikkelit kohoavat tulistimiin ja palavat vasta tulistinosassa. Hiukkaspäästöt voivat kasvaa, jos palamisessa syntyy enemmän pienhiukkasia ja hiukkasten erottelujärjestelmä ei pysty erottelemaan lisääntynyttä määrää. Erottelujärjestelmillä on laitteistolle ominainen erotteluaste. Tällöin laitteisto erottelee tulevista hiukkasista erotteluasteen mukaisen määrän hiukkasia. Jos hiukkasten määrä suurenee, myös laitteiston läpäisevien hiukkasten määrä suurenee. Täten polttoaineessa olevat pienet partikkelit voivat lisätä hiukkasten määrää.

Kuivaa haketta käytettäessä pienet partikkelit voivat aiheuttaa pölyräjähdysriskin (Rinne 2010, s. 13). Tällöin on tärkeää, että erittäin kuivasta hakkeesta poistetaan hienoaines, jolloin pölyämistä ei tapahdu.

Seulonta voidaan suorittaa ennen kuivausta tai kuivauksen jälkeen. Ennen kuivausta tapahtuvassa seulonnassa syntyy useita jakeita ennen kuivausta. Kyseiset jakeet on eriteltävä myös kuivauksen ja varastoinnin aikana. Tämä aiheuttaa varastotilojen jakotarpeita ja vaatii järjestelmällisyyttä ja tarkkaavaisuutta polttoainejakeita käsitellessä. Toisaalta, jos seulonta toteutetaan haketuksen jälkeen ennen kuivausta, voidaan ylisuuret hakepalat hakettaa suoraan hakkurissa uudelleen.

Kuivauksen jälkeen toteutettavaa seulontaa käytettäessä polttoaineesta voidaan kuivata kaikki jakeet sekaisin, jolloin jakeiden erottelu ei vaadi erillisiä järjestelyjä. Toisaalta kuivauksessa voi olla mukana suuria kappaleita, joiden kuivuminen on hidasta pieniin verrattuna. Toisaalta suuret kappaleet voidaan hakettaa kuivauksen jälkeen ja kuivata uudelleen. Vastaavasti erittäin pienet kappaleet aiheuttavat suuremman vastapaineen kuivaukselle, jolloin myös kuivausilman kanavoituminen ja epätasainen kuivuminen on mahdollista.

Kuljetuksessa epätasaisesta palakoosta voi olla hyötyä. Alakangas (2000, s. 48) toteaa, että erikokoisia partikkeleita sisältävän hakkeen tiheys on suurempi tasalaatuiseen hakkeeseen verrattuna. Alakangas kirjoittaa, että sekoittamalla sahanpurua hakkeeseen, voidaan tiheyttä kasvattaa merkittävästi. Kuljetuksissa on oleellista, että saavutetaan mahdollisimman lähellä maksimipainoja olevat kuormapainot. Täten kuljetusta voidaan tehostaa, jos hakkeeseen voidaan sekoittaa hienoainesta. Toisaalta polttolaitoksen tulee voida käsitellä polttoainetta, jossa on pieniä partikkeleja seassa.

## 9.3 Seulajakeiden hyödyntäminen

Seulomalla erotellaan halutut partikkelikoot priimatun hakkeen tuotantoa varten. Haluttujen partikkelikokojen lisäksi seulonnassa syntyy liian suuria ja pieniä partikkeleja. Liian suuret partikkelit voidaan hakettaa uudelleen, jolloin kyseisistä kappaleista syntyy halutun kokoisia tai pienempiä partikkeleja. Liian pienten partikkelien käyttöön on useita vaihtoehtoja. Pienet partikkelit voidaan hyödyntää hakkeen kuivaukseen tarvittavana lämpöenergiana. Pieniä partikkeleja voidaan sekoittaa myös kuljetettavaan polttoaineeseen tiheyden kasvattamiseksi. Tämä edellyttää, että haketta polttava laitos voi käsitellä pieniä partikkeleja. Pienet partikkelit voidaan myös pelletöidä puupelleteiksi. Tällöin pelletin tuotannossa puun jauhamisen energiankulutus on pienempää kuin tavallisesti, koska partikkelit ovat jo valmiiksi hyvin pieniä.

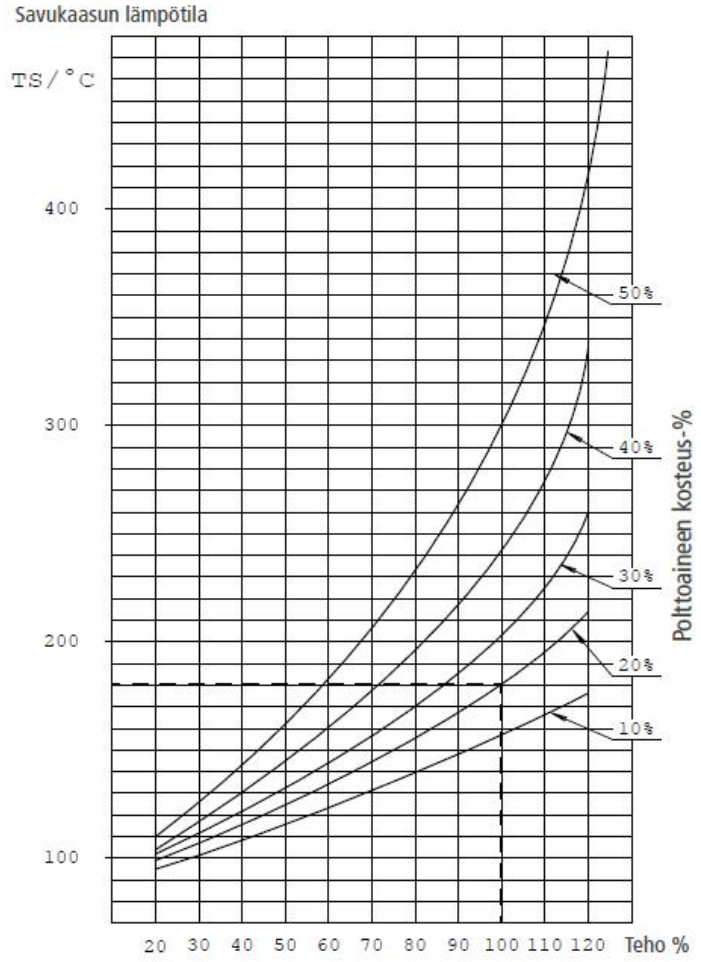
# 10 HAKKEEN KÄYTTÖKOHTEET JA ENERGIANTUOTANTO

Haketta käytetään kattiloissa polttoaineena. Haketta poltetaan suurissa voimalaitoskattiloissa, jolloin hakkeella tuotetaan kaukolämpöä ja usein myös sähköä. Lisäksi hakkeella tuotetaan prosessihöyryä, mikä on tyypillistä metsäteollisuudessa. Hakkeella tuotetaan lämpöä myös pienemmissä kattiloissa esimerkiksi maatiloilla ja omakotitaloissa. Haketta ja muita puupolttoaineita käyttävien laitosten määrä on kasvanut 250:stä lähes tuhanteen viimeisen kymmenen vuoden aikana (Metsälehti 2014). Täten hakkeen käyttö on yleistynyt huomattavasti ja myös hakkeen kysyntä on kasvanut.

## 10.1 Kosteuden vaikutus energiantuotantoon

Hakkeen lämpöarvo ja lämpöarvoon vaikuttava kosteus määrittävät hakkeesta hyödynnettävissä olevan energiamäärään. Tästä energiasta voidaan hyödyntää laitteiston eli kattilan ja oheislaitteiden hyötysuhteiden määrittämä osa.

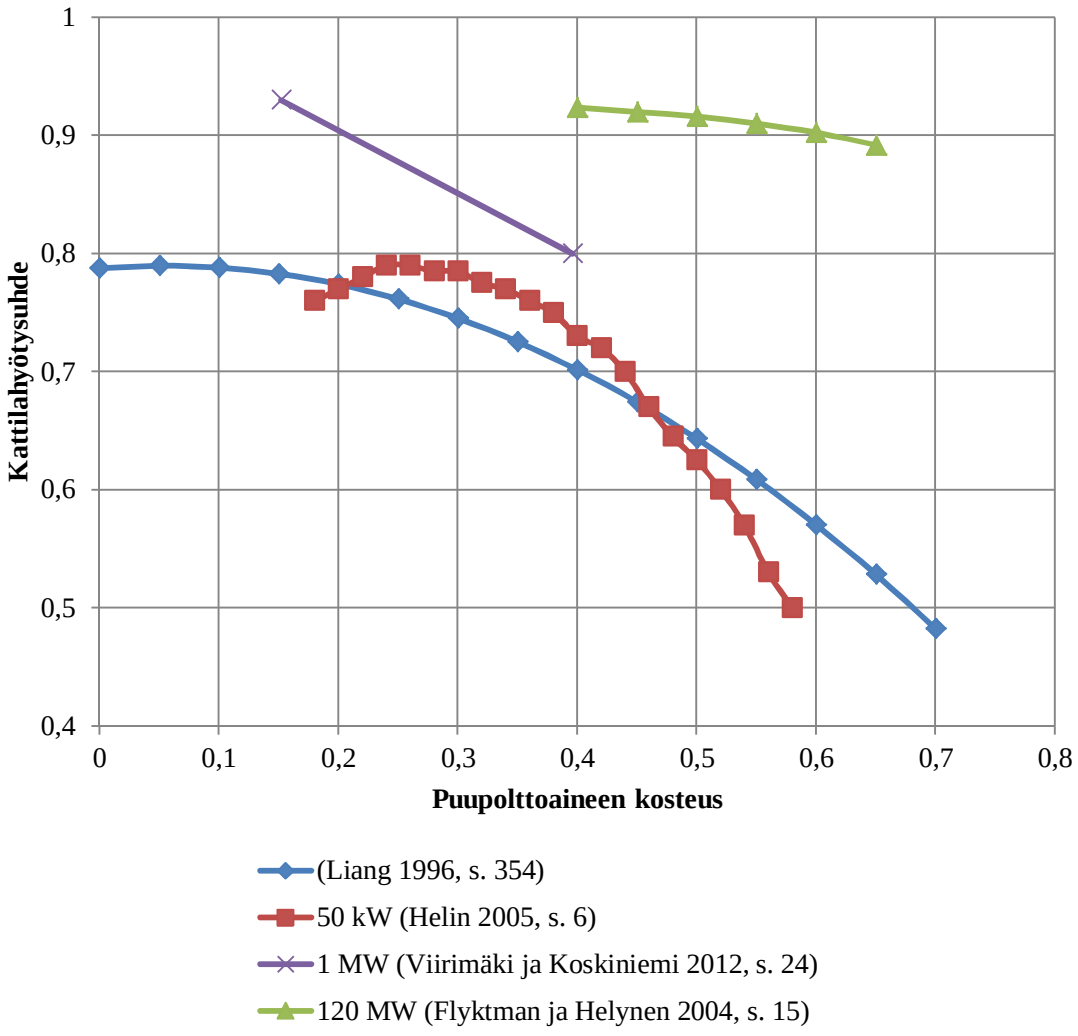
Kosteuden kasvaessa ja lämpöarvon pienentyessä osa kemiallisesti hakkeeseen sitoutuneesta energiasta joudutaan kuluttumaan veden höyrystämiseen. Energiankulutus tapahtuu palamisreaktioiden kautta, jolloin palamisessa vapautuvalla energialla höyrystetään polttoaineen sisältämää vettä. Koska osa energiasta kuluu veden höyrystämiseen, pienenee palamislämpötila kattilassa. Tällöin saman kattilatehon tuottamiseksi kattilaan on syötettävä enemmän polttoainetta ja palamisilmaa, jotta kattilaveteen siirtyy sama energiamäärä. Tällöin savukaasujen massavirta ja virtausnopeus kasvavat. Todellisessa palamisprosessissa on tyypillistä, että kosteuden kasvaessa palamisreaktioissa muodostuu epätäydellisiä palamistuotteita. Kosteus aiheuttaa häiriöitä palamiseen, jolloin osa polttoaineen palavista komponenteista jää reagoimatta hapen kanssa. Tämä heikentää myös kattilasta saatavaa tehoa. Kuvassa 10.1 on esitetty kattilan savukaasujen lämpötila hakkeen kosteuden ja suhteellisen tehon funktiona.




**Kuva 10.1.** Savukaasujen lämpötila hakkeen kosteuden ja kattilan suhteellisen tehon funktiona Ariterm Oy:n mukaisesti (Ariterm Oy 2011, s. 6).

Kuvasta 10.1 nähdään, että savukaasujen lämpötila kasvaa huomattavasti, jos käytetään kosteampaa haketta ja halutaan säilyttää sama teho. Tämä aiheutuu aiemmin todetuista massavirran ja virtausnopeuden suurenemisista. Virtaustekniikan mukaan virtausnopeuden kasvaessa savukaasujen virtaus turbulentisoituu, jolloin lämmönsiirto tehostuu. Toisaalta massavirran kasvaessa lämmönsiirtotehon kasvu on savukaasujen sisältämään energiavirran kasvuun suhteessa pienempi, jolloin savukaasujen lämpötila jää suuremmaksi ja savukaasuhäviöt kasvavat. Tällöin savukaasuista kattilaveteen siirtyy suhteessa vähemmän lämpöä, koska myös savukaasujen alkulämpötila on pienempi ja savukaasut poistuvat suuremmassa lämpötilassa.

Kosteus lisää myös palamattomien polttoaineiden häviöitä (Flyktman ja Helynen 2004, s. 18). Tällöin osa haihtuvista palavista kaasuista poistuu savukaasujen mukana ja osa kiinteästä polttoaineesta tuhkan mukana. Tämä heikentää edelleen kattilan hyötysuhdetta. Suurissa voimalaitoskattiloissa 10 prosentin hakkeen kosteuden muutos vaikuttaa kattiloiden hyötysuhteeseen 1-2 prosenttia (Flyktman ja Helynen 2004, s. 18). Kuvassa 10.2 on esitetty kootusti eri lähteissä selvitettyjä kattilahyötysuhteita polttoaineen kosteuden funktiona.




**Kuva 10.2.** Kattilahyötysuhteet puupolttoaineen kosteuden funktiona eri lähteissä.

Kuvassa 10.2 on esitetty hyötysuhdekäyrät eritehoisille kattiloille puupolttoaineen kosteuden funktiona. Kuvasta 10.2 nähdään, että kosteus vaikuttaa hyötysuhteeseen enem-

män pienillä kuin isoilla kattiloilla. Kattilahyötysuhde pienenee polttoaineen kosteuden suurentuessa. Helinin (2005, s. 6) mukaan hyötysuhde pienenee hieman myös hakkeen kosteuden pienentyessä alle 24 prosenttiin. Tämä aiheutuu todennäköisesti palamisolosuhteiden hallitsemattomuudesta, jolloin esimerkiksi ilmakerroin kasvaa erittäin kuivalla polttoaineella ja korkealla palamislämpötilalla. Muissa lähteissä hyötysuhde suurenee kun polttoaineen kosteus pienenee. Kuvassa 10.1 esitetyssä käyrästössä myös savukaasujen lämpötila pienenee kuivemmalla polttoaineella, mikä parantaa hyötysuhdetta.

Jokaisella kattilajärjestelmällä hyötysuhteet määräytyvät yksilöllisesti ja hyötysuhteen tarkka yleinen määrittäminen kosteuden funktiona on mahdotonta. Suuntaa-antavien laskelmien aikaansaamiseksi on arvioitava mahdollinen käyrä kattilahyötysuhteelle. Tarkempien yksilöityjen selvitysten tekemiseksi hyötysuhde on mitattava tai selvitettävä kattilakohtaisesti valmistajalta.

Polttoaineen lämpöarvo ja kattilan hyötysuhde vaikuttavat kulutettavaan polttoainemäärään. Lämpöarvon pienentyminen aiheuttaa polttoaineen kulutukselle tilavuudellisen suurenemisen, mutta lämpöarvo ei suoraan aiheuta kulutettavan energiamäärän suurenemista. Vastaavasti kattilahyötysuhteen pieneneminen aiheuttaa kulutettavan polttoaineen energiasisällön suurenemisen. Kosteus aiheuttaa myös lämpöarvon pienenemisen. Täten voidaan todeta, että polttoaineen lämpöarvon muuttuminen vaikuttaa usein myös kosteuden ja kattilahyötysuhteen kautta kulutettavaan energiamäärään, vaikka suoraa vaikutusta ei ole. Kun vuotuinen lämmitysenergia, kattilahyötysuhde ja polttoaineen ominaisuudet tiedetään, voidaan laskea käytettävä polttoaineen sisältämä energia. Seuraavissa kappaleissa on esitetty laskelmat omakotitalon ja pienen lämpölaitoksen energiankulutuksista. Laskelmissa kattilahyötysuhteet on arvioitu kuvasta 10.2.

## 10.2 Kodin ja maatalouden lämpökattilat

Haketta käytetään pienissä koti- ja maatalouksien lämpökattiloissa lämmöntuotantoon. Pienet hakekattilat ovat tyypillisesti arinakattiloita. Pienet kattilat edellyttävät, että hake on parempilaatuista kuin suuremmissa voimalaitoksissa. Pienissä laitoksissa hakkeen kosteuden on suositeltua olla alle 40 prosenttia ja palakoon täytyy olla tasaista. (Alakangas 2000, s. 59.) Myös Erkkilä et al. (2011, s. 4) toteavat, että hakkeen kosteus ei

saisi ylittää 40 prosenttia alle 1 MW lämpölaitoksissa ja hakkeen käyttö edellyttää yleensä kuivaamista tuotantoketjun aikana. Kattilavalmistaja Säätötuli Oy (Säätötuli 2014), joka valmistaa alle 1 MW hakekattiloita, ilmoittaa hakkeen ihannekosteudeksi 20-25 % ja maksimikosteudeksi 40 %. Bioenergianeuvoja-sivustolla (Bioenergianeuvoja.fi 2014b) todetaan, että hake on laadukasta, kun sen kosteus on alle 25-30 % ja yli 55 % kosteuden omaavaa puuta ei kannata polttaa, koska puun sisältämä lämpöenergia kuluu kattilan häviöihin.

Useissa edellä mainituissa lähteissä todetaan, että hakkeen pienkäytössä kosteus vaikuttaa polttoaineen laatuun ja energiantuotantoon merkittävästi. Tämä pätee osittain ainoastaan pieniin kattiloihin. Suurilla voimalaitoksilla kostean hakkeen polttaminen on kannattavaa, koska kattiloiden häviöt ovat tuotettuun energiaan suhteessa pienempiä. Toisaalta myös suurissa kattiloissa tehokkaaseen energian tuotantoon vaaditaan hyvälaatuinen polttoaine.

Pienissä hakekattiloissa suuren kosteuden omaava hake voi aiheuttaa tehottoman energiantuotannon lisäksi palamisongelmia. Märkä hake ei kuivu, kuten suurten kattiloiden petissä, koska pienkattiloissa ei ole lämpöä varastoivaa petimateriaalia. Sen sijaan kuivuminen tapahtuu säteilyn, konvektion ja johtumisen seurauksena kattilaseinämistä, kattilan sisäisistä kaasuista sekä muusta palavasta polttoainemassasta. Polttoaineen syöttöhäiriön seurauksena märkää haketta voi joutua kerralla liikaa kattilaan, jolloin kuivuminen vaatii enemmän energiaa kuin kuiva ja palava aines voi luovuttaa. Tällöin palamisprosessi voi katketa, koska hake ei saavuta syttymispistettä ja palamista edellyttävää tilaa. Täten kuivan hakkeen käyttö kasvattaa pienemmän kokoluokan kattiloiden käyttövarmuutta.

Omakotitalojen lämpöenergiankulutus muodostuu lämpöhäviöistä, ilmanvaihdosta ja lämpimän käyttöveden lämmittämisestä (Ariterm Oy 2011, s. 5). Lämpöhäviöiden ja ilmanvaihdon vaatima lämmitysteho vaihtelee rakennusten eristyksen ja laitteistojen energiatehokkuuksien mukaan. Vanhoissa rakennuksissa on tavallisesti heikommat eristeet kuin uusissa ja täten häviöt ovat suuremmat. Ariterm Oy:n (2011, s. 5) Biolämpöoppaassa vanhan hyväkuntoisen asuinrakennuksen lämmitystehontarpeeksi on arvioitu 25 $W/m^3$. Tällöin pinta-alaltaan 200 $m^2$ ja huonekorkeudeltaan 2,6 m korkean raken-

nuksen huipputehon tarve on 13 kW. Rakennuksen vuotuiseksi energian tarpeeksi on käytetty 34 000 kWh vuodessa (Ariterm Oy 2011, s. 6). Arvioidaan hyötysuhteet kuvasta 10.2 ja lasketaan edellä mainitun energiamäärän perusteella asuinrakennuksen lämpöenergiantarve. Lisäksi lasketaan varastoitavan hakkeen tilavuus, mikä riittää kattamaan vuotuisen energiankulutuksen. Lasketaan myös hakevaraston pohjapinta-ala, missä vuoden hakkeet voidaan varastoida. Oletetaan varastoitavan hakkeen varastointikorkeudeksi 2,5 metriä. Lasketaan lisäksi kattilavaraston eli niin sanotun stokerin täyttövälit eri tilavuuksille kosteuden funktiona. Kattilavaraston tilavuudet määritetään Suomen rakentamiskokoelman mukaisesti. Oletetaan, että kattilahuone sijaitsee asuintalon kanssa samassa rakennuksessa. Kun kattilavarasto sijaitsee kattilan kanssa samassa tilassa, on varaston suurin sallittu tilavuus 0,5 $m^3$. Jos kattilahuoneesta on erotettu pölyn leviämistä estävällä seinällä syöttöhuone, on syöttöhuoneessa varaston suurin sallittu tilavuus 2 $m^3$. (Suomen RakMK E9 2005, s. 3.) Laskelman tulokset ovat esitetty taulukossa 10.1.

**Taulukko 10.1.** Omakotitalon lämmitysjärjestelmän tyypillisiä arvoja eri hakkeen kosteuksilla (*Alakangas 2000, s. 150 ; **Härkönen 2011, s. 2 ; ***Ariterm Oy 2011, s. 5).

| Hakkeen kosteus | % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa * | MJ/kg | 16,62 | 14,55 | 12,45 | 10,37 | 8,35 |
| Hakkeen irtotiheys ** | kg/i-$m^3$ | 220 | 230 | 260 | 300 | 365 |
| Energiatiheys | kWh/i-$m^3$ | 1016 | 930 | 899 | 864 | 847 |
| Kattilahyötysuhde | % | 0,83 | 0,80 | 0,76 | 0,71 | 0,63 |
| Vuotuinen lämmitysenergia | kWh | 34000 | 34000 | 34000 | 34000 | 34000 |
| Polttoaineen sisältämä energia | kWh | 40964 | 42500 | 44737 | 47887 | 53968 |
| Vaadittu varastotilavuus | $m^3$ | 40,3 | 45,7 | 49,8 | 55,4 | 63,7 |
| Pohjapinta-ala | $m^2$ | 16,1 | 18,3 | 19,9 | 22,2 | 25,5 |
| Suurin päivittäinen lämmöntuotanto (13 kW) *** | kWh/d | 312 | 312 | 312 | 312 | 312 |
| Suurin hakkeen sisältämä päivittäinen energia | kWh/d | 376 | 390 | 411 | 439 | 495 |
| 0,5 $m^3$ stokerin täyttöväli huipputeholla | d | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 0,9 |
| 2,0 $m^3$ stokerin täyttöväli huipputeholla | d | 5,4 | 4,8 | 4,4 | 3,9 | 3,4 |

Taulukosta 10.1 nähdään, että hakkeen kosteus vaikuttaa merkittävästi käytettävään hakemäärään. Ariterm Oy:n (2011, s. 6) Biolämpöoppaassa todetaan, että hakkeen kulutus suurenee yli 1,5-kertaiseksi, jos hakkeen kosteus suurenee 20 prosentista 50 prosenttiin. Taulukossa 10.1 esitetyssä laskelmassa hakkeen määrä suurenee 1,4-kertaiseksi vastaavilla kosteuksilla. Täten kostean hakkeen käyttömäärät voivat olla hieman laskelmaa suurempia riippuen kattilan ominaisuuksista ja hyötysuhteesta.

Hakemäärä vaikuttaa varaston tilavuuteen sekä pohjapinta-alaan. Myös kattilasäiliön eli stokerin täyttöväli pienenee huomattavasti, jos hakkeen kosteus suurenee. Jos pienemmälle kattilasäiliölle halutaan vuorokauden täyttöväli huipputeholla, on lämmitykseen käytettävä hyvä laatuista haketta. Kattilasäiliöille on tyypillistä, etteivät ne tyhjene täysin. Täten säiliö tulee olla hieman suurempi kuin hakkeen käyttömäärä. Lisäksi kosteal-

la hakkeella syöttöjärjestelmä ei toimi yhtä hyvin kuin kuivalla. Tällöin kostealla hakkeella kattilahuoneessa sijaitseva 0,5 $m^3$ hakevarasto ei riitä vuorokauden lämmöntarpeeseen huipputeholla.

Taulukossa 10.1 vuotuisen hakemäärän varastointi vaatii varastointipinta-alaa noin 16-26 $m^2$ riippuen varastoitavan hakkeen kosteudesta. Toisaalta suuren kosteuden omaavaa haketta on mahdollista kuivata varastokuivurilla, mutta kuivuri vaatii tilaa korkeussuunnassa, kuluttaa sähköä ja vaatii käytönaikaista valvontaa. Kuivuri aiheuttaa myös melua, joka häiritsee asumista esimerkiksi taajama-alueilla. Kuivaa haketta käytettäessä varasto ei tarvitse kuivuria ja varaston pinta-ala on pienempi kuin kostealla. Myös polttoaineen säilyvyys on huomattavasti parempaa ja kostean polttoaineen homeongelmat vältetään.

## 10.3 Lämmöntuotanto keskisuurissa ja pienissä lämpölaitoksissa

Tässä diplomityössä keskisuurilla ja pienillä lämpölaitoksilla tarkoitetaan pienien taajamien lämmöntuotantoon tarkoitettuja laitoksia. Laitoksien tehokapasiteettia ei rajata tarkasti, mutta tehoalue on noin megawatista kymmeneen megawattiin. Kyseisillä laitoksilla oletetaan käytettävän arinakattilaa ja hakkeen kosteuden oletetaan vaikuttavan energiantuotantoon huomattavasti enemmän kuin suurilla voimalaitoksilla. Tässä diplomityössä keskitytään erityisesti pienemmän kokoluokan lämpölaitoksiin. Parikkalassa ovat 0,7 MW hakelämpölaitos Akonpohjassa ja 3,5 MW hakelämpölaitos Kangaskyläss-sä. Kangaskylän laitos on uudempaa tekniikkaa ja pystyy käsittelemään kosteampaa polttoainetta. Toisaalta myös Kangaskylän laitoksella hakkeen kosteus on aiheuttanut satunnaisesti ongelmia lämmöntuotannossa.

Kappaleessa 10.2 todettiin, että hakkeen kosteus ei saa ylittää 40 prosenttia alle 1 MW laitoksissa. Akonpohjan laitoksen teho on alle 1 MW, jolloin laitoksella tulisi käyttää alle 40 prosentin kosteuden omaavaa haketta. Kangaskylän laitos on raja-arvoa tehokkaampi. Kangaskylän laitoksella voidaan polttaa kosteampaa haketta, mutta erityisesti talvella kosteus aiheuttaa tehovajetta ja jäätymisongelmia syöttölaitteissa. Lisäksi polttoaineen kosteuden vaihtelut aiheuttavat säätötarpeita. Laitoksen henkilökunta suorittaa

osan säädöistä fyysisesti laitoksella, vaikka laitos on automatisoitu. Ylimääräiset säädöt aiheuttavat ylimääräistä laitoksen valvontaa ja kustannuksia.

Lasketaan seuraavaksi pienelle lämpölaitokselle vastaavat laskelmat kuin omakotitalolle kappaleessa 10.2. Käytetään laskelmien kohteena Parikkalan Akonpohjan hakelämpölaitosta. Hakelämpölaitoksen teho on 0,7 MW ja vuonna 2011 lämmöntuotanto hakkeella oli 2 480 MWh, joka vastaa noin 65 prosenttia vuotuisesta energiantuotannosta (taulukko 3.1). Kyseisenä vuonna laitoksella tapahtui hakkeen syöttöjärjestelmän vaurioita, joiden vuoksi hakkeen käyttö oli vähäistä. Akonpohjan kokonaislämmöntuotanto oli vuonna 2011 taulukon 3.1 mukaan 3 834 MWh. Oletetaan, että keskimäärin vuotuisesta kokonaislämmöntuotannosta 85 % tuotetaan hakkeella, jolloin hakkeen osuus on noin 3 260 MWh. Kyseisen lämpölaitoksen varaston hyötytilavuus on noin 90 $m^3$. Laskelmissa käytettävät kattilahyötysuhteet arvioidaan kuvasta 10.2. Taulukossa 10.2 on esitetty laskelma Akonpohjan vuotuisesta lämmöntuotannosta sekä polttoaineen tyypillisistä arvoista kosteuden funktiona. Laskelmissa hyötysuhde on arvioitu kuvan 10.2 mukaan.

**Taulukko 10.2.** Akonpohjan 0,7 MW lämpölaitoksen tyypillisiä arvoja eri hakkeen kosteuksilla (*Alakangas 2000, s. 150 ; **Härkönen 2011, s. 2 ; ***Tainio ja Kontiokorpi 2013, s. 6).

| Hakkeen kosteus | % | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa * | MJ/kg | 16,62 | 14,55 | 12,45 | 10,37 | 8,35 |
| Hakkeen irtotiheys ** | kg/i-m$^3$ | 220 | 230 | 260 | 300 | 365 |
| Energiatiheys | kWh/i-m$^3$ | 1016 | 930 | 899 | 864 | 847 |
| Kattilahyötysuhde | % | 0,92 | 0,90 | 0,86 | 0,81 | 0,75 |
| Vuotuinen lämmitysenergia | MWh | 3260 | 3260 | 3260 | 3260 | 3260 |
| Polttoaineen sisältämä energia | MWh | 3543 | 3622 | 3791 | 4025 | 4347 |
| Vuotuinen hakkeen tilavuus | i-m$^3$ | 3489 | 3897 | 4216 | 4657 | 5134 |
| Suurin päivittäinen lämmöntuotanto (0,7 MW) *** | MWh/d | 16,8 | 16,8 | 16,8 | 16,8 | 16,8 |
| Suurin hakkeen sisältämä päivittäinen energia | MWh/d | 18,3 | 18,7 | 19,5 | 20,7 | 22,4 |
| Varaston täyttötilavuus (täyttöväli 3 d ja 0,7 MW) | i-m$^3$ | 53,9 | 60,2 | 65,2 | 72,0 | 79,4 |
| Varaston täyttötilavuus (täyttöväli 4 d ja 0,7 MW) | i-m$^3$ | 71,9 | 80,3 | 86,9 | 96,0 | 105,8 |
| 90 m$^3$ varaston täyttöväli (0,7 MW) | d | 5,0 | 4,5 | 4,1 | 3,7 | 3,4 |

Taulukosta 10.2 nähdään, että poltettava hakemäärä suurenee merkittävästi hakkeen kosteuden suurentuessa. Vastaavasti varaston täyttöväli pienenee kosteuden suurentuessa. Laskelmia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että taulukon 10.2 kattilahyötysuhde on arvioitu ja tarkempien laskelmien saamiseksi kattilahyötysuhde on mitattava tai muutoin selvitettävä. Myös hakkeen irtotiheys voi vaihdella tapauskohtaisesti.

## 10.4 Energiantuotanto suurissa voimalaitoksissa

Suurissa kattiloissa hake poltetaan yleisesti leijupeti- tai kiertoleijukattiloissa. Tällöin hake kuivaa petihiekassa ja kattilan palamisprosessi on tasaista ja jatkuvaa. Petimateriaali varastoi lämpöenergiaa, jota siirtyy petistä hakkeeseen. Tällöin hakkeen sisältämä

vesi höyrystyy ja hake kuivaa. Tällöin syttyminen tapahtuu helposti, koska hake kuivaa petissä nopeasti.

Kattiloiden mitoitus perustuu tietyn tyyppisen polttoaineen käyttöön. Suurissa voimalaitoskattiloissa mitoituksen lähtökohtana on tyypillisesti epätasalaatuinen polttoaine. Tällöin mitoituksessa oletetaan, että hake voi olla märkää ja huonolaatuista. Koska polttoaineen oletetaan olevan epätasalaatuista, on kattilat mitoitettava huonon polttoaineen mukaan. Tällöin kattiloiden koko suurenee, jotta pienemmän energiasisällön omaavaa polttoainetta mahtuu riittävästi kattilaan. Myös syöttöjärjestelmien ja savukaasukanavien koko suurenee, jotta järjestelmät voivat käsitellä suurempia massavirtoja.

Vaikka kattilat mitoitetaan huonolaatuisen hakkeen mukaan, voi ongelmia ilmetä erittäin märkää tai epäpuhdasta haketta poltettaessa. Märällä hakkeella kattila ei välttämättä saavuta maksimitehoa, jolloin lämmöntuotantoon joudutaan käyttämään öljyä tai muuta tukipolttoainetta. Tällöin tyypillisesti kalliimman tukipolttoaineen kulutus aiheuttaa taloudellisia tappioita laitokselle. Tällainen tukipolttoaineen käyttö on tyypillistä suomalaisilla voimalaitoksilla, kun ulkolämpötila on pienempi kuin -5 °C (Rinne 2010, s. 13). Hakkeen kosteus kasvattaa myös savukaasujen kosteutta. Tällöin savukaasut joudutaan poistamaan kuumempina, jotta kosteus ei tiivisty savukaasukanaviin. Tämä huonontaa kattilan hyötysuhdetta. (Alpua 2011, s. 2.)

Myös likainen polttoaine ja esimerkiksi kivet polttoaineen seassa voivat aiheuttaa ongelmia joutuessaan kattilaan. Kivet aiheuttavat leijukerrospeteissä puhalluksen toimintahäiriöitä sekä petimateriaalin ja tuhkan sulamista. Tällöin kattila voidaan joutua sammuttamaan ja jäähdyttämään kivien ja sulan petimateriaalin poistamiseksi. Tällöin on tyypillistä, että lämmöntuotantoon käytetään tukipolttoainetta. (Rinne 2010, s. 12-13)

# 11 PRIIMATUN HAKKEEN TUOTANNON KANNATTAVUUS

Hakkeen priimauksen kannattavuus koostuu useista eri tekijöistä. Kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi raaka-aineena käytetyn puun hinta. Toisaalta puun hinta vaikuttaa myös priimaamattoman hakkeen hintaan, jolloin puun hinnan merkitys pienenee. Laitokselle raaka-aine voidaan hankkia valmiiksi haketettuna tai hakettamattomana. Jos haketus tehdään laitoksella ja laitos pystyy primaamaan haketta useista eri raaka-aineista ja vaikeammin käsiteltävistä raaka-aineista, kuten kannoista, voidaan priimattavaksi hankkia aina markkinoiden edullisinta puuta. Toisaalta kustannuksia kertyy raaka-aineen haastavammasta haketuksesta tai murskauksesta. Myös hankittavien erien koko vaikuttaa raaka-aineen hintaan. Täten raaka-aineen hinta saadaan mahdollisimman pieneksi, jos laitokselle pystytään vastaanottamaan useita eri raaka-ainejakeita ja erikokoisia eriä.

Toinen merkittävä kannattavuuteen vaikuttava tekijä on priimauksen energiankulutus. Priimauksessa energiaa kuluu kuivauskaasun lämmittämiseen ja puhaltamiseen, hakkeen siirtelyyn kuljettimilla, apulaitteiden toimintaan ja priimauksen oheiskulutuskohteisiin, kuten tuotantorakennusten lämmittämiseen. Energiaa kuluu pääasiassa lämmöntuotantoon ja sähkönkulutukseen. Energiankulutukseen vaikuttavat useat eri tekijät. Laitoksen hyötysuhde vaikuttaa merkittävästi lämmön- ja sähkönkulutukseen. Joissain tapauksissa kuivaukseen on mahdollista käyttää myös hukkalämpöä, mikä pienentää tuotettavaa lämpömäärää.

Hakkeen seulonta aiheuttaa sähköenergiankulutusta ja täten kustannuksia. Toisaalta kaikissa tapauksissa seulonta ei ole välttämätöntä, mikäli tuotettu raaka-aine voidaan hyödyntää seulomatta. Yleisesti kuivaus vaatii myös ylimääräisen kuljetuksen ja lastauksen tienvarsihaketukseen ja suoraan käyttöön verrattuna. Toisaalta terminaalitoiminnalla voidaan välttyä osin ylimääräisiltä kuljetus- ja lastauskustannuksilta, koska logistiset toiminnot saadaan keskitettyä. Vastaavasti varastointikustannukset voivat kasvaa keskitetyssä tuotannosta, koska puiden varastointi vaatii tilaa. Toisaalta hakepuiden peittäminen ja luonnonkuivaus ovat helpompia suorittaa, jolloin kuivauksen energiakustannukset pienenevät. Myös aiemmin esitetyt haketus- ja murskauskustannukset voivat muodostua terminaalitoiminnassa pienemmiksi, koska toimenpiteet voidaan suorittaa

keskitetysti ja tehokkaasti, jolloin myös laitteiden toiminta-aste saadaan suuremmaksi. Terminaalihaketuksessa vältytään myös hakkureiden siirtelyltä tienvarsivarastojen välillä.

Hankittavat laitteistot, toimitilat ja maapohjat aiheuttavat investointikustannuksia, joista seuraa tyypillisesti myös korkokustannuksia. Lisäksi laitteistot vaativat kunnossapitoa ja työvoimaa toimiakseen. Myös hallinnolliset toimet vaativat työvoimaa. Tässä diplomityössä arvioidaan hakkeen kuivauksen kannattavuutta energiankulutuksen kannalta. Kuivatun hakkeen tuotannolle lasketaan energiankulutus, josta energiahinnoin saadaan tuotantokustannukset energiankulutuksen osalta. Kappaleessa 11.1 lasketaan energiankulutukseen liittyvät kustannukset. Kappaleessa 11.2 lasketaan hakkeen kuivauksesta aiheutuva energiatekninen arvonmuutos kuluttajan kannalta. Kappaleissa 11.1 ja 11.2 laskettuja kustannuksia vertaillaan kappaleessa 11.3. Tällöin saadaan hakkeen kuivauksesta aiheutuneen arvon muutoksen ja energiakustannusten erotus, jota myöhemmin kutsutaan tulokseksi. Toiminnasta saatava todellinen tulos määräytyy vasta, kun tässä diplomityössä määritellystä energiapohjoisesta tuloksesta vähennetään muut edellä kuvatut kustannukset ja lisätään mahdolliset edellä kuvatut hyödyt. Tulokseen pitää huomioida myös tarkemmin hakkeen markkinahinta kuluttajalle. Tässä työssä hinta on ainoastaan energiateknisesti laskettu, mutta todellisuudessa kuivatulla hakkeella on useita etuja, jotka voivat nostaa kuivatun hakkeen hintaa verrattuna märkään hakkeeseen.

## 11.1 Kuivauksen kustannustarkastelu

Priimauksen kustannustarkastelun lähtökohtana on hakkeen tilavuuspohjainen kuivaaminen. Tällöin laskelmat perustuvat tilavuuspohjaisiin energiankulutuksiin ja kulutuksien hinnoitteluun. Tilavuuspohjaiset hinnat voidaan muuttaa energiapohjaisiksi hakkeen energiatiheyden avulla. Laskelmia tehtäessä on huomioitava erityisen tarkasti, etteivät energia- ja tilavuuspohjaiset hinnat sekoitu. Molemmille hinnoittelupohjille on tyypillisiä seurauksia, joita kuivauksen yhteydessä tapahtuu. Tilavuuspohjaisessa kuivauksessa hakkeen tilavuus pienenee, kun hakkeen kosteus pienenee. Vastaavasti energiapohjaisilla arvoilla hakkeen sisältämä energiamäärä suurenee, kun hakkeen kosteus pienenee. Kyseiset seuraukset vaikuttavat kuivauksen ominaiskustannuksiin, mitkä tulevat huomioida laskelmia tehtäessä.

Laskelmat on toteutettu siten, että tilavuuspohjaisissa arvoissa kustannuksia ja energiankulutuksia on kohdennettu todellisia tarkastelukosteudessa olevia tilavuuksia eli hakkeen irtokuutiometrejä kohden. Täten voidaan ajatella, että kuivauksen aikana kutistuneen hakkeen määrää täytyy suurentaa lisäämällä haketta, jotta kuivauksen lopputuloksena saadaan irtokuutio haketta tarkasteltavaksi. Laskennan tuloksina saadaan kuivauksen ominaisenergiankulutukset ja kuivauskustannukset irtokuutiometriä haketta kohden.

Laskelmissa oletetaan, että kuivauksessa lämmöntuotantoon käytetään priimaamatonta haketta. Hakkeen hinnaksi arvioidaan 22,50 €/MWh, joka vastaa arvoa 19,048 €/i-$m^3$. Hinnat ovat tyypillisiä arvonlisäverottomia hintoja. Todellisessa prosessissa kuivauksen lämmöntuotantoon voidaan käyttää myös priimattua haketta, jos laitteisto vaatii hyvälaatuisen polttoaineen ja käyttö on taloudellisesti järkevää. Sähköenergialle käytetään Parikkalan Valon (Parikkalan Valo Oy 2014) yrityksille tarjoamaa sähkön arvonlisäverotonta hintaa 8,93 snt/kWh. Laskelmissa sähköenergiankulutus arvioidaan vakioksi kappaleessa 8.2.2 esitetyn taulukon 8.1 mukaisesti käyttäen arvoa 0,0085 kWh/kg vettä. Lämpöenergiankulutukselle käytetään taulukossa 8.1 esitettyä LTO:lla varustetun prosessin lämpöenergiankulutusta 1 kWh/kg vettä, mikä on myös tyypillinen energiakulutus useissa lähteissä. Kuivauksen oletetaan tapahtuvan 50 kosteusprosentista alkaen. Laskelmien tulokset ovat esitetty taulukossa 11.1.

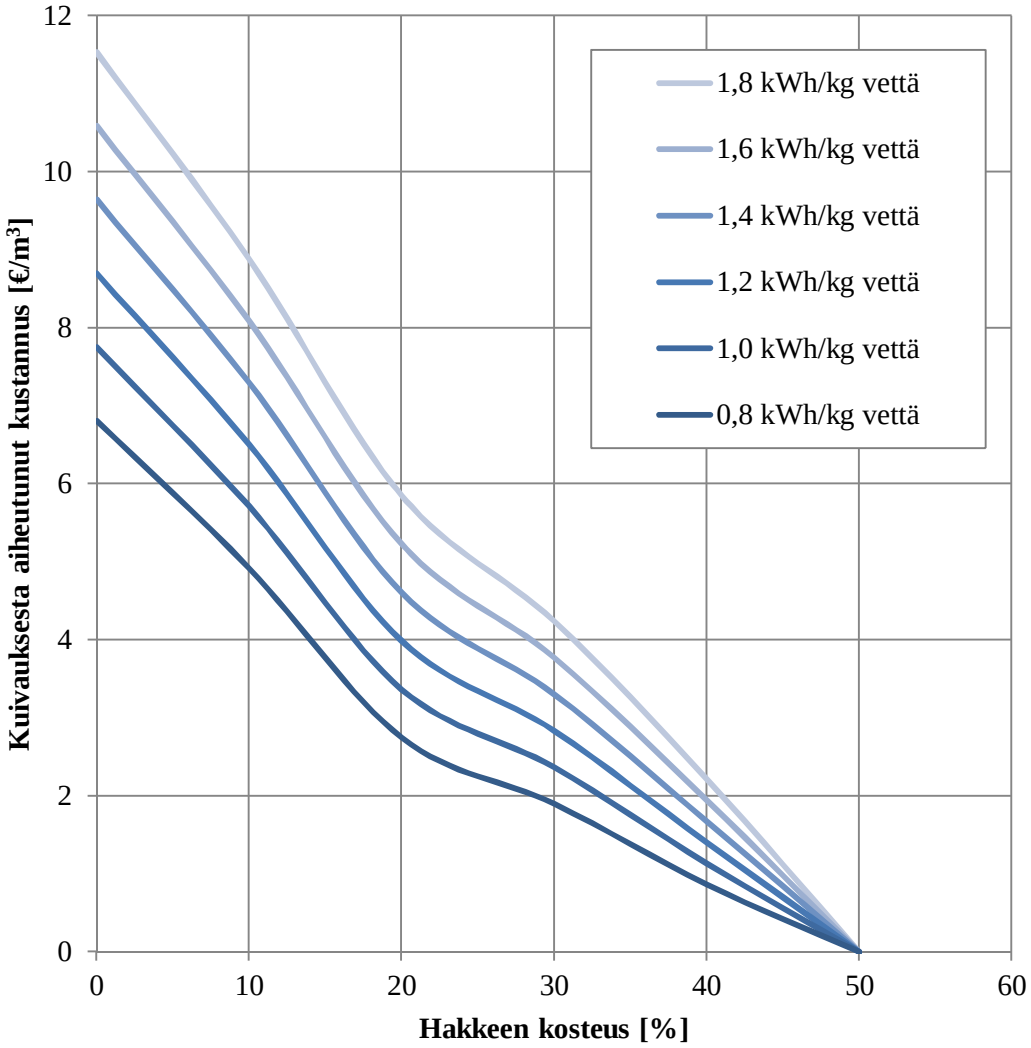
**Taulukko 11.1.** Hakkeen kuivauksen kumulatiiviset energiankulutukset ja kustannukset tilavuuspohjaisen laskennan mukaan.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lämpöenergianominaiskulutus | | | 1 | kWh/$kg_{vesi}$ | | | |
| Sähköenergianominaiskulutus | | | 0,0085 | kWh/$kg_{vesi}$ | | | |
| Lämpöenergian hinta (kosteus 50 %) | | | 22,5 | €/MWh | | 19,05 | €/i-$m^3$ |
| Sähköenergian hinta | | | 8,93 | snt/kWh | | | |
| | | | | | | | |
| Hakkeen kosteus | % | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Hakkeen irtotiheys | kg/i-$m^3$ | 210 | 220 | 230 | 260 | 300 | 365 |
| Energiatiheys | kWh/i-$m^3$ | 1093 | 1016 | 930 | 899 | 864 | 847 |
| Poistettava vesi | kg | 183 | 162 | 137 | 104 | 61 | 0 |
| Jäävä tilavuus | i-$m^3$ | 0,87 | 0,92 | 0,99 | 1,00 | 1,01 | 1,00 |
| Kulutettu lämpöenergia | kWh/i-$m^3$ | 210 | 176 | 138 | 104 | 60 | 0 |
| Kulutettu sähköenergia | kWh/i-$m^3$ | 1,78 | 1,49 | 1,17 | 0,88 | 0,51 | 0,00 |
| Lämpökustannus | €/i-$m^3$ | 4,73 | 3,96 | 3,11 | 2,34 | 1,35 | 0,00 |
| Sähkökustannus | €/i-$m^3$ | 0,16 | 0,13 | 0,10 | 0,08 | 0,05 | 0,00 |
| Kustannus hakkeen kutistumisesta | €/i-$m^3$ | 2,87 | 1,62 | 0,16 | -0,05 | -0,26 | 0,00 |
| Kokonaiskustannus | €/i-$m^3$ | 7,75 | 5,71 | 3,37 | 2,37 | 1,13 | 0,00 |

Taulukosta 11.1 on käytetty vastaavia hakkeen ominaisarvoja kuin aiemmin hakkeen käytön yhteydessä. Taulukon 11.1 mukaan poistettava vesimäärä kymmentä kosteusprosenttiyksikköä kohden on suurempi kuivauksen alkuvaiheessa kuin loppuvaiheessa. Tämä aiheutuu siitä, että kosteus ilmoitetaan suhteellisena osana kokonaispainosta ja poistettava vesi on absoluuttinen massa. Tällöin myös kulutettava lämpö- ja sähköenergia on alkuvaiheessa suurempi kymmentä kosteusprosenttia kohden kuin loppuvaiheessa. Tätä kompensoi hakkeen kutistuminen, jolloin haketta tarvitaan lisää ja energiankulutus kasvaa. Myös hakkeen vähenemisestä aiheutuu hakkeen hankintakustannuksia, jotka näkyvät taulukossa 11.1. Härkönen (2010, s. 13) toteaa, että puun kutistumista tapahtuu vasta PSK-rajan alapuolella. PSK-raja on suomalaisilla puilla noin 23 prosentin kosteudessa. Tämä kutistumisen alkaminen havaitaan taulukosta 11.1 kohdasta ”Jäävä tilavuus”, joka ilmaiseen kuutiometrin erän kuivauksessa tietyllä kosteudella hak-

keen lopullisen tilavuuden. Kyseistä arvoa on käytetty suhteuttamaan kutistuva hakemäärä energiankulutuksiin ja kustannuksiin.

Kuivauslaitteistoja on useita erilaisia ja laitteistojen energiankulutukset vaihtelevat merkittävästi eri lähteissä. Lisäksi laskelmissa käytettävät kuivaushyötysuhteet vaikuttavat merkittävästi energiankulutukseen. Täten laskelmat toteutetaan myös kuivauksen ominaisenergiankulutuksilla 0,8-1,8 kWh/ kg vettä, jolloin saadaan kattavat kustannustiedot kuivauksesta. Arvot lasketaan vastaavasti kuin taulukossa 11.1. Kyseiset tulokset on esitetty graafisesti kuvassa 11.1.




**Kuva 11.1.** Hakkeen kuivauksesta aiheutuneet tilavuuspohjaiset kustannukset kuivauksen ominaislämpöenergiankulutuksilla 0,8-1,8 kWh/kg vettä.

Kuvasta 11.1 nähdään, että kuivauksen ominaislämpöenergiankulutus vaikuttaa merkittävästi kuivauskustannuksiin. Tarkasteluvälillä keskimääräiset kustannukset ovat noin 0,183 €/i-$m^3$ yhtä kosteuden prosenttiyksikköä kohden. Tällöin ominaisenergian kulutus on 1,3 kWh/kg vettä. Jos ominaisenergiankulutus on kuivureille tyypillinen eli noin 1 kWh/kg vettä, ovat keskimääräiset kustannukset noin 0,155 €/i-$m^3$ yhtä kosteuden prosenttiyksikköä kohden. Jos kuivausenergiankulutus kaksinkertaistuu, kustannukset kasvavat 1,56-kertaisiksi. Tämä aiheutuu siitä, että hakkeen tilavuuden vähenemisestä aiheutuneet kustannukset eivät muutu lämmönkulutuksen muutoksesta ja sähköenergiankulutus on arvioitu vakioksi.

Kuvasta 11.1 nähdään, että noin 30 prosentin jälkeen käyrät taittuvat kohti x-akselia suurempaan kosteuteen verrattuna. Tämä aiheutuu siitä, että energiankulutus pienenee kuivauksen edetessä kosteusprosentteja kohden aiemmin kuvatulla tavalla. Poikkeaman jälkeen käyrät kääntyvät suurempiin arvoihin, mikä aiheutuu hakkeen kutistumisesta. Jos kutistumista ei huomioitaisi, kuvassa 11.1 esitetyt käyrät kaareutuisivat kuivauksen edetessä tasaisesti kohti pienempiä arvoja. Kutistuminen vaikuttaa merkittävästi aiheutuviin kustannuksiin ja esimerkiksi ominaisenergiankulutuksella 1 kWh/kg vettä aiheutuneet kustannukset olisivat ilman kutistumista täysin kuivassa polttoaineessa vain 4,24 €/ i-$m^3$. Täten voidaan todeta, että on merkittävää huomioida kutistuminen, jos kuivaus tapahtuu alle PSK-rajan. Lisäksi kuvassa 11.1 ei huomioida sorptioenergian vaikutusta, mikä suurentaa kustannuksia PSK-rajaa kuivemmalla hakkeella.

Edellä esitetyt kuivauskustannukset ovat keinotekoisen kuivauksen kustannuksia. Kyseisiä kustannuksia voidaan pienentää, jos hakkeen raaka-aineen kosteutta voidaan pienentää 50 prosentista luonnonkuivauksella. Tällöin tuottaja voi hyödyntää luonnonkuivausta varastoimalla hakepuita huolellisesti. Toisaalta tämä vaatii varastotilaa ja työvoimaa ja lisäksi suurentaa toimintaan sitoutunutta pääomaa.

## 11.2 Kuivatun hakkeen käytön kustannustarkastelu

Hakkeen kosteuden suurentuessa poltettavan hakkeen lämpöarvo ja kattilahyötysuhde laskevat. Tätä on tarkasteltu luvussa 10. Hakkeen käyttäjän kannalta on merkittävää tietää hakkeen kosteus, jonka avulla voidaan selvittää hakkeen energiatekninen arvo.

Tällä arvolla tarkoitetaan hakkeen hintaa kosteuden funktiona siten, että kuluttajan energiantuotantokustannukset pysyvät vakiona muihin hakelaatuihin verrattuna. Energiantuotantokustannusten lisäksi kuluttajan maksukykyyn vaikuttavat muun muassa hakkeen käsiteltävyys, tasalaatuisuus ja varastoitavuus. Näiden lisätekijöiden vaikutusta hakkeen arvoon ei tarkastella yksityiskohtaisesti.

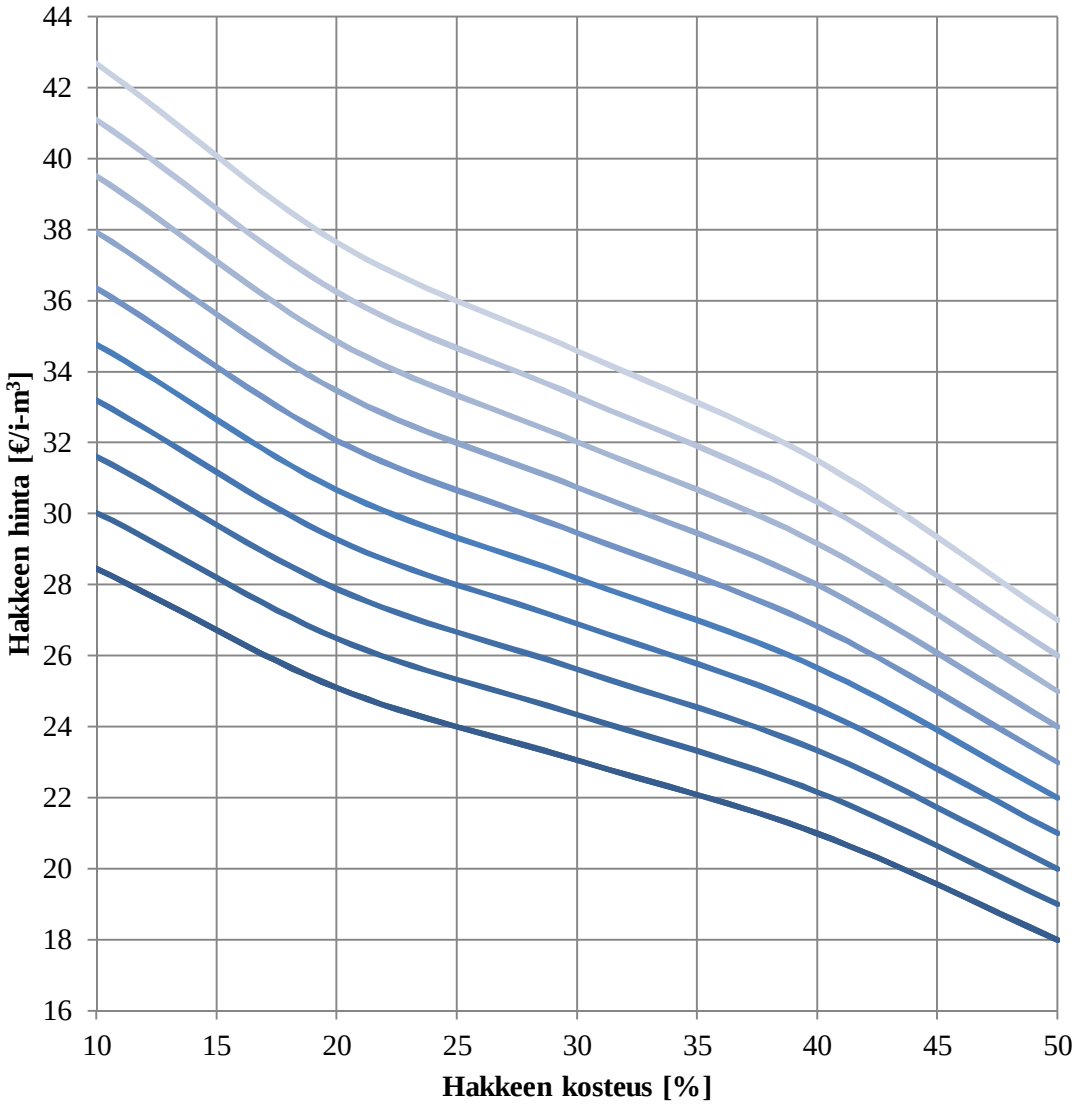
Taulukoista 10.1 ja 10.2 nähdään, että hakkeen kulutus suurenee kosteuden suurentuessa. Jos polttoainekustannukset oletetaan kuluttajalle vakioksi, voidaan laskea hakkeen arvo eri kosteuksille. Käytetään laskelmissa hakkeen kuutio- sekä energiapohjaista hintaa. Toteutetaan laskelmat sekä omakotitalon että pienen lämpölaitoksen kohteille.

Laskelmien pohjalta muodostetaan käyrät, jotka ilmaisevat energiateknisen hakkeen hinnan eri vertailukosteuksilla. Hakkeen hinnat määritetään kiinteiksi tietyllä kosteudella, jotta hintoja voidaan vertailla kosteuden muuttuessa. Tällöin kuluttaja voi verrata eri kosteuden omaavien hake-erien arvoa keskenään. Käyrästöjä luetaan siten, että etsitään valitusta käyrästöstä tiedetty hakkeen kosteus ja hinta. Tämän jälkeen käyrästössä voidaan liikkua käyrien suuntaisesti haluttuun hakkeen kosteuteen ja lukea käyrästöstä hakkeen energiatekninen arvo.

Muodostetaan kymmenen käyrän parvet siten, että käytetään hakkeen hintana tilavuuspohjaisessa laskennassa 18-27 €/i-$m^3$ ja energiapohjaisessa laskennassa 18-27 €/MWh. Lähtö- eli vertailukosteutena käytetään 50 prosenttia. Suhdeluku arvon muutokselle saadaan tilavuuspohjaisessa hinnoittelussa eri kosteuden omaavien hakkeiden energiatiheyksien ja kattilahyötysuhteiden tulona. Energiapohjaisessa hinnoittelussa suhdeluvun laskemiseen käytetään ainoastaan kattilahyötysuhdetta. Kappaleissa 11.2.1 ja 11.2.2 on laskelmat eriteltynä omakotitalolle ja pienelle lämpölaitokselle.

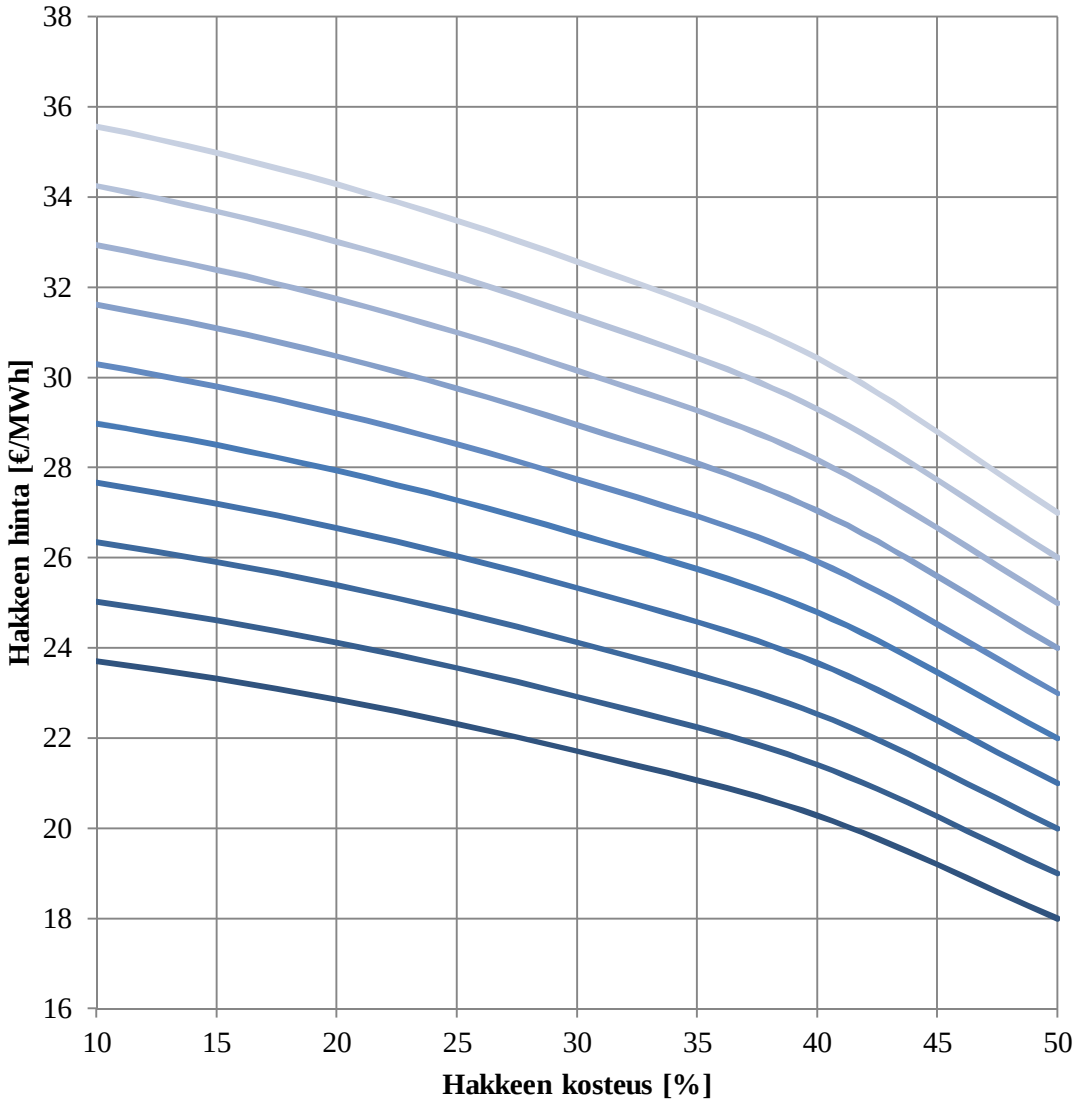
### 11.2.1 **Omakotitalon hakkeen käytön kustannustarkastelu**

Kuvassa 11.2 on esitetty hakkeen hintavertailukäyrästö omakotitalokohteelle. Käyrästö on toteutettu taulukon 10.1 laskelman mukaisesti ja edellä esitettyjä oletuksia käyttäen.




**Kuva 11.2.** Hakkeen hintavertailukäyrästö omakotitalon hakelämmitykselle tilavuuspohjaisen hakkeen hinnan mukaan.

Kuvasta 11.2 nähdään, että omakotitalon käytössä hakkeen energiatekninen arvo muuttuu keskimäärin noin 0,25-0,39 €/i-m$^3$ kosteuden prosenttiyksikköä kohden riippuen hakkeen hintatasosta. Arvonmuutos on suurinta kuivauksen alku- ja loppuvaiheessa. Kuivauksessa 40 prosentista 20 prosenttiin arvonmuutos on 0,20-0,30 €/i-m$^3$ kosteuden prosenttiyksikköä kohden riippuen hakkeen hintatasosta. Vastaava käyrästö energiapohjaisilla hakkeen hinnoilla on esitetty kuvassa 11.3.

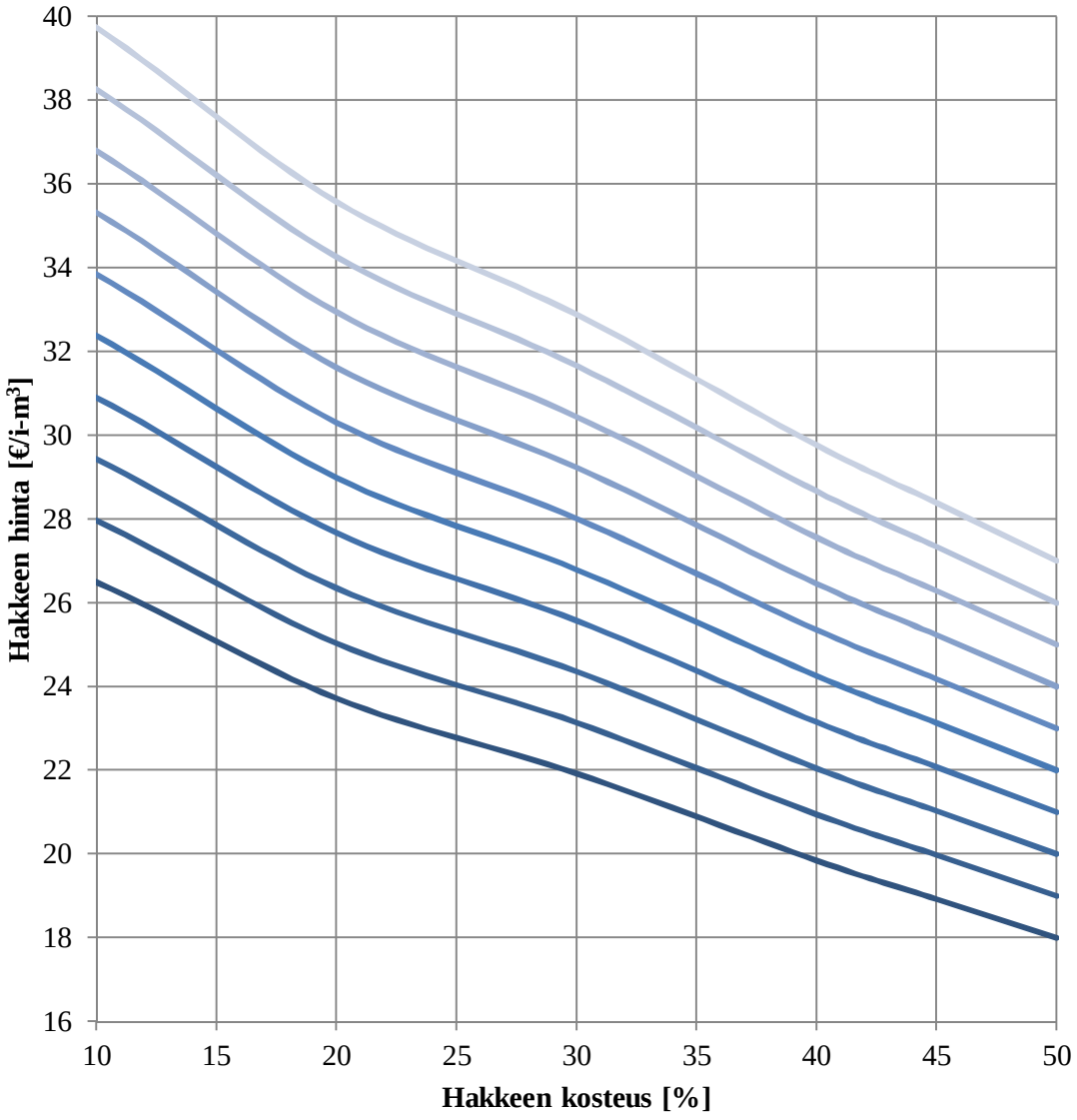



**Kuva 11.3.** Hakkeen hintavertailukäyrästö omakotitalon hakelämmitykselle energiapohjaisen hakkeen hinnan mukaan.

Kuvasta 11.3 nähdään, että hakkeen energiapohjainen hinta suurenee eniten 40-50 prosentin kosteusalueella, jolloin hinnan muutos on noin 0,23-0,34 €/MWh kosteuden prosenttiyksikköä kohden. Tämän jälkeen hinnan muutos on hitaampaa ja alueella 10-40 prosenttia hinnan muutos on keksimäärin 0,11-0,17 €/MWh. Kattilahyötysuhde vaikuttaa energiapohjaiseen arvonmuutokseen.

### 11.2.2 **Pienen lämpölaitoksen hakkeen käytön kustannustarkastelu**

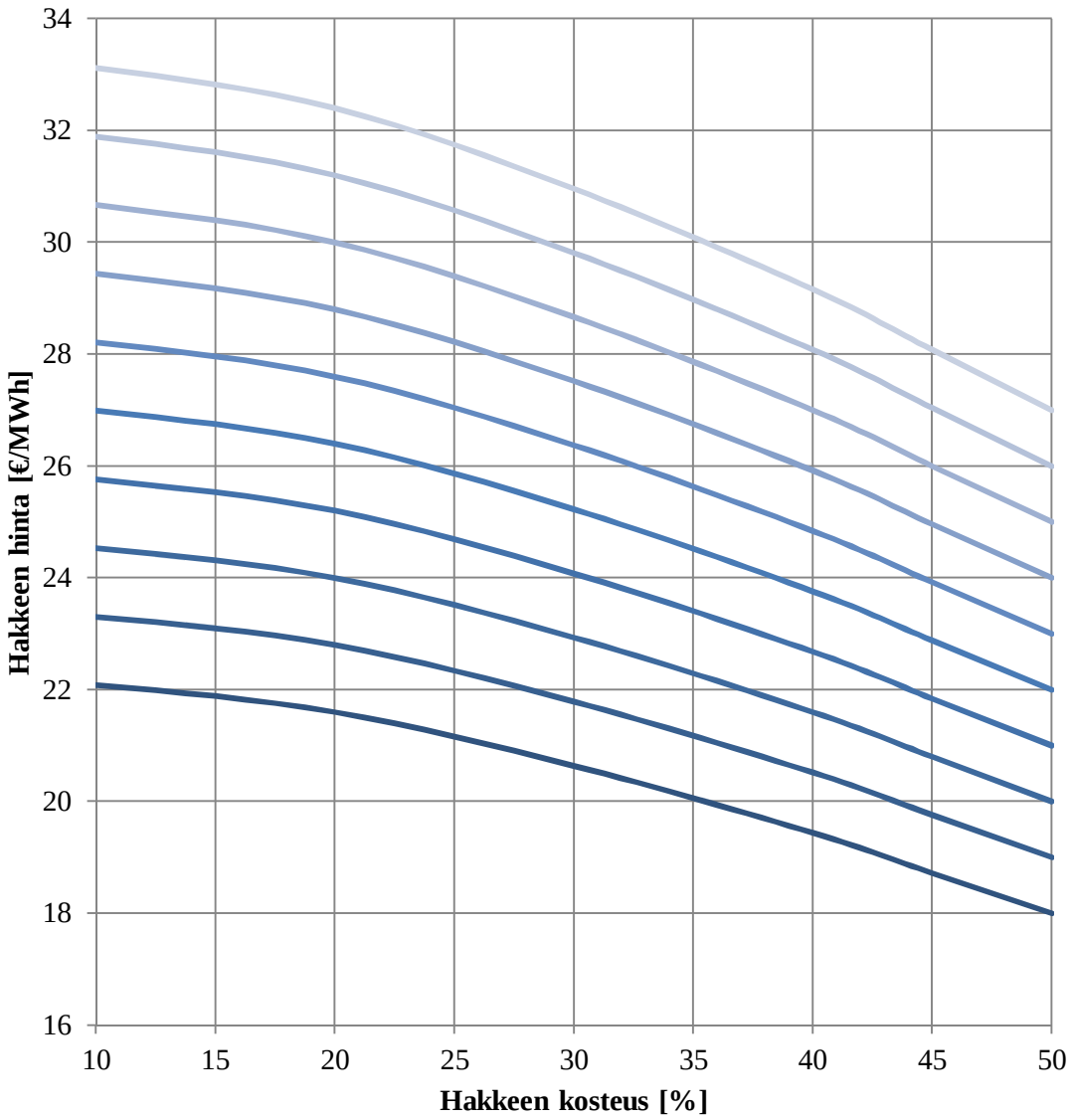
Pienen lämpölaitoksen hintavertailukäyrästö tilavuuspohjaisin hinnoin on esitetty kuvassa 11.4. Käyrästön laatimisessa on käytetty taulukon 10.2 arvoja.




**Kuva 11.4.** Hakkeen hintavertailukäyrästö pienelle lämpölaitokselle tilavuuspohjaisen hakkeen hinnan mukaan.

Kuvista 11.2 ja 11.4 nähdään, että kosteudella on suurempi merkitys pienissä omakotitalon kattiloissa käytettävän hakkeen hintaan. Tämä aiheutuu omakotitalon kattiloiden

pienestä hyötysuhteesta kostealla polttoaineella. Pienen lämpölaitoksen kattila toimii paremmin kostealla polttoaineella kuin omakotitaloissa, mutta kattilan toiminta kostealla polttoaineella on huomattavasti heikompaa kuin esimerkiksi voimalaitoskattiloissa. Vastaava käyrästö energiapohjaisilla hakkeen hinnoilla on esitetty kuvassa 11.5.



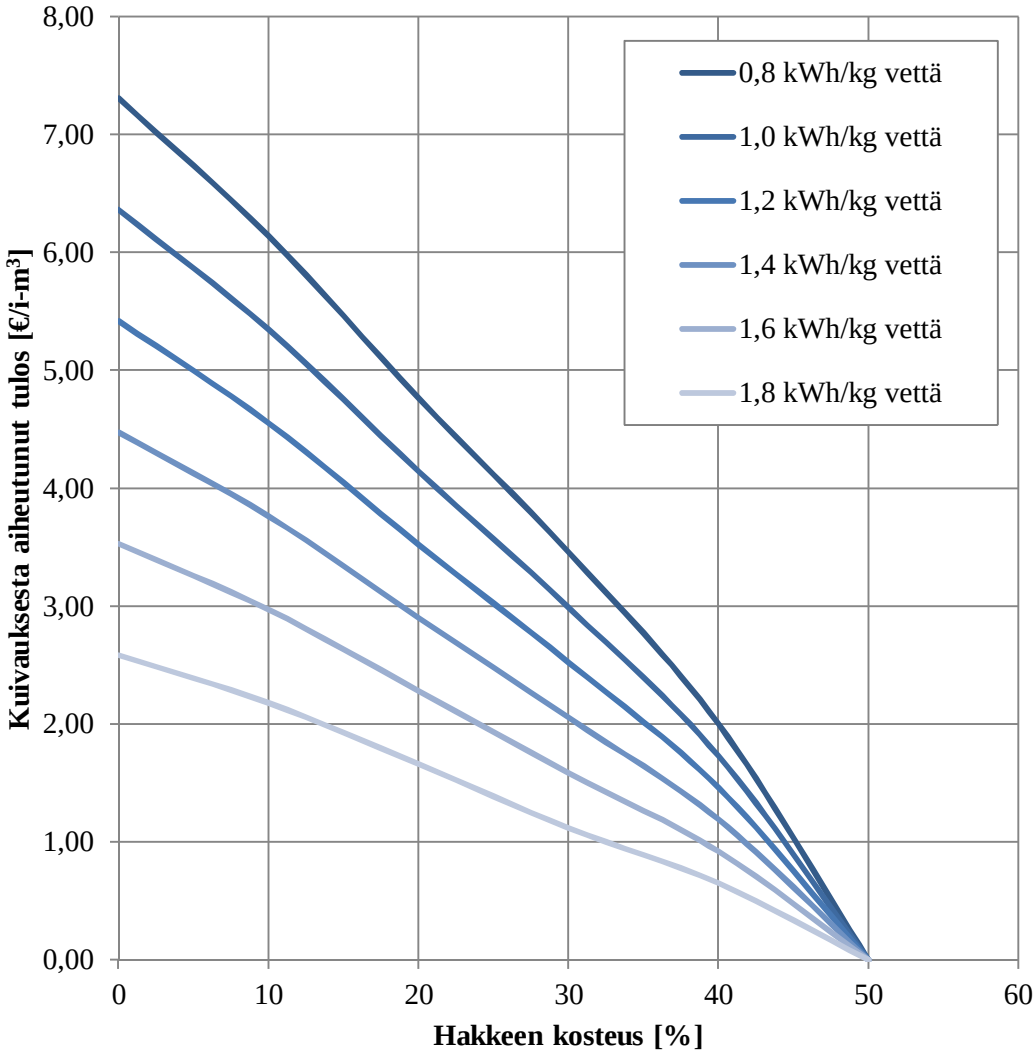

**Kuva 11.5.** Hakkeen hintavertailukäyrästö pienelle lämpölaitokselle energiapohjaisen hakkeen hinnan mukaan.

Kuvan 11.5 käyrät ovat samanmuotoisia kuin kuvassa 11.3 esitetyt omakotitalon käyrät, mutta hinnan muutokset ovat pienempiä. Tämä johtuu hyötysuhteiden eroista.

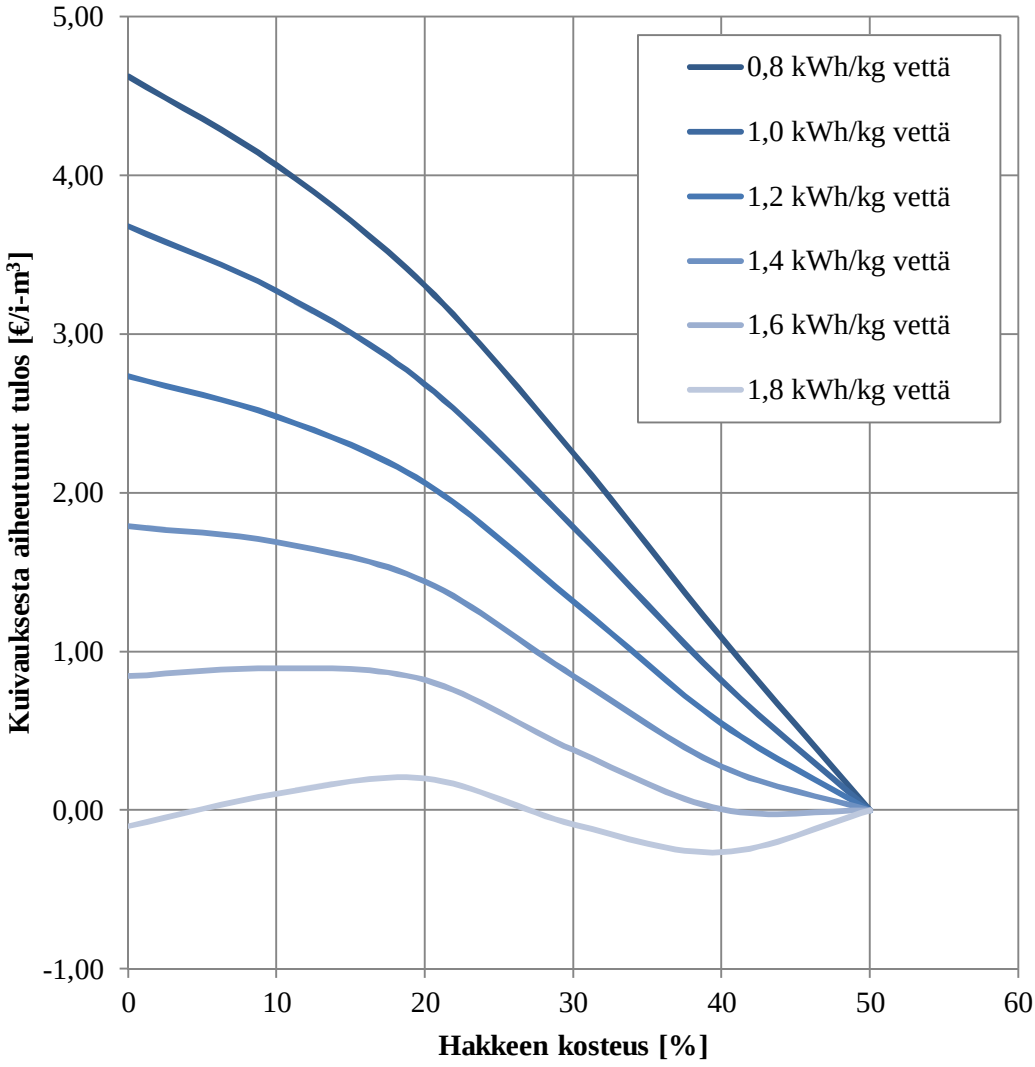
## 11.3 Priimauksen kannattavuus

Priimauksen kannattavuus perustuu kuluttajan maksukykyyn hakkeesta sekä priimauksesta ja muista tekijöistä aiheutuviin kustannuksiin. Näiden erotuksena saadaan tuottajalle jäävä voitto priimauksesta. Osaa kustannus- ja arvostustekijöistä on vaikea arvioida ja tekijät ovat tapauskohtaisia. Täten tämän diplomityön laskennallinen tarkastelu rajataan ainoastaan hakkeen energia-arvon nousuun ja priimauksen energiankulutuksesta aiheutuviin kustannuksiin. Muita kustannuksia ja arvon suurenemisia ei huomioida lukuarvoina tässä työssä.

Tässä kappaleessa toteutetut laskelmat perustuvat kappaleissa 11.1 ja 11.2 tehtyihin oletuksiin ja hintatasoihin. Laskelmissa huomioidaan myös kappaleissa 11.1 ja 11.2 huomioidut ilmiöt, kuten hakkeen kutistuminen. Kuluttajan lisämaksukyky eli hakkeen arvon suureneminen ja priimauksen energiakustannukset lasketaan hakkeen arvonlisäverottomalla hinnalla 22,50 €/MWh. Hakkeen alkukosteudeksi oletetaan 50 prosenttia, jolloin hakkeen hinta on noin 19,05 €/i-$m^3$. Kuluttajina laskelmissa käytetään omakotitaloa kappaleen 11.2.1 mukaan ja pientä lämpölaitosta kappaleen 11.2.2 mukaan. Molemmille tapauksille tehdään omat laskelmat, koska hakkeen arvon suureneminen kuivauksessa on erilainen käyttäjästä riippuen. Kuvassa 11.6 on esitetty hakkeen kuivauksen energiatekninen tulos omakotitalon tapaukselle tilavuuspohjaisin hinnoin. Vastaava kuva pienelle lämpölaitokselle on kuvassa 11.7.



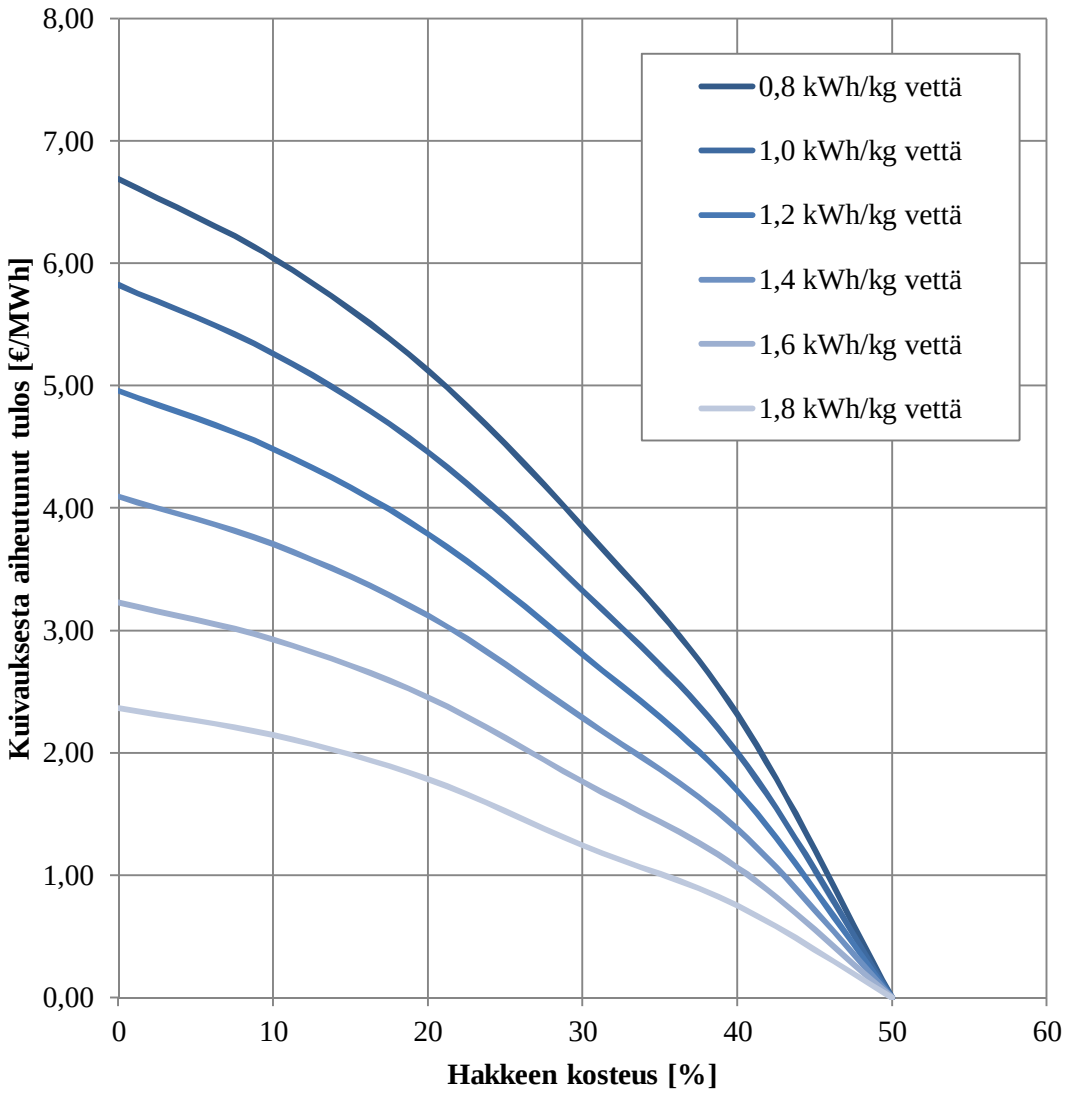

**Kuva 11.6.** Hakkeen kuivauksesta aiheutunut energiatekninen tulos tilavuuspohjaisin hinnoin eri ominais-energiankulutuksilla omakotitalolle.



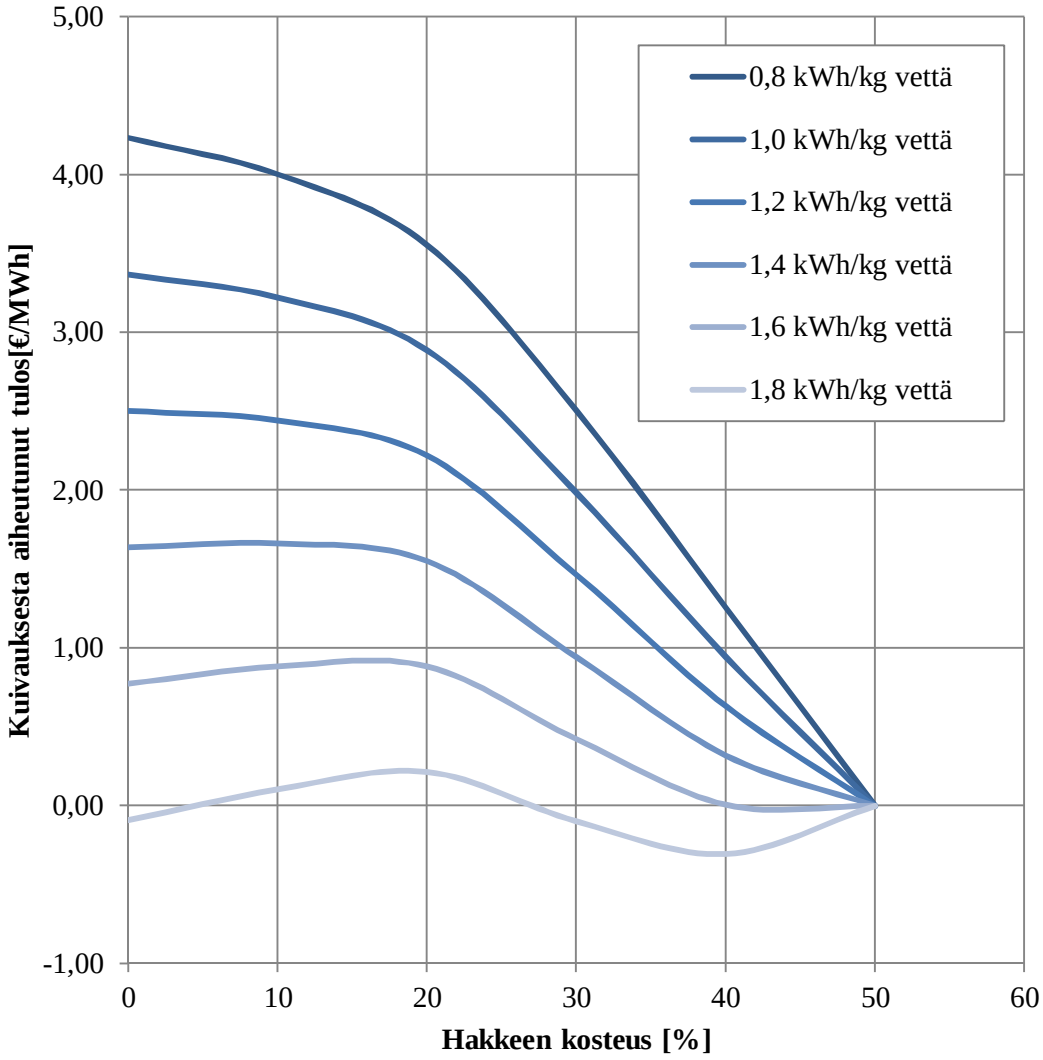

**Kuva 11.7.** Hakkeen kuivauksesta aiheutunut energiatekninen tulos tilavuuspohjaisin hinnoin eri ominais-energiankulutuksilla pienelle lämpölaitokselle.

Kuvista 11.6 ja 11.7 nähdään, että energiankulutus vaikuttaa merkittävästi kuivauksesta jäävään tulokseen. Pienen lämpölaitoksen tapauksessa ominaisenergiakulutuksella 1,8 kWh/kg vettä tulos jää negatiiviseksi. Alussa kuivaaminen on kuutiopohjaisen hinnoittelun mukaan kannattavinta omakotitalotapauksessa ja kannattavuuden kasvu pienenee loppua kohden. Pienen lämpölaitoksen tapauksessa kannattavin kuivausalue tilavuuspohjaisin hinnoin on 40:stä 20:een prosenttiin. Kannattavuutta tarkasteltaessa on huomioitava, että hakkeen myyntitilavuudet vähenevät, kun hakkeen kosteus pienenee. Tä-

mä vaikuttaa erityisesti myytäviin irtokuutiometreihin, koska energiantuotannon hyötysuhteen suurenemisen lisäksi myös hakkeen energiatiheys suurenee. Energiasisältöön perustuvissa hinnoissa myytävään energiamäärään vaikuttaa ainoastaan energiantuotannon hyötysuhde. Tilavuuspohjaiset tulokset (kuvat 11.6 ja 11.7) voidaan muuttaa energiasisältöön perustuviksi energiatiheyden avulla. Nämä tulokset on esitetty kuvissa 11.8 ja 11.9.




**Kuva 11.8.** Hakkeen kuivauksesta muodostunut energiatekninen tulos energiapohjaisin hinnoin eri ominais-energiankulutuksilla omakotitalolle.




**Kuva 11.9.** Hakkeen kuivauksesta muodostunut energiatekninen tulos energiapohjaisin hinnoin eri ominais-energiankulutuksilla pienelle lämpölaitokselle.

Kuvissa 11.6 ja 11.7 olevat tilavuuteen perustuvat tulokset suurenevat enemmän eli käyrät ovat jyrkempiä kuin kuvissa 11.8 ja 11.9 olevat energiaan perustuvat käyrät. Toisaalta kuluttaja hankkii kuivana hakkeena irtokuutioita huomattavasti vähemmän kuin märkää haketta käytettäessä. Energiaan perustuva energiamäärä pienenee suhteessa vähemmän kuin irtokuutioiden määrä. Tämä selittyy siten, että kuivauksesta saatava tulos on yhtä suuri kummassakin hinnoittelussa, koska hinnoittelu pohjautuu hakkeen kuluttajan energianhankintakustannuksiin.

Suurimmat tulokset kuivauksesta saadaan, kun kuivauksen ominaisenergiankulutus on pieni ja hakkeen arvo kasvaa kuluttajalle mahdollisimman paljon kuivauksessa. Tällöin kohdeasiakkaana ovat pienasiakkaat, kuten omakotitalot. Jos kuivauksen energiankulutus saadaan pieneksi, voi hakkeen kuivaaminen olla energiateknisesti kannattavaa myös pienille lämpölaitoksille. Energiankulutusta voidaan pienentää huomattavasti hyvällä luonnonkuivauksella. Lisäksi hakkeen hankintakustannukset voivat olla alhaisemmat, jos tuottaja voi ostaa erilaisia ja erikokoisia hake- tai raaka-aine-eriä. Kustannuksia ja kannattavuutta tarkasteltaessa tulee huomioida myös kaikki muut tekijät, jotka vaikuttavat priimatun hakkeen tuotantoon ja hakkeen arvoon.

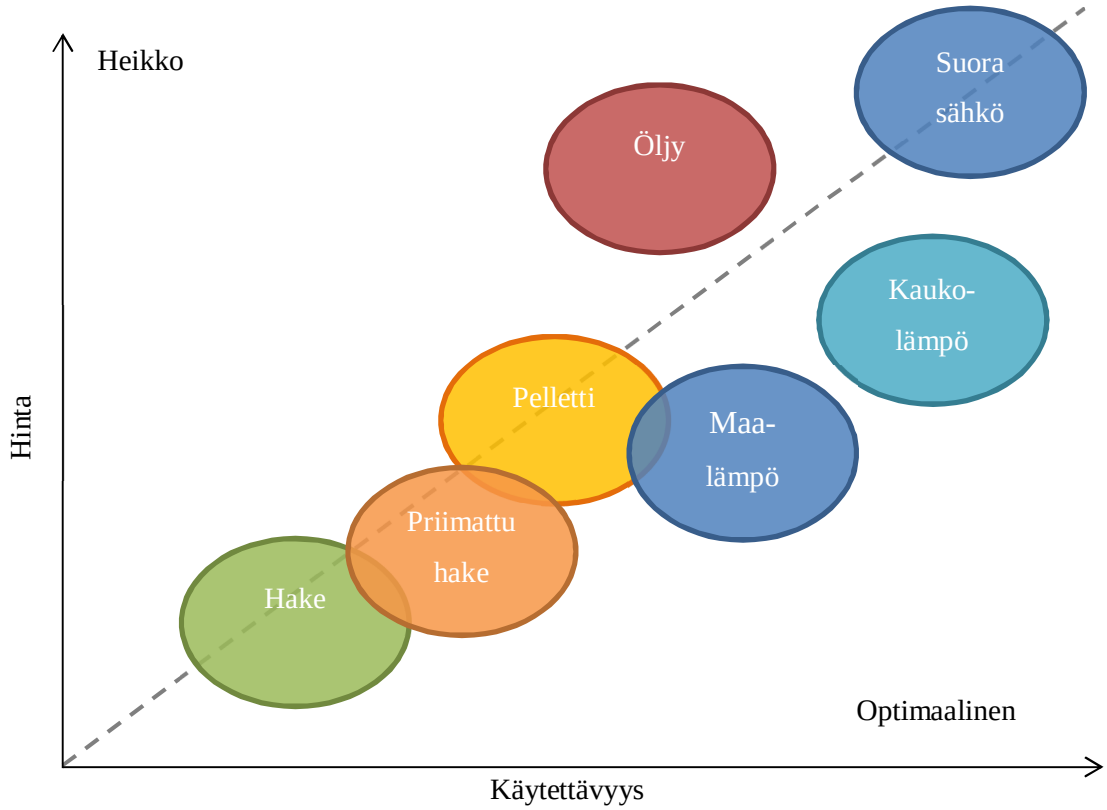
Priimatun hakkeen hintaa voidaan verrata myös vaihtoehtoisiin polttoaineisiin. Ominaisuuksiltaan vastaavin on puupelletti. Puupelletit ovat käsiteltävyydeltään priimattua haketta parempia, koska pelletit ovat erittäin tasalaatuisia. Toisaalta puupelletit voivat rikkoutua, jolloin pelleteistä syntyy hienoainesta. Tämä heikentää pelletin käsiteltävyyttä. Pelletti on haketta kalliimpi polttoaine. Pelletin pienkuluttaja hinta vuoden 2014 alussa on noin 60 €/MWh sisältäen arvonlisäveron (Bioenergia ry 2014). Tämä vastaa arvonlisäverotonta hintaa 48,39 €/MWh. Toisaalta pelletin energiatiheys on haketta suurempi, jolloin pelletin varastointikustannukset ovat pienemmät. Teollisen pelletin arvonlisäveroton hinta on noin 30 €/MWh (Metsäkustannus Oy). Täten teollisen pelletin hinta on pienkuluttajien hintaa huomattavasti edullisempi. Pelletin käyttöön verrattuna priimattu hake vaatii suuremmat varastotilat ja syöttölaitteet. Energian hankkiminen priimattuna hakkeena on edullisempaa.

## 11.4 Priimatun hakkeen markkinapotentiaali

Tässä kappaleessa verrataan priimattua haketta yleisesti käytettyihin energianlähteisiin. Vertailun perustana ovat energiantuotannon kustannukset sekä energianlähteen käytettävyys. Muodostetaan koordinaatisto, jossa vaaka-akselilla on käytettävyys ja pystyakselilla on energianlähteen hinta. Hintoina käytetään tyypillisiä kuluttajahintoja. Täten hinnoissa on poikkeavuuksia esimerkiksi teollisuuden energiahintoihin. Bioenergia ry:n (2014) arvonlisäverollisia hintoja käytetään sähkön (125 €/MWh), öljyn (104 €/MWh), kaukolämmön (83 €/MWh) ja pelletin (60 €/MWh) hintana. Maalämmön hinta muodostetaan sähkön hinnasta, kun oletetaan laitteiston keskimääräiseksi tehokertoimeksi noin

2,5. Tällöin maalämmön hinta on noin 50 €/MWh. Hakkeen hintana käytetään Tilastokeskuksen (2014) metsähakkeen hintaa 21,18 €/MWh, johon lisätään arvonlisävero. Tällöin metsähakkeen verollinen hinta on 26,26 €/MWh. Metsähakkeen hinta on lämmöntuotannossa käytettävän hakkeen hinta, joten kuluttajahinta voi olla hieman suurempi kuin kyseinen arvo. Priimatun hakkeen hinta ja käytettävyys arvioidaan tähän tutkielmaan perustuen.

Koordinaatiston tarkoituksena on vertailla energianlähteiden ominaisuuksia keskenään. Energianlähteiden hinnat vaihtelevat tapauskohtaisesti ja poikkeavat edellä esitetyissä arvoista. Lisäksi hinnanvaihtelua aiheuttavat muun muassa laitteistojen investoinnista aiheutuneet kustannukset ja energiantuotannon hyötysuhteet. Käytetään edellä esitettyjä arvoja energiahintojen suhteiden määrittämiseen ja muodostetaan vertailukoordinaatisto ilman tarkkoja absoluuttisia hintoja. Polttoaineet esitetään koordinaatistossa samanlaisina ellipseinä. Kuvassa 11.10 on esitetty polttoaineiden vertailukoordinaatisto.




**Kuva 11.10.** Energianlähteiden kuluttajahintojen ja käytettävyyksien vertailukoordinaatisto.

Kuvassa 11.10 esitetyssä koordinaatistossa on esitetty suora, joka kuvaa energianlähteiden keskimääräistä hinnan ja käytettävyyden suhdetta. Suoran alapuolella olevat polttoaineet ovat keskimääräistä edullisempia ja yläpuolella olevat polttoaineet keskimääräistä kalliimpia, kun huomioidaan polttoaineen käytettävyys. Kuvasta 11.10 nähdään, että hake, pelletti ja suora sähkö ovat hyvin lähellä kuvaan piirrettyä suoraa. Öljy on suoran yläpuolella. Öljyllä lämmittäminen on kallista käytettävyyteen nähden ja siksi myös öljy lämmittämisen suosio on laskenut viime vuosina. Kauko- ja maalämpö ovat suoran alapuolella. Kaukolämpö on suosittu energianlähde ja maalämmön suosio on kasvanut viimevuosina.

Tämän diplomityön tulosten perusteella myös priimattu hake sijoittuu suoran alapuolelle. Priimatun hakkeen käytettävyys on pellettiä huonompi, mutta normaalia haketta parempi. Priimatun hakkeen hinta muodostuu tuotantokustannuksista ja voitosta. Laskelmien pohjalta voidaan arvioida, että priimatun hakkeen hinta suurenee käytettävyyteen nähden vähemmän, kuin tyypillisesti polttoaineilla. Täten priimatulla hakkeella on markkinapotentiaalia energiamarkkinoilla. Markkinapotentiaalia edistävät kuluttajien nykyiset tottumukset entistä suuremman käytettävyyden omaaviin polttoaineisiin. Tuotannon kannattavuus vaatii kuitenkin priimatun hakkeen markkinoiden kehittymisen.

# 12 JOHTOPÄÄTÖKSET

Hyvälaatuisen hakkeen tuottaminen vaatii huolellista organisointia ja tarkkaavaisuutta koko tuotantoketjun läpi. Tyypillisen toimitusketjun lisäksi haketta voidaan käsitellä siten, että hakkeen laatu paranee. Käytännössä tämä tarkoittaa hakkeen kuivaamista ja tasalaatuisuuden parantamista. Tarkkaavaisella käsittelyllä hakkeesta saadaan hyvälaatuista polttoainetta voimalaitosten, lämpölaitosten ja pienkuluttajien käyttöön. Laadulliset vaatimukset korostuvat, kun haketta polttavan kattilan koko pienenee.

Hyvälaatuisella ja kuivalla hakkeella lämmöntuotanto voidaan toteuttaa hyvällä kattilahyötysuhteella. Tällöin polttoaineen energiasta hyödynnetään mahdollisimman suuri osa. Tässä diplomityössä havaittiin, että pienillä kattiloilla hyötysuhde laskee merkittävästi kosteuden suurentuessa. Lisäksi pienissä kattiloissa erittäin kostean hakkeen polttaminen ei ole suositeltavaa tai se on jopa mahdotonta. Pienten kattiloiden hakkeen maksimikosteus on tyypillisesti 40 prosenttia.

Tasalaatuinen hake edesauttaa polttoaineiden syöttöjärjestelmien varmaa ja tasaista toimintaa, jolloin lämmöntuotanto on vakaata ja toimintavarmaa. Tällöin kattilan säätäminen on helppoa ja lämmöntuotanto vaatii vähemmän valvontaa ja säätötoimenpiteitä kuin heterogeenisillä hake-erillä. Hyvälaatuinen hake säilyy varastossa homehtumatta ja pakkasella hake ei jäädy suuremmiksi paloiksi. Kuiva hake vaatii vähemmän varastotilaa kuin märkä. Tämä havaitaan erityisesti pienkäyttäjien kattilasäiliöiden täyttövälejä tarkasteltaessa. Kuivalla hakkeella kattilasäiliön eli stokerin täyttöväli suurenee märkään verrattuna. Priimatussa hakkeessa ei ole epäpuhtauksia tai pitkiä kappaleita, jotka voivat rikkoa laitteita sekä aiheuttaa tukkeumia ja toimintahäiriöitä.

Hakkeen arvo määräytyy kuluttajalle energianhankintakustannusten ja hakkeen käytettävyyden perusteella. Priimauksessa hakkeen energiatekninen arvo suurenee. Pienillä kattiloilla hakkeen arvo kasvaa huomattavasti enemmän kosteuden pienentyessä kuin suurilla kattiloilla. Tämä aiheutuu kattiloiden hyötysuhteista. Tutkielmassa arvioiduilla toiminta-arvoilla hakkeen energiatekninen arvo kasvaa omakotitalon kattilalla 0,25-0,39 €/i-$m^3$ yhtä kosteuden prosenttiyksikköä kohden, kun kuivaus tapahtuu välillä 50-10 prosenttia kosteutta. Vastaava arvonmuutos välille 40-20 prosenttia kosteutta on 0,20-0,30 €/i-$m^3$ yhtä kosteuden prosenttiyksikköä kohden. Tällöin lisämaksukyky kuivatusta

hakkeesta on välillä 50-10 prosenttia noin 10-16 €/i-$m^3$ ja välillä 40-20 prosenttia noin 4-6 €/i-$m^3$. Arvonnousujen vaihteluvälit aiheutuvat hakkeen hinnan muutoksista.

Kattilakoon suurentuessa arvonnousu on pienempi. Energiateknisen arvonnousun lisäksi hakkeen arvoa korottavat käytettävyystekijät, kuten pienempi varastotilan tarve, homeiden ja jäätymien välttäminen, toimintavarmuus, helppo säädettävyys, päästöjen pieneneminen ja muiden polttoaineiden korvaavuus. Muiden polttoaineiden korvaavuudella tarkoitetaan tilannetta, jossa hyvälaatuisen hakkeen polttamisella voidaan korvata esimerkiksi varapolttoaineena olevaa öljyä energiantuotannossa. Tällöin hyvälaatuisen hakkeen arvo on suuri, koska öljy on kallis polttoaine. Lisäksi öljyn käyttö aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä, joiden vähentämistä Parikkalan kunnassa tavoitellaan. Hake on myös paikallinen polttoaine ja öljy tuodaan ulkomailta. Nämä tekijät kasvattavat hakkeen arvoa lämpölaitoksilla, joissa vara- ja huippukuormapolttoaineena käytetään öljyä.

Hyvälaatuisen hakkeen tuottaminen vaatii hakkeen kuivaamiseen, seulomiseen, analysoimiseen, siirtelyyn, varastointiin ja kuljettamiseen tarvittavat laitteet ja toimitilat. Jos hakkeen raaka-aine toimitetaan laitokselle rankoina, tarvitaan tuotantoon myös hakkuri, jolla raaka-aine pilkotaan mekaanisesti. Hakkurityyppi vaikuttaa käytettäviin raaka-aineisiin ja hakkeen laatuun. Täten omalla haketuksella tuottaja voi vaikuttaa hakkeen laadullisiin ominaisuuksiin. Priimaukseen tarvittavat laitteet vaativat hakkeen tuottajalta suuren pääoman, joka täytyy sitoa toimintaan. Investointien lisäksi tuotantokustannuksia aiheuttavat esimerkiksi raaka-aineen hankinta, lämmön- ja sähkönkulutus, polttoaineen kuljettaminen ja lastaaminen, työvoima, markkinointi, toimitilojen vuokrat, mahdolliset raaka-ainetappiot, huolto ja kunnossapito ja muut toimintaan liittyvät kustannukset, kuten varastokasojen peittäminen ja siihen liittyvät tarvikkeet.

Selvityksissä havaittiin, että kuivauksen energiankulutus vaikuttaa merkittävästi hakkeen kuivauksen kustannuksiin. Tyypillisesti hakkeen kuivaus kuluttaa lämpöenergiaa noin 1 kWh/kg vettä. Lämpöenergiaa kuluu enemmän, kun ulkoilman lämpötila on pienempi. Kuivauskaasun lämpötilan kasvaessa lämmönkulutus yleisesti pienenee. Poikkeuksena ovat pienet kuivauskaasun lämpötilat, kun ulkoilma on lämmintä. Toisaalta tällöin sähkönkulutus suurenee. Kuivauskaasun lämpötilan ei tulisi ylittää 100 celsiusastetta, koska tällöin osa puusta alkaa kaasuuntua. LTO:lla voidaan pienentää lämmönkulu-

tusta ja lisäksi LTO:ta käytettäessä ulkoilman ja kuivauskaasun lämpötilan merkitykset lämmönkulutukseen pienenevät. Sähkönkulutusta on lämpöön verrattuna vaikeampi arvioida, koska hakkeen aiheuttama vastapaine vaikuttaa sähkönkulutukseen. Myös puhaltimen tyyppi vaikuttaa sähkönkulutukseen. Sähkönkulutus kasvaa, jos kuivauslämpötila laskee.

Tutkielmassa arvioiduilla toiminta-arvoilla hakkeen kuivauksen energiakustannukset ovat tarkasteluvälillä 50-10 prosenttia kosteutta noin 0,13-0,23 €/i-$m^3$ yhtä kosteusprosentin pienenemistä kohden. Vastaavasti välillä 40-20 prosenttia kosteutta energiakustannukset ovat noin 0,10-0,18 €/i-$m^3$ yhtä kosteusprosentin pienenemistä kohden. Tällöin energiakustannukset kuivauksesta ovat välillä 50-10 prosenttia noin 5,20-9,20 €/i-$m^3$ ja välillä 40-20 prosenttia noin 2,00-3,60 €/i-$m^3$. Vaihteluvälit aiheutuvat kuivauksien energiankulutuksien vaihteluista.

Kuivaukseen tarkoitettuja laitteistoja on useita erilaisia ja laitteistojen soveltuvuus vaihtelee kuivattavan materiaalin, tuotantokapasiteetin, kuivauskaasun ja kuivauslämpötilan mukaan. Kuivausta ja kuivauslaitteistoa tarkasteltaessa on huomioitava, että kuivaaminen hidastuu PSK-rajaa pienemmällä kosteudella. PSK-raja puulla on noin 23 prosenttia. Kyseisen rajan alittuessa puu alkaa myös kutistua. Jatkuvatoimisilla kuivureilla kuivaus on tasaista ja kuivauksen optimointi on helpompaa kuin panoskuivureilla. Jatkuvatoimisilla kuivureilla PSK-rajan alittumisesta aiheutuva kuivauksen hidastuminen ja hyötysuhteen laskeminen voidaan kontrolloida paremmin. Tämän seurauksena voidaan todeta, että jatkuvatoimisilla kuivureilla kuivaus on yleisesti taloudellisempaa. Täten hakekuivurin valinta vaikuttaa merkittävästi tuotannon kannattavuuteen ja toimivuuteen.

Hakkeen tuottaminen vaatii tarkkaa organisointia, jolla voidaan välttää lisäkustannuksien syntymistä tai poistaa osa oletettavista kustannuksista. Esimerkiksi luonnonkuivauksella voidaan pienentää kuivauksen energiankulutusta. Luonnonkuivauksen tehokkuuteen vaikuttavat varaston sijainti, ladonta ja peittäminen. Hyvin onnistuneella luonnonkuivauksella on mahdollista päästä noin 25 prosentin hakkeen raaka-aineen kosteuteen, mutta tyypillisesti kosteus on 30-50 prosenttia luonnonkuivauksen jälkeen. Toisaalta tehokas luonnonkuivaus vaatii varastokasojen peittämisen, mikä aiheuttaa lisäkustan-

nuksia. Peittäminen vaikuttaa kuivaustulokseen 5-15 prosenttia kuivattavasta materiaalista riippuen. Lisäksi luonnonkuivaus vaatii pääomaa, koska kuivaaminen on hidasta ja kausittaista, jolloin varastojen täytyy olla suuria. Toisaalta suurien varastojen hankkiminen voi olla edullista, koska tuottaja voi hankkia raaka-ainetta edullisen hintatason aikaan suuremmissa erissä. Raaka-aineen hintaa voidaan myös laskea, jos laitos voi käsitellä erilaisia hakkeen raaka-aineita markkinatilanteen mukaan. Toisaalta tämä vaatii laitteistoilta suurempia investointeja. Olemassa olevien laitteistojen hyödyntäminen pienentää investointien ja sidottavan pääoman tarvetta merkittävästi.

Hakkeen tuottamisen kannattavuuteen vaikuttavat hakkeen kuluttaja-arvon ja tuotantokustannusten määräytyminen. Näiden erotuksena saadaan tuottajalle jäävä voitto. Hakkeen priimauksessa hakkeen lämpöarvo kasvaa. Tällöin hakkeen myyntimäärät vähenevät, jos lämmöntuotanto pysyy vakiona. Toisaalta, jos hakkeen laatu paranee, myös hakkeen käytettävyys lisääntyy. Tällöin hyvälaatuisella hakkeella voidaan korvata muita polttoaineita, jolloin hakkeen kulutus lisääntyy. Tämän tutkielman tuloksista selviää, että priimatulla hakkeella on potentiaalia energiamarkkinoilla.

Hakkeen priimauksen kannattavuus riippuu useasta tekijästä, joista osa voidaan laskennallisesti osoittaa tietyn suuruiseksi. Osa tekijöistä riippuu kuluttajien toimintatavoista ja yleisistä energiamarkkinoista, joiden kehittymisen arvioiminen on lähes mahdotonta. Tässä diplomityössä selvitettyjen energiateknisten tulosten perusteella priimatun hakkeen markkinoiminen on järkevintä kohdistaa pienille ja keskisuurille hakkeen kuluttajille. Suurille voimalaitoksille hakkeen kosteudella ja tasalaatuisuudella ei ole yhtä suurta merkitystä kuin pienemmillä kattiloilla. Toisaalta suuret voimalaitokset voivat hyödyntää priimattua haketta tukipolttoaineena, kun tehontarve on suuri ja muun käytettävän polttoaineen laatu on heikkoa.

Nyky-yhteiskunta suosii toimintavarmoja ja kuluttajille helppoja toimintatapoja, joita priimattu hake tarjoaa kuluttajille. Lisäksi priimatun hakkeen hinta voi olla edullinen vaihtoehtoisiin polttoaineisiin verrattuna. Ominaisuuksiltaan samankaltaisin vaihtoehtoinen polttoaine on pelletti, joka on käytettävyydeltään hieman priimattua haketta parempaa, mutta hinnaltaan huomattavasti arvokkaampaa pienkuluttajille. Lisäksi yleiset hakkeen polttolaitteistot mahdollistavat priimaamattoman hakkeen käyttämisen, jolloin

kuluttajan energiantuotanto on hyvin turvattua. Tällöin kuluttaja voi hankkia polttoainetta useasta lähteestä ja jopa itse valmistaa haketta. Pelletin valmistaminen omista raaka-aineista on usein mahdotonta, koska valmistamiseen olevia laitteistoja on harvassa ja laitteistojen hankkiminen on kallista. Hakkeen valmistamiseen käytettäviä hakkureita on useilla toimijoilla, kuten maatiloilla ja nykyisillä hakkeen tuottajilla.

Kokonaisuutena hake on paikallinen ja uusiutuva polttoaine, jonka saatavuus on tällä hetkellä hyvä. Jos Parikkalan alueella alkaa hakkeen priimaamiseen kohdistuvaa toimintaa, hakkeen hankkimisesta tulee entistä helpompaa ja hakkeen laatu voidaan taata.

# 13 YHTEENVETO

Kansainvälinen ja Suomen kansallinen politiikka pyrkii ohjaamaan ilmastonmuutoksen hidastumiseen ja ympäristöystävälliseen energiantuotantoon. Kyseiset toimenpiteet edellyttävät uusiutumattomien ja hiilidioksidipäästöjä tuottavien energianlähteiden käytön vähentämistä. Käytännössä tämä tarkoittaa energiatehokkuuden parantamista ja uusiutuvien energiantuotantolähteiden osuuden kasvattamista.

Parikkalan kunnassa on panostettu hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ja ympäristöystävälliseen energiantuotantoon ja -käyttöön. Tämän diplomityön tarkoituksena on edesauttaa kunnan tavoitteiden saavuttamista ja tuottaa tietoa alueen toimijoille uusiutuvan energian käytöstä. Tutkimus keskittyy hakkeen laadullisiin ominaisuuksiin. Hake on uusiutuva ja paikallinen polttoaine, jolloin hake soveltuu erinomaisesti tavoiteltuihin energia- ja ympäristötavoitteisiin. Oikeanlaisella hakkeen käytöllä energiatehokkuutta voidaan parantaa ja energiaa voidaan tuottaa uusiutuvilla energianlähteillä.

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää hakkeen laadun parantamiseen liittyviä ratkaisuja ja toiminnan edellytyksiä Parikkalan alueella. Diplomityö keskittyy erityisesti Parikkalan paikallisiin energiajärjestelmiin, mutta tutkielman tuloksia voidaan hyödyntää myös muilla paikkakunnilla. Diplomityössä esitetään hakkeen tuotantoketju ja selvitetään energiateknisten näkemysten avulla hakkeen jalostuksen eli priimauksen kannattavuutta.

Tutkielman tulokset osoittavat, että priimatun hakkeen käyttäminen on energiateknisesti kannattavinta pienissä kattiloissa, joissa polttoaineen täytyy olla kuivaa ja tasalaatuista. Täten priimatun hakkeen tuottaminen ja markkinoiminen on järkevintä kohdistaa pieniin käyttäjiin. Toisaalta myös suurilla käyttäjillä voi esiintyä tarvetta hyvälaatuiselle hakkeelle, mutta pääsääntöisesti suuret voimalaitokset pystyvät käsittelemään heikompiarvoisia polttoaineita. Hyvälaatuinen hake voi korvata muita tukipolttoaineita, kuten öljyä, suurissa voimalaitoksissa. Tutkielman tuloksista selviää, että priimatulla hakkeella on markkinapotentiaalia energiamarkkinoilla käytettävyyden ja hinnan perusteella.

Tuloksissa esitetään hakkeen kuivauksesta aiheutuvia kustannuksia. Laskelmat on toteutettu yleisille yksinkertaistetuille tapauksille ja täten kuivauksen kannattavuutta tulee

tarkastella yksityiskohtaisemmin tunnettuja laitteistoja tutkiessa. Tutkimustulokset antavat esitietoja kuivauksen kannattavuudesta ja laitevalinnoista, jolloin erilaisia tuotantojärjestelmiä voidaan vertailla keskenään.

Tutkielmasta selviää myös hakkeen kuluttajalle olennaisia tietoja hakkeen käytöstä ja käsittelystä. Tutkielmassa on esitetty hakkeen energiatekniset arvostuskäyrästöt hakkeen kosteuden funktiona, joiden avulla kuluttaja voi vertailla markkinoilla olevien hakkeiden arvoja. Laskelmat on toteutettu arvioiduilla yleisillä parametreilla, mutta tämän tutkielman pohjalta vastaavat laskutoimenpiteet voidaan suorittaa yksityiskohtaisesti olemassa oleville järjestelmille.

Tutkielmassa esitettyjen laskelmien pohjalta sekä hakkeen tuottaja että kuluttaja voivat laskea hakkeen käytön ja priimauksen kannattavuuksia erilaisilla laitteilla ja polttoaineilla. Tällöin käytettäviä polttoaineita voidaan vertailla ja valita markkinoiden soveltuvimpia ja edullisimpia polttoaineita käytettäväksi. Toisaalta tuottajat voivat selvittää mahdollisuuksia tuottaa laadukkaampia polttoaineita mahdollisimman edullisesti, jolloin tuottajien tulos kasvaa. Näiden tutkimisella hakkeen kuluttajat ja tuottajat voivat hyötyä taloudellisesti polttoaineen käyttö- ja tuotantokustannuksissa. Samalla toimijat edesauttavat uusiutuvien energianlähteiden käytöllä ja tuotannolla koko yhteiskuntaa saavuttamaan energia- ja ympäristöteknologiaan kohdistuvia tavoitteita.

# LÄHDELUETTELO


Alakangas Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5740-9.

Alpua Jussi 2011. Biopolttoaineen kuivaus voimalaitoksessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma.

Amos Wade 1998. Report on Biomass Drying Technology. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

Ariterm Oy 2011. Biolämpöopas [verkkodokumentti]. [Viitattu 24.6.2014]. Saatavissa: http://195.67.82.150/ariterm/Biolampoopas%202011%20FIN%20220811%20low%20res.pdf

Bioenergia ry 2014. Kuluttajapelletin hintaa tilastoidaan. [www-sivut]. [Viitattu 23.6.2014]. Saatavissa http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20hinta-%20ja%20tilastotietoja

Bioenergianeuvoja.fi 2014a. Hakkeen valmistus ja hankinta. [www-sivut]. [Viitattu 4.3.2014]. Saatavissa http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hake/hake-polttoaineena/

Bioenergianeuvoja.fi 2014b. Puun kosteus. [www-sivut]. [Viitattu 4.2.2014]. Saatavissa http://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/puun-kosteus/

Döring Stefan 2013. Power from Pellets. Berlin: Springer. ISBN 978-3-642-19962-2.

Erkkilä Ari et al. 2011. Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen. Jyväskylä: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tutkimusraportti VTT-R-10151-10

Etelä-Karjalan liitto 2012. Taustaselvitys Etelä-Karjalan ilmasto- ja energia-asioista ja toimenpide-ehdotukset suunnittelun tueksi. Versio 1. Lappeenranta. ISBN 978-952-9560-35-6.

Etelätalo Esa 2013. Erilaatuisten hakkeiden käyttökohdevaatimuksista ja tuotantokustannuksista. Raportti. Karelia-ammattikorkeakoulu.

Europaeus Veera 2014. Biohiilen tuotannon kannattavuus Parikkalassa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma.

Flyktman Martti ja Helynen Satu 2004. Hyötysuhteen määrittäminen päästökaupan alkujakoa varten. Jyväskylä: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tutkimusselostus PRO2/6095/03.

Föhr Jarno 2008. Metsähakkeen jalostusarvon nostaminen eri kuivausmenetelmillä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto.

Halonen et al. 2003. Bioenergian tuotanto- ja käyttöketjut sekä niiden suorat työllisyysvaikutukset. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tiedotteita 2219. ISBN 951–38–6195–3.

Helin Mikko 2005. Moisture in wood fuels and drying of wood chips. Northern Wood-Heat Symposium, Joensuu, 7.6.2005. Northern Woodheat. Saatavissa http://www.northernwoodheat.net/htm/news/Finland/Symposiumpres/Dryingofwoodchips.pdf

Hillebrand Kari 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi - yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. Jyväskylä: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Tutkimusraportti VTT-R-07261-09. ISBN 951–38–6195–3.

Holmberg Henrik 2007. Biofuel Drying as a Concept to Improve the Energy Efficiency of an industrial CHP Plant. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto. ISBN 978-951-22-8649-2.

Hukka Antti 1996. Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Julkaisuja 815. ISBN 951-38-4524-9.

Härkönen Martti 2010. Keski-Pohjanmaan energiaosuuskuntien lämpölaitokset: kartoitus ja mittauksia, Kaustinen, 22.9.2010. CENTRIA.

Härkönen Martti 2011. Kostean puun tiheys ja hakkeen irtotiheys. CENTRIA. No 1017.

Härkönen Martti 2012. Puun polttoainekäyttö pienissä aluelämpölaitoksissa. Kokkola: KPAMK, CENTRIA.

Ihalainen Tanja ja Sikanen Lauri 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset pelletintuotannon arvoketjuissa. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos (Metla). Työraportteja 181. ISBN 978-951-40-2271-5.

Jaakkola Jelena 2014. Biopolttoaineiden on-line -laadunmittauksen hyödyt energiantuotannossa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Ympäristötekniikan koulutusohjelma.

Jahkola Miina, Lindblad Jari, Sirkiä Seija ja Laurén Ari 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos (Metla). Työraportteja 241. ISBN 978-951-40-2379-8.

Johansson Bertil 2000. Ved, flis och bark. Markaryd: Skogsindustrins Utbildning i Markaryd AB. Y-201. ISBN 91-7322-267-4.

Kajaanin yliopistokeskus 2014. Itä-Suomen energiatilasto 2012. Oulun yliopisto, Kajaanin yliopistokeskus.

Karttatiimi Oy 2014. [www-sivut]. [Viitattu 4.2.2014]. Saatavissa http://parikkala.karttatiimi.fi/?e=4475048.76&n=6838508.72&r=58.43&rots

Koskiniemi Esa ja Viirimäki Juha 2012. Energiapuun varastointi ja hakkeen kosteuden vaikutus kattilalaitoksen hyötysuhteeseen. Opinnäytetyö. Seinäjoen ammattikorkeakoulu.

Krajnc Nike 2011. Wood Enegy Technologies. Belgrade.

Kulkki Katri, Lehtimäki Jani ja Wall Antti 2013. Energiapuun tuotanto Suomessa ja Keski-Pohjanmaalla. Forest Fire –hanke.

Kärsämäen kehityskeskus Oy 2005. Pohjois-Pohjanmaan pellettihanke 2003-2005. Loppuraportti.

Lepistö Tanja, Viirimäki Juha ja Lauhanen Risto 2010. Laatuhakkeen tuotanto-opas. Sastamala: Metsäkeskukset. ISBN 978-951-98723-8-4.

Liang Tung, Khan Masroor Akram ja Meng Qinglong 1996. Spatial and Temporal Effects in Drying Biomass for Energy. Great Britain: Elsevier. Biomass and Bioenergy Vol. 10 pp. 353-360.

Metsälehti 2014. Metsähakkeesta voi syntyä kilpailua 18.2.2014 [www-sivut]. [Viitattu 19.2.2014]. Saatavissa http://www.metsalehti.fi/Metsalehti/Metsauutiset/2014/2/Metsahake-riittaa-vaikka-kaytto-kasvaa/

Naimi Ladan et al. 2006. Cost and Performance of Woody Biomass Size Reduction for Energy Production. Edmonton: The Canadian Society for Bioengineering. Paper No. 06-107.

Niemitalo Vesa 2011. Hakkeen kuivaus; Yhteenveto eri koe- ja tutkimustoiminnasta. Ammattiopisto Lappia.

Nummelin Jaakko, Haikalin Ville ja Raiko Markku 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, Polttoaineen kuivatustekniikat. Helsinki: Motiva.

Parikkalan kunta 2014. Yleistietoa kunnasta [www-sivut]. [Viitattu 4.2.2014]. Saatavissa http://www.parikkala.fi/fi/Yleistietoa-kunnasta

Parikkalan Valo Oy 2014. Teollisuussähkö 1.1.2014 –hinnasto [www-sivut]. [Viitattu 2.6.2014]. Saatavissa http://www.parikkalanvalo.fi/fi/index.php?page=teollisuussahko

Pastre Olivier 2002. Analysis is the technical obstacles related to the production and utilization of fuel pellets made from agricultural residues. European Biomass Industry Association. Altener 2002-012-137-160.

Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko ja Kurki-Suonio Ilmari 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. Jyväskylä: International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. ISBN 951-666-604-3.

Raitila Jyrki ja Heiskanen Veli-Pekka 2014. Puun keinokuivauksen perusteet. Puun kuivauksen teemapäivä, Saarijärvi 4.4.2014. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Saatavissa: http://www.metsakeskus.fi/documents/10156/2128862/Puun+keinokuivauksen+perusteet+Jyrki+Raitila+VTT.pdf/30ae777e-213c-436d-bcad-3cb840a7e3e7

Rajala Antti-Jussi 2013. Drying of Chips in a Gasifier Plant. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma.

Rinne Samuli 2010. Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannukset. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma.

Röser Dominik 2014. Wood Chippers, Infocard 9 [verkkodokumentti]. [Viitattu 4.3.2014]. Northern WoodHeat. Metsäntutkimuslaitos (Metla). Saatavissa http://www.northernwoodheat.net/htm/publications.php

Suomen Rakentamismääräyskokoelma E9 2005. Kattilahuoneiden ja polttoainevarastojen paloturvallisuus, ohjeet 2005. Helsinki.

Suomen ympäristökeskus 2013. Kohti hiilineutraalia kuntaa (HINKU) [www-sivut]. [Viitattu 6.2.2014]. Saatavissa http://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus__kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Kohti_hiilineutraalia_kuntaa__HINKU

Säätötuli Oy 2014. Hake [www-sivut]. [Viitattu 20.2.2014]. Saatavissa:http://www.saatotuli.fi/tmp_saatotuli2010_site_0.asp?sua=2&lang=1&s=200

Tainio Pasi ja Kontiokorpi Anniina 2013. Uusiutuvan energian kuntakatselmus. Parikkalan kunta. Työ- ja Elinkeinoministeriön tukema energiakatselmushanke.

Tilastokeskus 2013. Maakunnat 2013 [www-sivut]. [Viitattu 17.2.2014]. Saatavissa http://tilastokeskus.fi/meta/luokitukset/maakunta/001-2013/

Tilastokeskus 2014. Energian hinnat 2014, 1. vuosineljännes, liitetaulukko 2 [www-sivut]. [Viitattu 10.7.2014]. Saatavissa http://www.stat.fi/til/ehi/2014/01/

Tynkkynen Noora 2010. Etelä-Karjalan energiaselvitys ja maakunnan energiatalouden tulevaisuus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energia- ja ympäristötekniikan osasto.

Wiik Camilla, Heiskanen Veli-Pekka, Kallio Markku ja Anttila Perttu 2008. Wood pellet raw material from Canadian British Columbia. Jyväskylä: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Research report VTT-R-10283-08.

Ylitalo Esa 2013. Puun energiakäyttö 2012. Metsätutkimuslaitos (Metla). Metsätilastotiedote 15/2013.

Yrjölä Jukka 2006. Modelling and experimental study on wood chips boiler system with fuel drying and with different heat exchangers. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu. ISBN-10 951-22-8439-1.

Äijälä Olli, Kuusinen Martti ja Koistinen Arto 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen ja kasvatukseen. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja.