

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tuotantotalouden osasto

KOIVUN HFV-KUIVAUKSEN KUSTANNUSVAIKUTUKSET

Diplomityön aihe on hyväksytty Tuotantotalouden osaston  
osastoneuvostossa 27.8.2003

Työn valvoja: TkT, prof. Hannu Rantanen

Työn tekijä: Jari-Pekka Suominen

Lahdessa kesäkuun 22. päivänä 2005

---

Jari-Pekka Suominen

Turkupolku 4

15880 Hollola

**TIIVISTELMÄ**

Tekijä: Jari-Pekka Suominen	
Työn nimi: Koivun HFV-kuivauksen kustannusvaikutukset	
Osasto: Tuotantotalous	
Vuosi: 2005	Paikka: Lahti
Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 102 sivua, 49 kuviota ja 2 liitettä Tarkastajana professori Hannu Rantanen	
Hakusanat: Puu, koivu, kuivaus, HFV-kuivaus, kustannus Keywords: Wood, birch, drying, HFV-drying, cost	
<p>Työn tavoitteena on ollut selvittää HFV-kuivauksen taloudellisia vaikutuksia, kuivausmenetelmän toimintaperiaatteita, ominaisuuksia ja Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen kuivaustutkimuksesta saatuja tuloksia. Tutkimuskohteeksi on valittu sydänkeskeinen koivu, joka soveltuu erinomaisesti uuden kuivausmenetelmän raaka-aineeksi, sillä sen hankintakustannukset muodostuvat tavanomaista koivusahatavaraa alhaisemmaksi ja sillä saavutetaan raaka-aineen jatkojalostusarvon huomattava nousu.</p> <p>Työn teoriaosassa on käsitelty puun kuivausta, sen yleisiä piirteitä ja eri kuivausvaihtoehtoja. Koivun kuivauksesta ja kuivauskustannuksista löytyy varsin vähän julkaistua tutkimustietoa, jonka johdosta kuivauskustannuksia kartoitettiin myös kotimaisten havupuiden osalta.</p> <p>Tuoreen koivun kuivaus muutamassa tunnissa puusepäнкуivaksi aihiksi ilman kuivausvirheitä on Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen tutkimuksissa saatujen tuloksien mukaan mahdollista. Tässä tutkimuksessa on käsitelty neljän eri teholuokan kuivaamoinvestointivaihtoehtoa. Vaihtoehdot poikkeavat toisistaan niin hankintahinnan, tuotantokapasiteetin kuin valmistuskustannuksienkin suhteen. Mikäli kuivaamon tuotantokapasiteetti ei ole määräävä tekijä ja investoinnilla ei ole pääomarajoitetta, niin kannattavimmaksi investointivaihtoehdoksi osoittautuu suurimman kokoluokan HFV-kuivaamolaitteisto.</p>	

## ABSTRACT

Author: Jari-Pekka Suominen	
Title: Cost effects on HFV-drying of birch	
Department of Industrial Engineering and Management	
Year: 2005	Place: Lahti
Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. 102 pages, 49 figures and 2 appendices Examiner Professor Hannu Rantanen	
Keywords: Wood, birch, drying, HFV-drying, cost	
<p>The objective of this work was to study the cost effects of high frequency vacuum (HFV) drying technology when using birch as raw material. HFV drying technology principles and characteristics as well the results of the drying research in Lahti Polytechnic Faculty of Technology were also studied. Round birch is excellent raw material for the new drying technology because its acquisition costs are lower than in usual birch sawn timber and by using round birch it is obtained a remarkable increase in value added characteristics of the raw material.</p> <p>The theoretical part of the work presents timber drying, its general features and different drying methods. There is not much research information available concerning birch drying and its drying costs so in this work it was also studied the drying costs of finnish conifers.</p> <p>According to the research work in Lahti Polytechnic Faculty of Technology, it is possible to dry moist birch into dry billet in few hours without drying defects. In this work, four drying kilns of different sizes are presented. Kilns are different in purchase prices, capacities and production costs. When production capacity is not the decisive factor and an investment has no capital limitation the most profitable investment alternative is the biggest HFV drying kiln.</p>	

## **ALKUSANAT**

Diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa tuotantotalouden osastolla ja Lahden ammattikorkeakoulun Puulinkki-projektin toimeksiannosta.

Työn tarkastajina ovat toimineet Lappeenrannan teknillisen yliopiston puolesta TkT prof. Hannu Rantanen ja DI Jorma Papinniemi. Kiitän diplomityön tarkastajia saamistani neuvoista.

Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen puolesta työtä on ohjannut insinööri Esa Auvinen, jota kiitän antoisista ja rakentavista keskusteluhetkistä. Lisäksi haluan kiittää kaikkia HFV-kuivausmenetelmän kehitysprojektissa mukana olleita.

Lahdessa 22.6.2005

Jari-Pekka Suominen

## SYMBOLILUETTELO

$a_1 \dots a_3$	Aputermejä	, -
$b_1 \dots b_3$	Aputermejä	, -
$b_r$	Puun kutistuminen säteen suunnassa	, %
$b_t$	Puun kutistuminen tangentin suunnassa	, %
$c_1 \dots c_3$	Aputermejä	, -
D	Diffuusiokerroin tai halkaisija	, $m^2/s$ tai mm
$d_1 \dots d_3$	Aputermejä	, -
F	Massavuo	, $kg/m^2$
H	Hankintakustannus	, eur
i	Laskentakorko	, %
$L^*$	Vaaleus-tummuus	, -
n	Investoinnin pitoaika	, a
p	Tuotteen hinta tai kehän pituus	, $eur/m^3$ tai mm
PK	Pääomakustannus	, $eur/m^3$ eur
$PK_{kuivaamo}$	Kuivaamon pääomakustannus	, $eur/m^3$ eur
$PK_{tuote}$	Tuotteen pääomakustannus	, $eur/m^3$ eur
PSKP	Puun syiden kyllästymispiste	, %
$P_o$	Vallitseva paine	, atm
R	Kaasuvakio	, 1,987 cal/molK
T	Lämpötila	, K
u	Konsentraatio	, $kg/m^3$
z	Paikkakoordinaatti	, m
$\pi$	Pii	, 3,1416

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>2</b>
<b>ALKUSANAT</b> .....	<b>4</b>
<b>SYMBOLILUETTELO</b> .....	<b>5</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO</b> .....	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>8</b>
1.1 TAUSTAA .....	8
1.2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA RAJAUKSET .....	9
1.3 TUTKIMUKSEN RAKENNE JA TOTEUTUS .....	9
<b>2 PUUN KUIVAUS</b> .....	<b>11</b>
2.1 PUUN KUIVAUKSESTA.....	11
2.2 KUIVAUKSEN TEORIAA.....	11
2.2.1 Yleinen kuivausteoria .....	11
2.2.2 Puun kuivausteoria.....	13
2.3 KUIVAUSMENETELMÄT .....	15
2.3.1 Lautatarhakuivaus.....	15
2.3.2 Lämminilmakuivaus.....	15
2.3.3 Erikoiskuivausmenetelmät.....	18
2.4 PUUN KUIVAUKSESTA AIHEUTUVAT KUSTANNUKSET .....	22
<b>3 KOIVUN HFV-KUIVAUS</b> .....	<b>30</b>
3.1 KUIVAUSTUTKIMUKSEN TAUSTAA JA TAVOITTEET .....	31
3.2 HFV-KUIVAUKSEN TEKNIKKAA .....	33
3.3 LABORATORIOKUIVAAMON MITOITUS JA TOTEUTUS.....	35
3.3.1 Kuivaamon rakenne.....	35
3.3.2 Kuivauksen yleinen kulku .....	37
3.4 KOEKUIVAUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	38
3.4.1 Tuoreen koivun kuivaus.....	38
3.4.2 HFV-kuivauksen energian kulutus.....	39
3.4.3 Kuivauskapasiteetti.....	42
3.4.4 HFV-kuivauksen laatu .....	43
3.4.5 Asiakaskuivaukset.....	47
3.4.6 Tuoreen koivun värimuutoksen esitutkimus.....	49
3.4.7 Koivun anisotropia .....	52

<b>4</b>	<b>YRITYSKYSELY .....</b>	<b>54</b>
<b>5</b>	<b>HFV-KUIVAUKSEN KUSTANNUKSET .....</b>	<b>64</b>
	5.1 RAAKA-AINEHANKINTA .....	65
	5.2 PÄÄOMAKUSTANNUKSET.....	66
	5.2.1 <i>Hankintameno</i> .....	66
	5.2.2 <i>Käyttöpääoma</i> .....	67
	5.3 AIHIOIDEN VALMISTUSKUSTANNUKSET .....	70
<b>6</b>	<b>HFV-KUIVAAMOINVESTOINTI.....</b>	<b>75</b>
	6.1 INVESTOINNIN KANNATTAVUUS .....	76
	6.2 INVESTOINNIN LÄHTÖKOHDAT .....	78
	6.3 INVESTOINTILASKELMAT .....	81
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO.....</b>	<b>89</b>
	7.1 SUOSITUKSET JATKOTUTKIMUKSELLE .....	91
	<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>93</b>
	<b>LIITTEET .....</b>	<b>98</b>

# 1 JOHDANTO

## 1.1 TAUSTAA

Puun kuivaus on yksi keskeisimmistä osista sahatavaran valmistusprosessia. Sahatavara tulee kuivata, jotta se kestää pilaantumatta varastoinnin ja kuljetuksen.

Puutavara kuivataan yleensä alle 22 %:n, jolloin se säilyy pilaantumatta (Siimes 1983, s. 8). Tavoitekosteuden ollessa välillä 6-8 % puhutaan ”puusepäнкуivasta” puutavarasta.

Puutavaran kuivaukseen tarvitaan lämpöä ja tavallisesti se välitetään puuhun ilman avulla. Kuivauslämmön siirtoon löytyy myös muita menetelmiä, joita käsitellään tässä tutkimuksessa. Kuivauslämpöä tarvitaan puussa olevan veden lämmittämiseen ja haihduttamiseen. Lämmön tuottamiseen tarvitaan energiaa, josta muodostuvat kuivauksen suurimmat kustannukset. Siksi on tärkeää, miten energiaa hyödynnetään puutavaran kuivauksessa. Puun kuivauksen tuottavuutta voidaan parantaa alentamalla kuivaamon energiankulutusta, nopeuttamalla kuivausprosessia ja parantamalla kuivauksen laatua. Yleensä nämä kolme tekijää ovat sidoksissa toisiinsa ja onnistunein tulos saavutetaan kaikkien osa-alueiden välisenä kompromissina.

Perinteisen sahatavarakuivauksen rinnalle on kehitetty Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksella uusi kuivausmenetelmä, joka perustuu suurtaajuus-tekniikkaan ja alipainekuivaukseen. Tätä kuivausmenetelmää kutsutaan nimellä HFV-kuivaus ja se mahdollista pyöreän sydänkeskeisen koivuaihion kuivaamisen muutamassa tunnissa ilman halkeamia, jolloin sitä voidaan hyödyntää ilman jatkojalostusta sorvausteollisuuden raaka-aineena. Tässä uudessa aihionvalmistusmenetelmässä raaka-aineen hankintakustannukset muodostuvat tavanomaista alhaisemmaksi ja lisäksi raaka-aineen jatkojalostusarvo nousee uuden kuivausteknologian avulla tavallista sahatavaraa korkeammaksi. Kuivausmenetelmälle on myönnetty neljä kotimaista patenttia ja yksi US-patentti, jotka liittyvät itse kuivausprosessiin, sen ohjaukseen ja kuivausmenetelmän oheistoimintoihin.



## 1.2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA RAJAUKSET

Tämän diplomityön päätavoitteena on ollut selvittää HFV-kuivauksen taloudellisia vaikutuksia. On osoittautunut, että koivu puulajina soveltuu erinomaisesti uuden kuivausmenetelmän raaka-aineeksi, jonka johdosta tässä tutkimuksessa keskitytään pääosin koivun kuivaukseen. Diplomityön oheistavoitteena on ollut selvittää uuden kuivausmenetelmän toimintaperiaatteita, ominaisuuksia ja kuivaustutkimuksesta saatuja tuloksia.

HFV-kuivaukseen liittyvät tutkimustulokset, havainnot, päätelmät ja niiden perusteella tehdyt laskelmat perustuvat Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen kuivaustutkimuksiin, joita on tehty aikavälillä 1998 – 2005. Tuona aikana on suoritettu yli 100 koekuivausta, joista suurin osa liittyy tuoreen koivun kuivaukseen.

Kirjallisuustutkimuksessa on käsitelty puun kuivausta, sen yleisiä piirteitä ja eri kuivausvaihtoehtoja. Koivun kuivauksesta ja sen kuivauskustannuksista löytyy varsin vähän julkaistua tutkimustietoa. Tämän vuoksi kuivauskustannuksien kartoitusta on laajennettu koskemaan myös kotimaisia havupuuta, joiden kuivaustutkimusta on tehty Suomessa lehtipuulajeja laajemmin.

## 1.3 TUTKIMUKSEN RAKENNE JA TOTEUTUS

Tutkimus jakautuu kahdeksaan lukuun, joista *ensimmäisessä* määritellään tutkimustehtävä ja -asetelma sekä yksilöidään tutkimuksen rajaukset. *Toisessa* luvussa tarkastellaan puun kuivauksen perusteita, eri kuivaustapoja ja puun kuivauksesta aiheutuneita kustannuksia. *Kolmas* luku käsittelee suurtaajuusalipainetekniikkaa ja koivun HFV-kuivausta. *Neljännessä* luvussa käsitellään yrityskyselyn tuloksia. Luvussa kuvataan yritysten näkökulmaa sorvausaihioiden valmistukseen ja niistä aiheutuneisiin kustannuksiin. *Viidennessä* luvussa selvitetään HFV-kuivauksesta aiheutuneita kuivauskustannuksia neljälle eri tehoiselle kuivaamolle. Kuivauskus-

tannuksista muodostetaan lopputuotteeksi valitulle sorvausaihioille valmistuskustannukset, joita verrataan muilla tavoilla tuotettujen sorvausaihioiden kustannustason. *Kuudennessa* luvussa esitetään HFV-kuivaamoille eri investointivaihtoehtoja, joiden kannattavuutta tarkastellaan investointilaskentamenetelmien avulla. *Seitsemäs* luku sisältää tiivistetyssä muodossa tutkimuksen lähtökohdat, tutkimusasetelman sekä keskeiset tulokset pyöreiden koivuahioiden kuivaustuloksista, valmistuskustannuksista ja investointivaihtoehdoista sekä annetaan suosituksia tutkimusalueen jatkotutkimustarpeista.

## 2 PUUN KUIVAUS

### 2.1 PUUN KUIVAUKSESTA

Kuivauksen tavoitteena on estää tuoreen puutavaran pilaantuminen ja kuivata se käyttökohteen mukaiseen kosteuteen. Ulkoilmassa kuivuminen kestää 1,5 – 6 kk ja kuivaamossa 2 – 12 vuorokautta (Paajanen 1990, s. 6). Erikoiskuivausmenetelmillä kuivausaika voidaan lyhentää jopa muutamiin tunteihin. Keinokuivauksen kuivausajat riippuvat monista seikoista mm. kuivausmenetelmästä, puulajista, sahatavaran koosta sekä lähtö- ja tavoitekosteudesta. Oikein kuivattuna puun lujuusominaisuudet paranevat ja mittojen muutokset pienevät.

Puun kuivauksen kannalta eniten ongelmia tuottaa puun kutistuminen. Puun kuivussa alle puunsyiden kyllästyskosteuden alkaa tapahtua puun kutistumista. Puukappaleen kutistumista ja paisumista kosteuden muuttuessa kutsutaan puun anisotropiaksi. Kutistuminen on riippuvainen puun eri rakennesuunnista. Syiden suuntainen kutistuminen on vähäistä. Tangentiaalinen kutistuminen on voimakkainta ja säteen suuntainen kutistuminen on noin puolet tangentiaalisesta kutistumisesta. Nämä erot johtuvat puuaineksen erilaisista fysikaalisista ominaisuuksista säteen, tangentin ja pituuden suunnassa.

### 2.2 KUIVAUKSEN TEORIAA

#### 2.2.1 Yleinen kuivausteoria

Huokoisen kiinteän kappaleen kuivauksessa pyritään saamaan kappaleen sisäosissa oleva vesi liikkumaan kohti kappaleen pintaa ja siitä edelleen ympäröivään kuivausilmaan. Viime vuosisadan alkuvuosina kuivauslaitteistojen suunnittelun lähtökohtana oli kokemuspohjainen aineisto. Laitteistot suunniteltiin aiemman kokemuksen perusteella eikä kuivumismekanismia vielä tunnettu. Samoihin aikoihin otettiin yleisen kuivausteorian ensi askeleita. Vuosisadan alussa aloitettiin tutkimus huokoisen kiinteän kappaleen kuivumisesta. Tutkimuksissa pyrittiin sel-

vittämään kosteuden liikettä huokoisessa aineessa ja etsimään niitä fysikaalisia lakeja, jotka määräävät tätä liikettä. Huokoisessa aineessa tapahtuvien kosteusliikkeiden lähtökohtana on Fickin laki, joka kuvaa konsentraatioerojen tasaantumista molekyylien lämpöliikkeiden johdosta. Fickin laki voidaan kirjoittaa muotoon

$$F = -D \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

jossa  $F$  = massavuo,  $\text{kg/m}^2$   
 $D$  = diffuusiokerroin,  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $u$  = konsentraatio,  $\text{kg/m}^3$   
 $z$  = paikkakoordinaatti,  $\text{m}$

Fickin kosteusdiffuusioyhtälö (1) ei tässä muodossa ole kovin käyttökelpoinen, mutta se on ollut pohja monipuolisempien yhtälöiden kehityksessä.

Yksiulotteisessa tapauksessa voidaan rajata virtaussuunnassa kahden tason avulla kapea alue. Alueelle tulee kosteusvuo  $F_1$  ja vastaavasti poistuu  $F_2$ , joten konsentraatiomuutokselle saadaan yhtälö:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{z_2 - z_1} (F_1 - F_2) = \frac{1}{z_2 - z_1} [D_2 \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_2 - D_1 \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_1] \quad (2)$$

Tasojen etäisyyttä supistettaessa äärettömän pieneksi saadaan yksiulotteisen tapauksen diffuusioyhtälöksi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Mikäli diffuusiokerroin määritellään riippumattomaksi ajasta ja paikasta saadaan pelkästään kosteusgradienttiin perustuva yhtälö:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4)$$

Luikov esitti oman kuivausteoriansa kirjassaan vuodelta 1966. Teoksessa hän jatkoi kosteuden ilmenemisen huokoisessa kappaleessa erilaisiin faaseihin. Näillä kosteuden eri esiintymismuodoilla on omat siirtomekanisminsa, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Merkittävänä lisäyksenä Fickin teoriaan, Luikov esitti lämpötilan ja kokonaispaineen riippuvuuden kosteuden siirtymiseen. Hän esitti myös kokonaispainegradientin vaikuttavuuden kosteuden liikkeisiin. Luikovin teoria perustuu prosessien termodynamiikkaan, joten siirtomekanismien yksityiskohtaisia piirteitä ei tarvitse tuntea. Luikovin teoria selittää hyvin kaikki kuivausprosessin liittyvät keskeiset ilmiöt, mutta yhtälön ratkaisemiseen tarvittava laskentakapasiteetti oli rajallista vielä 60-luvulla, jonka johdosta yhtälön käyttö muodostui kohtuuttoman työlääksi.

### 2.2.2 Puun kuivausteoria

Puun kuivauksen teoria on seurannut yleisen kuivausteorian kehitystä. Useasti käytössä olevat kuivausteoriat pohjautuvat Fickin lain kaltaisiin yksinkertaisiin ratkaisuihin. Ruotsissa Malmquist on hyödyntänyt Fickin kosteusgradienttiyhtälön lähtökohtia puun kuivauksen mallintamisessa, jota on käytetty esimerkiksi kamarikuivauskaavojen parantamiseen (Salin, 1989, s. 8-9). Ratkaisut eivät kuitenkaan ota huomioon lämpötilan ja sisäisen kokonaispaineen vuorovaikutusta. Näiltä osin olisi käytettävä Luikov-tyyppisiä ratkaisumalleja. Täydellisimpiin kuivausteorioihin voidaan lukea Kayihanin malli, joka perustuu Luikovin teoriaan (Kayihan, 1986, s. 1301-1311). Kayihanin kuivausteoria ottaa huomioon puun kuivaustapah-tumaan liittyvät osaprosessit, joista lisää seuraavassa kappaleessa.

Puu on hygroskooppinen eli vettä imevä aine, joka pystyy sitomaan ilmassa olevaa vesihöyryä. Puukappale saavuttaa tasapainokosteuden tilassa, jonka ilman lämpötila ja kosteus ovat vakioita. Puuhun imeytyvä ja siitä poistuvan vesihöyryn määrä on siis yhtä suuri. Aika missä puuaines saavuttaa tasapainokosteuden riippuu monesta eri tekijästä. Ideaalitalanne puun kuivauksen loppuvaiheessa olisi, että kuivaamon olosuhteet vastaisivat tilaa, jossa puutavara saavuttaisi tasapainokosteuden ja joka olisi sama kuin asetettu tavoitekosteus. Puussa oleva kosteus

esiintyy useana eri olomuotona. Puun kosteuden ylittäessä puunsiiden kyllästymispisteen, josta jatkossa käytetään lyhennettä PSKP on puun soluonteloissa vettä. Tätä vettä kutsutaan vapaaksi vedeksi tai kapilaariseksi vedeksi. Kylläisen soluseinämän kosteus on noin 30 % lämpötilan ollessa 20 °C. Kun puun kosteus on alle PSKP:n on vain puun soluseinämässä vettä. Tätä vettä kutsutaan sidotuksi vedeksi. Lisäksi puun soluonteloissa ja huokosissa voi olla vesihöyryä kostean ilman muodossa. Kaikilla kolmella esiintymismuodolla on omat siirtomekanisminsa, jotka tulisi ottaa huomioon puun kuivausteoriassa. Lisäksi talvikaudella kosteus voi esiintyä jään muodossa. Kuivausprosessissa on jäisen puun sulatus otettava huomioon ja se suoritetaan yleensä erillisenä vaiheena ennen varsinaista kuivausta.

Kaatotuoreessa puussa tai muutoin hyvin kosteassa kappaleessa on vettä kaikissa kolmessa muodossa. Puun kuivuminen alkaa veden haihtumisena. Soluonteloissa oleva vapaa vesi liikkuu kapilaarisesti solusta toiseen, kohti puun pintaosia. Klassisen kuivumisteorian mukaan tuoreen puun kuivuessa vapaa vesi haihtuu puun pinnalta samalla nopeudella kuin vesi haihtuu avoimelta nestepinnalta. Vasta kun kaikki vapaa vesi on poistunut, alkaa sitoutunut vesi poistua soluseinämästä. Soluseinämässä sitoutuneena oleva vesi on kiinnittynyt mikrofibrilleihin osittain fyysisesti ja osittain kemiallisesti. Veden poistaminen puusta vaatii sitä enemmän energiaa, mitä vähemmän sitä on puussa jäljellä, koska loppuvaiheessa poistuvat vesimolekyylit ovat kiinnittyneet vapaisiin OH-ryhmiin.

Sitoutunut vesi siirtyy puussa kolmella eri tavalla:

1. Soluseinämästä vesi höyrystyy soluonteloon, josta se kulkeutuu rengashuokosten kautta toiseen soluun.
2. Soluseinämästä vesi höyrystyy soluonteloon, josta se sitoutuu solun toiseen seinämään, jonka läpi se diffusoituu.
3. Vesi kulkeutuu soluseinämiä pitkin.

Veden kulkeutuminen puussa tapahtuu kaikilla kolmella tavalla yhtäaikaaisesti. Liikkumistapojen suhteellinen merkitys riippuu puun kosteudesta, tilavuuspainos-

ta ja lämpötilasta. Pääosa vedestä kulkeutuu diffusoitumalla soluseinämien läpi (Siimes, 1983, s. 25). Puun kuivumisen jatkuessa veden haihtuminen hidastuu ja puussa oleva vesihöyry alkaa poistua, kunnes puu saavuttaa tasapainokosteuden. Kun puu on saavuttanut tasapainokosteuden, on pinnan vesimolekyylien määrä vakio (Kärkkäinen, 1985, s. 182-183) eli puun kosteus asettuu tasapainoon ympäröivän ilman kosteuden kanssa.

## 2.3 KUIVAUSMENETELMÄT

### 2.3.1 Lautatarhakuivaus

Tarhakuivaus oli 1960-luvulle asti yleisin sahatavaran kuivausmenetelmä. Lautatarhakuivauksessa sahatavara ladotaan ilmavasti tapuleihin siten, että ilmavirta kulkee koko kuorman läpi. Kuivausaika vaihtelee säätilan ja vuodenajan mukaan. Menetelmä on hidas ja kuivausolosuhteita ei voida hallita. Kuivauslaatu on epävarma ja sahatavaran loppukosteus saadaan alimmillaan 18 %:iin. Näiden seikkojen johdosta keinokuivauksen yleistyttyä ei ollut enää tarvetta käyttää lautatarhakuivausta kuin erikoistapauksissa. Puusepänteollisuudessa käytetään kuitenkin yhä lautatarhakuivausta koivun esikuivausvaiheena. Koivulankut kuivataan läpisahattuna tapulissa PSKP:n alapuolelle, jonka jälkeen ne kuivataan eri keinokuivausmenetelmillä tarvittavaan loppukosteuteen. Hidas esikuivaus vähentää kuivausjännityksiä ja vähentää puun värjäytymistä loppukuivauksen yhteydessä.

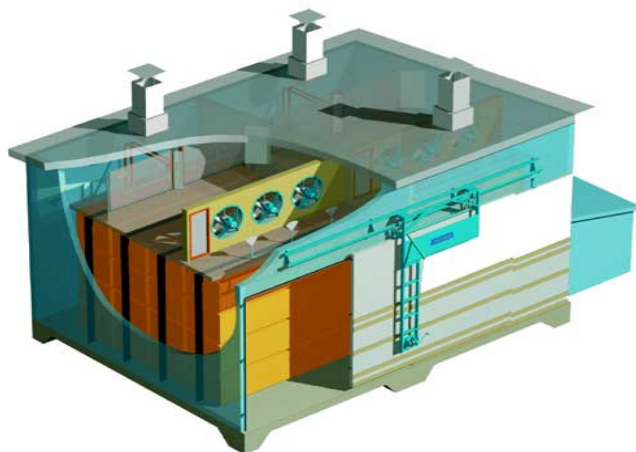
### 2.3.2 Lämminilmakuivaus

Lämminilmakuivaus on yleisin keinokuivausmenetelmä. Siinä ilma, jonka kosteutta ja lämpötilaa säädetään kuivauskaavan mukaisesti, puhalletaan läpi rimoitetun kuivauskuorman. Yleensä lämmönsiirto on toteutettu kuumavesikierrolla ja lämpö tuotetaan lämpökattilalla. Energialähteenä voidaan käyttää öljyä, kaasua tai puujätettä. Pienissä kuivaamoissa voi olla perusteltua käyttää sähköä tarvittavan lämmön tuottamiseen. Ilman kosteutta säädetään ilmanvaihdon avulla ja lisäkosteus tehdä höyryllä tai sumuttamalla vettä lämpimän patteriston läpi. Lämminilma-

kuivaamot voidaan jakaa kahteen pääryhmään niiden toimintatavan perusteella: kertatäyttöisiin ja jatkuvatoimisiin kuivaamoihin (Paajanen, 1990, s.12).

### *Kamarikuivaus*

Kamarikuivaamot kuuluvat toimintaperiaatteiltaan kertatäyttöisiin kuivaamoihin ja ovat puusepänteollisuuden sekä piensahojen yleisin kuivaamotyyppi. Kamarikuivaamot soveltuvat kaikenlaisen puutavaran kuivaukseen, mutta erityisesti pienten erien kuivaukseen ja herkästi halkeavan sahatavaran kuivaukseen. Tiiviiksi rakennettu kamari mahdollistaa sellaisen kuivauskaavan laatimisen, joka ottaa huomioon puutavaran erityisominaisuudet. Kertatäyttöiseen kamarikuivaamoon, kuten kuviossa 1, voidaan sijoittaa yksi tai useampia kuivauskuormia peräkkäin tai rinnakkain. Kamarikuivaamoiden vuotuinen kapasiteetti vaihtelee suuresti riippuen kuivaamokuormien koosta ja määrästä. TekmaWood Oy:n kamarikuivaamoille annettujen ohjeellisten kuivausaikojen mukaan sahatuoreen 50 mm koivun kuivausaika on 480 tuntia tavoitekosteuden ollessa 10 %. Pienellä 10 m<sup>3</sup>:n kamarilla päästään noin 160 m<sup>3</sup> vuosikapasiteettiin, kun taas 150 m<sup>3</sup> kamarilla voidaan päästä 2350 m<sup>3</sup>:n vuosikapasiteettiin (TekmaWood 2003).



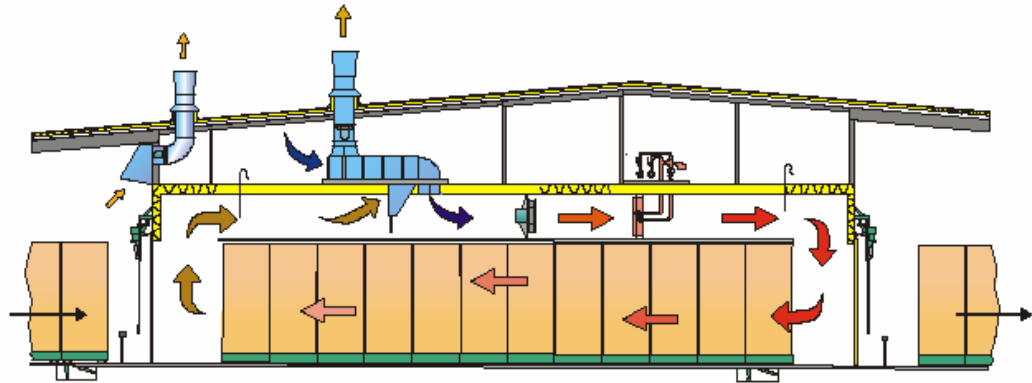
Kuvio 1. Yleiskuva kaksikamarisesta kuivaamosta.

### *Kanavakuivaus*

Vientisahatavaran yleisintä kuivaustapa edustaa 1-vaiheinen kanavakuivaus, jossa kuivaus tapahtuu yhtäjaksoisena prosessina. Rimoitetut puutavarakuormat syöte-



tään tietyllä nopeudella kuvauskanavan alkupäästä sisään ja kuivattu sahatavara-kuorma otetaan kanavan loppupäästä ulos. Ilman kulkusuunta on yleensä kuormien kulkusuuntaa vastaan, kuten kuviosta 2 asia voidaan havaita. Ilman märkälämpötilaa pidetään kuivaamon eri osissa vakiona ja kuivalämpötilaa nostetaan kuormien kulkiessa kohti kuivaamon loppupäätä.



Kuvio 2. Perinteinen 1-vaiheinen kanavakuivaamo.

Perinteisessä 2-vaiheisessa kanavassa ensimmäisen vaiheen ilmankierto on yleensä kuormien kulkusuuntaa vastaan ja toisessa vaiheessa kuormien kulkusuuntaan. Ensimmäisessä vaiheessa viimeksi sisään laitettu kuorma lämpenee hitaasti edellä olevista kuormista haihtuneen kostean ilman avulla. Toisessa vaiheessa pyritään tasaamaan puun sisäiset jännitykset ja haluttu loppukosteus.

OTC-kuivaamossa eli Optimised Two-stage Continuous -kuivaamossa ilma kulkee vastakkaiseen suuntaan kuin edellä mainitussa 2-vaiheisessa kanavakuivaamossa. Ensimmäisessä vaiheessa ilma kulkee kuorman kulkusuuntaan ja toisessa vaiheessa kuorman kulkusuuntaa vastaan, kuten kuviosta 3 voidaan havaita. Puhallussuuntien käännoillä saadaan puun halkeilun kannalta kriittinen alue paremmin hallintaan. OTC-kuivaamo koostuu kahdesta erikseen säädettävästä prosessivaiheesta, joista ensimmäisessä kuivataan nopeasti vapaa vesi pois ja toisessa vaiheessa suoritetaan loppukuivaus haluttuun kosteuteen. Kummallekin vaiheelle voidaan erikseen valita haluttu lämpötilataso, mikä mahdollistaa kuivauskaavojen optimoinnin kullekin sahatavaradimensiolle.



Kuvio 3. OTC-kanavakuivaamo.

Perinteiseen 2-vaihekanavaan verrattuna OTC-kuivaamo tuottaa pienemmät kuivumisjännitykset ja vähemmän kuivaushalkeilua, myös jäännösjännitykset on minimoitu. Lautojen kuivauksessa OTC-kuivaamo takaa tasaisen ja riittävän kuivan lopputuloksen vaihtelevassakin tuotannossa (Forsén & Tarvainen 2003, s. 62-65).

### 2.3.3 Erikoiskuivausmenetelmät

Puun keinokuivausta voidaan suorittaa monella menetelmällä, mutta ne eivät ole saavuttaneet samanlaista suosiota kuin lämminilmakuivauksen eri variaatiot ja tässä mielessä voidaan puhua puun kuivauksen erikoismenetelmistä. Tähän kategoriaan luetaan kuuluvaksi kaikki muut keinokuivausmenetelmät paitsi lämminilmakuivaus, jolla kuivataan valtaosa kotimaisesta sahatavarasta.

#### *Kuumailmakuivaus*

Kuivauslämpötilan ollessa yli veden kiehumispisteen puhutaan kuumakuivauksesta. Kuumakuivaus voidaan jakaa kahteen eri menetelmään: Toisessa käytetään ilmanvaihtoa kuten lämminilmakuivauksessa ja toisessa menetelmässä kuivaus suoritetaan tulistetun höyryn avulla. Kuumakuivauksessa puun väri muuttuu tummemmaksi kuin perinteisissä kuivausmenetelmissä. Kuumakuivauksen kuivauskustannukset ovat pienemmät verrattuna lämminilmakuivaukseen, joka käy selväksi myös kuvioista 10 sivulla 26. Lämminilmakuivaukseen verrattuna kuumakuivaus on huomattavasti nopeampaa. Puutavarasta ja kuivauslämpötilasta

riippuen kuivausaika voi lyhentyä jopa neljäsosaan verrattuna normaalikuivattuun sahatavaraan (Viitaniemi et.all 2000, s. 122). Kuumakuivaus on yleistä USA:ssa, Australiassa ja Itävallassa. Suomessa menetelmää on käytetty mm. hirsien kuivauksessa.

#### *Kondensaatiokuivaus*

Kondensaatiokuivaus eli lauhdekuivaus ei periaatteessa poikkea tavallisesta kamarikuivauksesta. Kondenssikuivauksessa kuivausilmassa oleva kosteus tiivistetään lämpöpumpun höyrystimessä, kun taas lämminilma kuivauksessa kostea ilma päästetään ulos kamarista. Kondensaatiokuivaamot mitoitetaan yleensä niin, että 60 – 70 % poistettavasta kosteudesta kondensoidaan ja loppuosa kosteudesta poistetaan ilmanvaihdon avulla. Kuivausmenetelmällä ei voida hyödyntää yli 50 °C:n lämpötiloja lämpöpumppujen toimintarajoitusten vuoksi. Kondensaatiokuivauksella päästään kamarikuivausta huomattavasti pienempiin energiakulutuksiin, mutta vastaavasti kuivausajat ovat pidempiä. Kuivauslaatu on varovaisen kuivaustavan ja alhaisen lämpötilan vuoksi hyvä. Menetelmä soveltuu hyvin korkealaatuisen puutavaran kuivaukseen varsinkin tapauksissa, joissa puun vaalea väri on ehdoton edellytys.

#### *Vakuumikuivaus*

Alipainekuivausmenetelmät voidaan jakaa lämmön siirtämisen perusteella kolmeen ryhmään: Lämpö voidaan johtaa kuormaan lämpölevyjen kautta, kuuman ilman tai tulistetun höyryn välityksellä. Kosteuden poisto kammioista voidaan suorittaa lauhduttamalla höyry kammion sisällä tai se voidaan imeä kammioista höyryinä ja lauhduttaa kammion ulkopuolella. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa höyryä ei välttämättä tarvitse lauhduttaa, mutta silloin höyryyn sitoutunutta lämpöenergiaa ei saada otettua talteen. Alipainekuivauksen peruseriaatteet ovat samat riippumatta lämmönsiirron ja kosteuden poiston toteutuksista.

Alipaine-kuivauksessa käytetään huomattavasti normaalia ilmanpainetta pienempiä paineita. Tällä saavutetaan se etu, että veden kiehumispiste saadaan normaalia 100 °C:een lämpötilaa alhaisemmaksi. Tätä ilmiötä hyödynnetään alipaine-kuivauksessa, jolloin kuivaus voidaan suorittaa kuumakuivausta alhaisemmissa lämpötiloissa. Puun lämpötila nostetaan kammion alipainetta vastaavan vedenkiehumispisteen yläpuolelle. Kun lämpötila pidetään kiehumispisteen yläpuolella, puun sisäosan ja ulkopinnan välinen paine-ero kasvaa. Puussa oleva vesi kiehuu alhaisessa lämpötilassa ja puun sisälle kehittyvä höyrynpaine edesauttaa kosteuden poistumista puusta. Kosteus siirtyy pääsääntöisesti puun pituussuunnassa ja sen pääolo- muotona on höyry. Yleisesti käytössä olevat paineet ovat välillä 50-350 mbar ja vastaavasti kuivauslämpötilat sijoittuvat välille 30–70 °C. Kuivauslaatu on yleisesti ottaen hyvä ja sahatavaran halkeilu vähäistä. Alipaine-kuivausta käytetään yleensä arvokkaan tai vaikeasti kuivattavan puulaadun kuivaamiseen. Menetelmä soveltuu myös koivusahatavaran kuivaukseen, mutta värivirheet saattavat muodostua ongelmaksi korkeampia lämpötiloja käytettäessä sekä silloin, kun kuivataan tuoretta ja paksua koivusahatavaraa.

#### *Suurtaajuus- ja mikroaaltokuivaus*

Dielektristä kuumennusta on käytetty useiden vuosikymmenien aikana teollisuuden monilla eri aloilla. Tunnetuin sovellus on kuitenkin kotitalouksissa käytetty mikroaaltouuni. Dielektrisen kuumennuksen teoriaa voidaan soveltaa sekä suurtaajuus- että mikroaaltokuivauksessa. Suurtaajuuksia käytettäessä kuivaus tapahtuu elektrodien välisessä kentässä, kun taas mikroaallot johdetaan aaltoputkella suojaattuun kuivaustilaan. Kansainvälisesti on sovittu, että suurtaajuustekniikassa käytettävissä olevat radiotaajuudet ovat 13,56 MHz, 27,12 MHz ja 40,68 MHz. Vastaavasti sallitut mikroaaltotaajuudet ovat 2 450 MHz, 5 800 MHz ja 24 125 MHz.

Puuta kuumennettaessa suurtaajuusenergialla se lämpenee sisältä päin. Lämmitys-teho kohdistuu voimakkaimmin puussa oleviin kosteampiin osiin. Puun lämmetessä sisäosasta pintaa enemmän johtaa se tilanteeseen, jossa vesihöyryn osapaine-

ero kasvaa sisäosan ja pinnan välillä. Puussa oleva kosteus kulkeutuu kohti puun pintaosia. Pintaan siirtynyt vesihöyry voidaan poistaa mm. ilmanvirtauksen tai alipaineen avulla. Dielektrinen kuumennus on yleensä liitetty jonkin muun kuivausmenetelmän yhteyteen, koska suurtaajuusenergian tuottaminen on huomattavan kallista.

Dielektrisessä kuivauksessa suurtaajuusenergia lämmittää kosteampia ja viileämpiä kohtia eniten, joten sillä on kosteutta tasaava vaikutus. Tämän johdosta on mahdollista toteuttaa kuivauslaitteisto, jolla päästään puutavaran tasaiseen loppukosteuteen.

Puun dielektristä kuivausta on tutkittu melkoisesti mahdollisten kuivausmenetelmien kannalta ja puun dielektriset ominaisuudet tunnetaan jo varsin hyvin. Tutkimuksista saatujen tulosten ja käytännön kokemusten perusteella voidaan sanoa, että menetelmällä saavutetaan huomattavia etuja kuivausajan ja laadun suhteen. Merkittävimpänä haittana kuivaustekniikan kehitykselle ja yleistymiselle on sen vaatimat taloudelliset resurssit. Yleisesti ottaen dielektrisen kuivauksen kannattavuus rajoittuu erikoistapauksiin suurten pääoma- ja energiakustannuksien vuoksi.

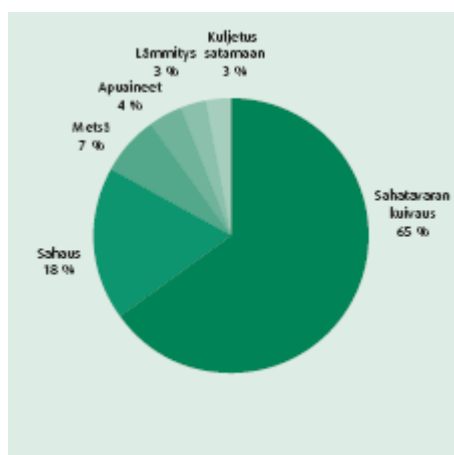
#### *Suurtaajuusalipainekuivaus*

Suurtaajuusalipainekuivaus on nimensä mukaisesti yhdistelmä suurtaajuus- ja alipainekuivausta. Molempien tekniikoiden yhdistäminen on tehnyt mahdolliseksi kuivata puuta lyhyessä ajassa ja hyvin vähäisin kuivausvirhein. Suurtaajuusalipainekuivausta on tutkittu viime vuosikymmenet eri maissa ja maanosissa. Kuivausmenetelmästä on käytössä useita eri nimityksiä ja niiden lyhennelmiä. HFV-kuivaus eli (high frequency vacuum drying) on suomessa käytetty nimitys, kun taas kirjallisuuslähteistä löytyy nimityksiä kuten radio frequency vacuum, jonka lyhennelmiä ovat RFV, RF/V tai Rf-V. Kuivausmenetelmän tarkemmat kuvaukset löytyvät luvusta 3, jossa on käsitelty aihetta koivun kuivauksen näkökulmasta.

## 2.4 PUUN KUIVAUKSESTA AIHEUTUVAT KUSTANNUKSET

Sahatavaran kuivausprosessi on selvästi merkittävin energiankuluttaja sahatavaran valmistusketjussa. Se käyttää sahalaitoksen lämpöenergiasta keskimäärin yli 85 % ja liki 40 % sahan käyttämästä sähköenergiasta (Pellinen 1996, s. 27).

Sahatavaran elinkaaren: metsänkasvatuksen, sahauksen, kuivauksen ja kuljetuksen energiakulutus yhteensä on Suomessa laivauskuivalla sahatavaralla 625 kWh sahatavarakuutiometriä kohden. Energiakulutus johtuu valtaosin sahatavaran kuivauksesta. Kuivauksen osuus laivauskuivan sahatavaran valmistuksessa on 65 %, kuten kuviosta 4 voidaan havaita (Heino 2003, s.6).



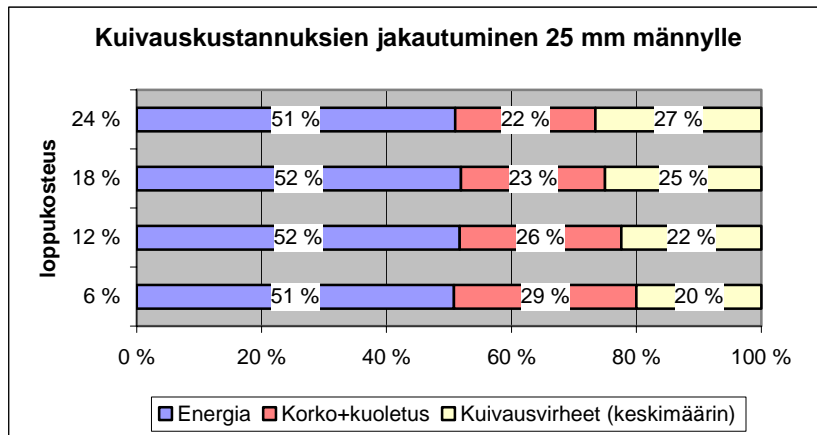
Kuvio 4. Laivauskuivan sahatavaran elinkaaren energiakulutuksen jakauma.

Energiakustannusten lisäksi tärkeimmät kuivauskustannukset muodostuvat pääomakustannuksista ja kuivauslaadun alentumisesta johtuvista sahatavaran arvo-  
muutoksista. Kuivauksen pääomakustannukset voidaan jakaa kuivaamolaitteiston  
pääomakuluihin ja puutavaran pääomakuluihin. Kuivaamon pääomakulut riippu-  
vat valitusta kuivaamotyypistä ja kuivaamon vuotuisesta kuivauskapasiteetista  
kun taas puutavaran pääomakulut riippuvat yksinomaan kuivaamon kuivauskapa-  
siteetista.

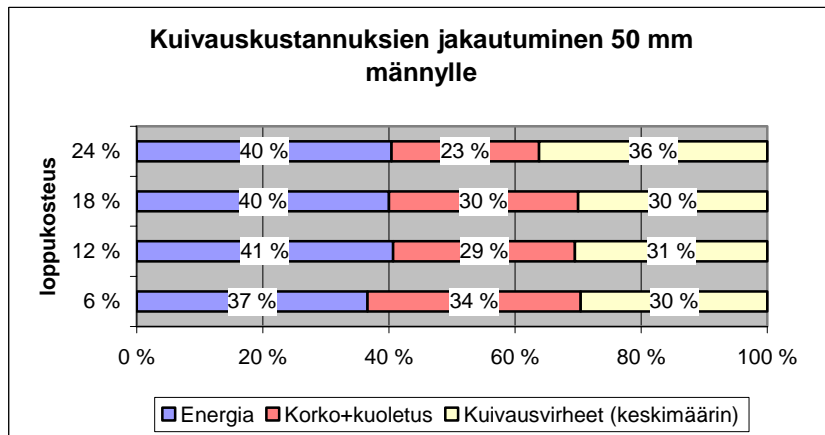
Sahatavaran kuivausvirheistä aiheutuneet kustannukset voivat johtua monista eri syistä ja niiden vähentämiseen voidaan vaikuttaa monin eri keinoin. Parhaimpaan kuivauslaatuun pyrittäessä tulisi ensisijaisesti valita oikea kuivaamotyyppi tietynlaisen puutavaran kuivamiseen sahatavaran tavoitekostekosteus huomioiden ja optimoida käytettävä kuivauskaava kuivausajan ja kuivauslämpötilan suhteen.

Esitettyjä tärkeimpiä kuivauskustannusryhmiä on pyritty valottamaan kolmen eri lähdeaineiston kautta. Kahdessa ensimmäisessä aineistossa on tutkittu kustannusten jakautumista mäntysahatavaran eri dimensioiden suhteen. Ensimmäinen 1990 valmistunut tutkimus käsittelee kustannusten jakautumista vain kamarikuivaamon näkökannalta (Paajanen 1990, s. 9-11). Seuraavaan uudempaan tutkimukseen on valittu mukaan kamarikuivaamon lisäksi myös 1-toiminen kanavakuivaamo ja OTC-kanavakuivaamo (Hukka 2001, s. 1-8). Kolmannen lähdeaineiston osalta, joka käsittelee koivun kuivauskustannuksia, ei voida puhua tutkimuksesta vaan, tulokset ovat Heikki Sonnisen mukaan ohjeellisia ja ne ovat kerätty sekalaisista lähteistä seminaariesitystä varten (Riekkinen 2001, s. 39).

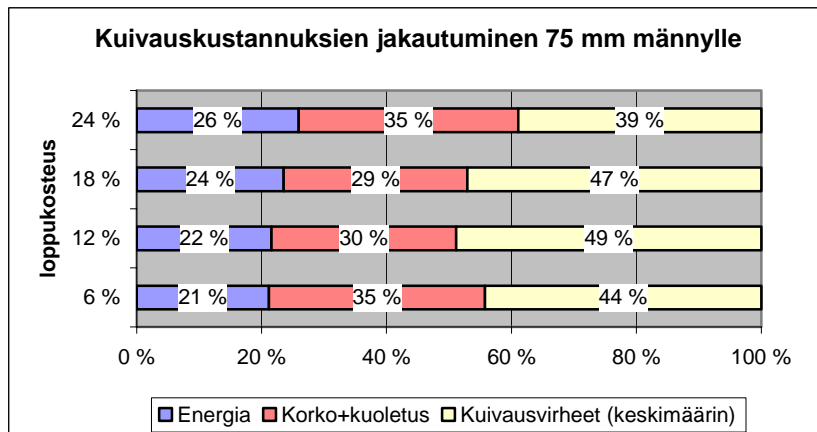
Seuraavissa taulukoissa esitetään kuivauskustannuksien jakautumista yhden puulajin osalta. Esimerkissä kuivaamon vuotuinen kuivauskapasiteetti on 10.000 m<sup>3</sup> ja kuivaamo on tyypillinen kamarikuivaamo. Laadun alentumisesta johtuvat kuivauskustannukset perustuvat VTT:n puulaboratorion keräämän aineistoon, joka pohjautuu useilla suursahoilla suoritettuihin kokeisiin (Paajanen 1990, s. 9-11).



Kuvio 5. 25 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset eri loppukosteuksiin kuitaessa.



Kuvio 6. 50 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset eri loppukosteuksiin kuitaessa.

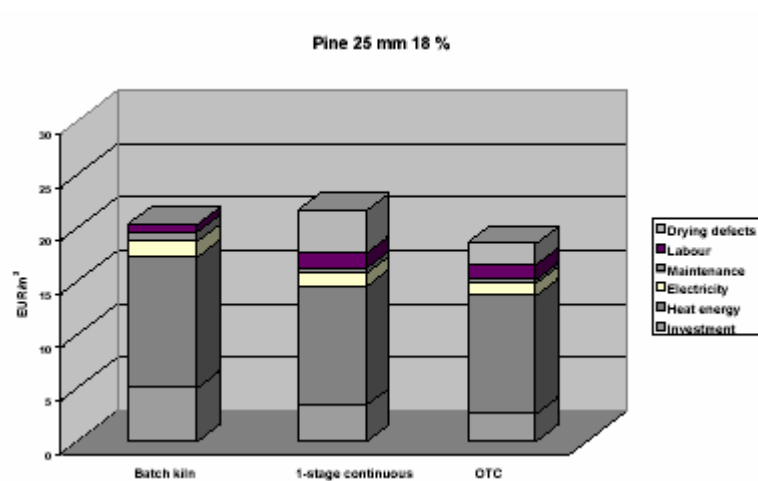


Kuvio 7. 75 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset eri loppukosteuksiin kuitaessa.

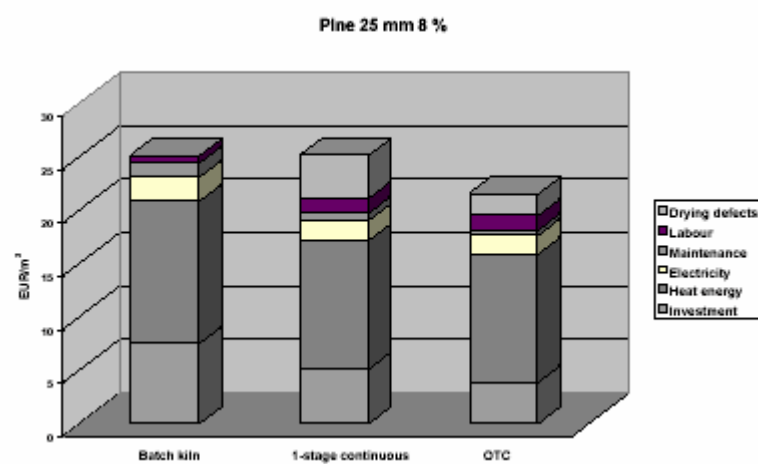


Kustannuksien jakautuminen on muutettu suhteellisiksi osuuksiksi kokonaiskustannuksista, jotta kustannuslajien jakautuminen olisi paremmin havaittavissa eri sahatavaradimensioiden ja niiden loppukosteuksien välillä. Kuvioista 5 ilmenee 25 mm paksuisen mäntysahatavaran kuivausvirheiden liikkuvan välillä 20...27 % sahatavaran kokonaiskuivauskustannuksista, kun taas kuivausvirheiden osuus kasvaa lähes kaksinkertaiseksi 75 mm paksuisen sahatavaran kokonaiskuivauskustannuksista, kuten kuvioista 7 voidaan havaita. Voidaankin sanoa, että mitä paksumpaa ja parempilaatuista sahatavaraa on, sitä suuremmaksi kuivausvirheistä johtuvat kustannukset kasvavat (Paajanen 1990, s. 9-11). Kokonaiskuivauskustannuksiin voidaan parhaiten vaikuttaa kehittämällä kuivaamojen toimintaa ja etsimällä parempia kuivauskaavoja kuivausvirheiden välttämiseksi.

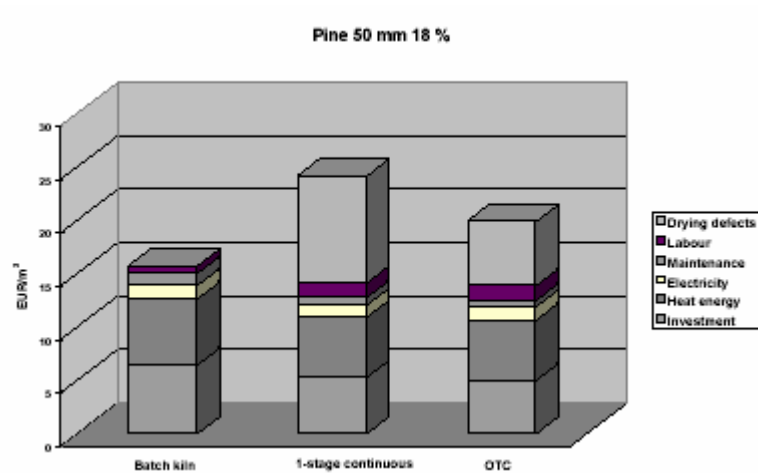
Kuivauskustannuksiin pystytään vaikuttamaan myös investoimalla oikean tyyppiseen kuivauslaitteistoon. Eri kuivaamotyypit poikkeavat toisistaan niin kuivauskapasiteetin kuin kuivauskustannuksienkin osalta. Antti Hukka esitti, Helsingissä vuonna 2001 pidetyssä COST-E15 puun kuivauksen kehittämiskonferenssissä mielenkiintoisen aineiston kuivauskustannuksien jakautumisesta erityyppisillä kuivauslaitteistoilla. Kuvioissa 8-13 on esitetty kuivauskustannuksia kuivattaessa mäntysahatavaraa 18 :n ja 8 %:n loppukosteuteen. Toisena muuttujana tutkimuksessa on käytetty sahatavaran paksuutta, joka vaihtelee välillä 25-75 mm. Lähdeaineisto on koottu kolmesta yleisesti käytössä olevasta kuivaamotyypistä, kamarikuivaamosta, 1-vaiheisesta kanavakuivaamosta ja OTC-kuivaamosta, jotka kaikki soveltuvat laajamittaiseen sahatavaratuotantoon (Hukka 2001, s. 1-8).



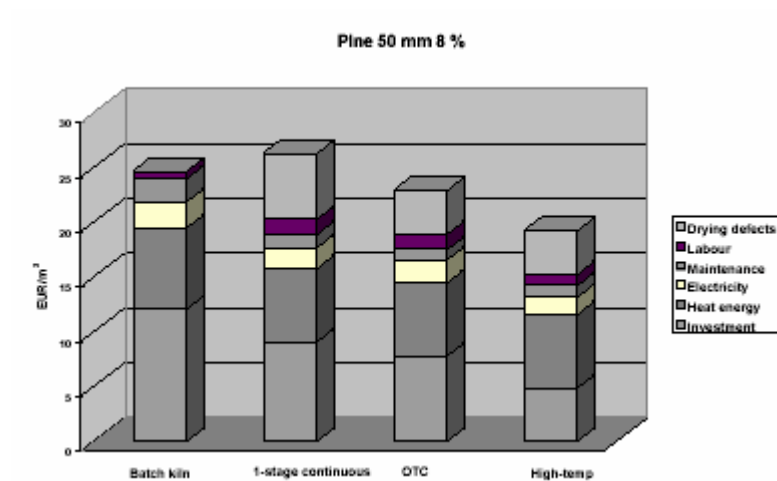
Kuvio 8. 25 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset 18 %:n loppukosteuteen.



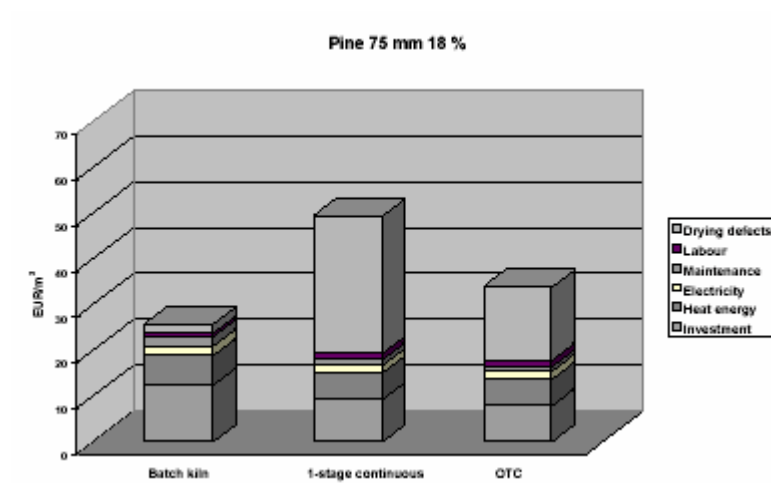
Kuvio 9. 25 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset 8 %:n loppukosteuteen.



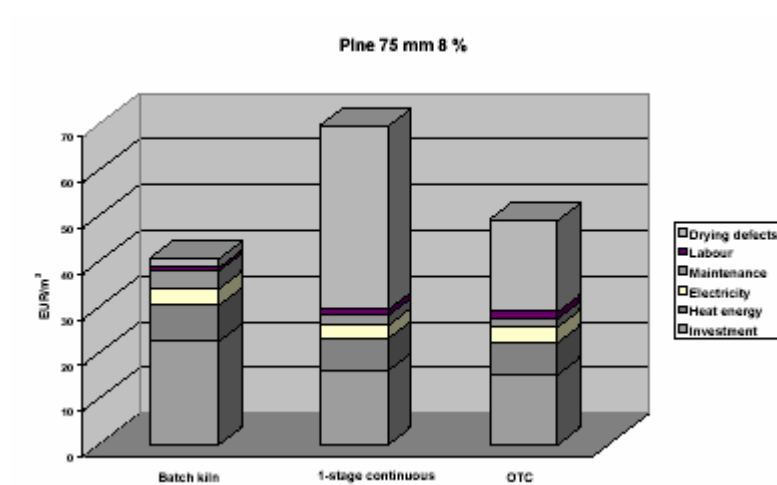
Kuvio 10. 50 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset 18%:n loppukosteuteen.



Kuvio 11. 50 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset 8 %:n loppukosteuteen.



Kuvio 12. 75 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset 18%:n loppukosteuteen.



Kuvio 13. 75 mm mäntysahatavaran kuivauskustannukset 8 %:n loppukosteuteen.

Kamarikuivaamojen kuivauslaatu on parantunut huomattavasti verrattuna Paajasen lähdeaineistoon vuodelta 1990. Tämän aineiston mukaan kamarikuivaamolla kuivausvirheitä näyttäisi syntyvän ainoastaan, kun kuivataan 75 mm:n paksuista mäntyä. Kuivauskustannukset jakautuvat eri kuivaamotyyppien välillä hyvin eritavalla riippuen kuivattavan sahatavaran dimensioista ja tavoiteltavista loppukosteuksista.

Tulokset tukevat vallitsevaa käsitystä, jonka mukaan OTC-kanavakuivaamo on kustannustehokas 50 mm:n ja sitä ohuemman tavaran kuivaamiseksi riippumatta kuivattavan sahatavaran loppukosteudesta. Paksumpia dimensioita voidaan vientikuivata kanavakuivaamoissa, mutta laadullisesti parhaaseen tulokseen päästään kamarikuivaamolla. Paksuinta 75 mm:n mäntysahatavaraa ei kannata kuivata muilla tavoilla kuin kamarikuivaamoilla, sillä kuivausvirhekustannukset nousevat liian korkeiksi muilla menetelmillä. Tulokset osoittivat, että 1-vaiheinen kanavakuivaamo ei ole paras vaihtoehto millään tavarapaksuudella, mutta sen kustannustaso on kohtuullisen lähellä OTC-kuivaamon kuivauskustannuksia ohuemman tavaran vientikuivauksessa, jonka kuivauksessa sitä käytetään yleisesti.

Kotimaisen sahatavaran kuivauskustannuksista on löydettävissä hyvin vähän julkaisuja. Tämän vuoksi esitettyjä tuloksia on tarkasteltava hyvin yleisellä tasolla. Kuivauslaatukustannukset voivat vaihdella hyvin paljon jo yhden kuivaamotyypin sisällä riippuen kuivaamon toiminnasta tai käytettävästä kuivauskaavasta.

Kuivauksen kustannustasoon vaikuttavat kuivaamojen lisäksi sahatavaran paksuus ja loppukosteus. Kuivauskustannuksiin vaikuttaa myös hyvin voimakkaasti kuivattava puulaji. Kotimaisista puulajeista kuusi on helpommin kuivattavissa kuin mänty ja näin ollen sen kuivauskustannukset muodostuvat pienemmiksi kuin männyllä. Koivu on taas vaikeammin kuivattavissa kuin mänty, koska koivun kuivausajat ovat huomattavasti pitempiä ja kuivausvirheiden lisäksi koivun puuainees on altis värimuutoksille. Koivun vuotuiset kuivausmäärät ovat hyvin vähäisiä suhteessa männyn ja kuusen kuivausmääriin, jonka vuoksi kotimainen puunkuivauksen tutkimustoiminta on keskittynyt sahateollisuuden yleisimmin käyttämiin puulajeihin.

Vuonna 2001 järjestettiin seminaaripäivä koivun kuivausmenetelmät 2000-vuosituhannele, jossa koivun kuivauskustannuksia käsiteltiin eri kuivausmenetelmien kannalta. Esimerkkilaskelmassa vuosittainen kuivauskapasiteetti on 10000 m<sup>3</sup> ja kuivaus tapahtuu 60 %:n kosteudesta 10 %:n kosteuteen. Kuvion 14 arvot ovat ohjeellisia ja ne on kerätty sekalaisista lähteistä (Riekkinen 2001, s. 39).

	Lämminilma bioenergia	Lämminilma lauhdutin	Alipaine	Kuuma- kuivaus	HFV	HFV aihiokuivaus
Kuivausaika (h)	288	420	96	24	6	6
Lämpö (eur / kWh)	0,01		0,01	0,01		
Sähkö (eur / kWh)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Lämpö (kWh / m <sup>3</sup> )	340		240	260		
Sähkö (kWh / m <sup>3</sup> )	60	220	50	40	300	300
Energiakustannus yht. (eur / m <sup>3</sup> )	5,89	9,25	4,71	4,54	12,61	6,39
Tarvittava V (m <sup>3</sup> )	360	540	120	30	7,5	4
Kuivaamoinvestointi (eur)	420 470	840 940	1 009 128	252 282	756 846	470 926
Kattilainvestointi (eur)	201 826		201 826	252 282		
Puutavaran pääomakust. (eur / a) (337 eur/m <sup>3</sup> , 6% p.a.)	6 055	10 932	2 355	673	168	168
Kuivaamon pääomakust. (eur / a) (10 a, 6% p.a.)	80 898	109 322	158 097	65 593	98 390	61 389
Pääomakust.yht. (eur / m <sup>3</sup> )	9	12	16	7	10	6
<b>Kuivauskust. yht. (eur / m<sup>3</sup>)</b>	<b>15</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>11</b>	<b>23</b>	<b>13</b>

Kuvio 14. Koivun kuivauskustannuksia eri kuivausmenetelmillä.

Olennaista tässä esityksessä on vertailu koivun kuivauskustannuksista eri kuivausmenetelmillä, vaikka sen lähtötiedot eivät tieteellistä tarkastelua kestäkään, voidaan saatuja tuloksia tarkastella ainakin suuruusluokkatasolla. Esityksessä on käytetty HFV-kuivauksen kustannuksien laskemisessa kahta erilaista lähestymistapaa: Ensimmäisessä laskelmassa on vertailtu HFV-kuivausta tavallisena sahataravakuivauksena, joka mahdollistaa sahataravaran nopean kiertoajan. Toisessa laskelmassa on hyödynnetty HFV-kuivauksen mahdollistamaa ahiokuivausperiaatetta, jolloin kuivattavan puutavaran määrä on huomattavasti pienempi. Tuntematta tarkempia laskentaperusteita HFV-kuivausta koskevien laskelmien osalta on varmempaa olla vertaamalla niitä tässä tutkimuksessa esitettyihin kuivauskustannuksiin.

### 3 KOIVUN HFV-KUIVAUS

Koivu on hyvä raaka-aine kotimaiselle huonekaluteollisuudelle. Kevät- ja kesäpuun tiheys ovat hyvin lähellä toisiaan, joten puuaines on tasalaatuista. Koivua pidetään lujana ja kimmoisana puuna ja sen työstöominaisuudet ovat hyvät. Yhtenä koivun suurimmista eduista huonekalupuuna on sen tasainen vaalea väri. Huonekaluteollisuus on käyttänyt pääasiassa oksatonta tai vähäoksaista koivua, jota saadaan sahattua vain järeästä tukkipuusta. Viime vuosina terveoksaisten koivutuotteiden kysyntä on lisääntynyt. Tämä suuntaus mahdollistaa pieniläpimittaisen koivun jatkojalostuksen myös huonekalupuuksi. Ilmiö on erittäin tervetullut sekä metsänomistajien että huonekaluvalmistajien kannalta. Tähän asti pieniläpimittainen koivu on ollut pääosin selluloosateollisuuden raaka-ainetta. Mahdollisuus hyödyntää harvennushakkuista saatavaa raaka-ainetta on selvä etu sekä saatavuuden että hinnan suhteen. Pieniläpimittaisen koivun hyödyntäminen muulla tavoin kuin selluteollisuuden raaka-aineena tai lämmönlähteenä on alkanut kiinnostaa eri tahoja. Aiheesta on julkaistu muutamia uusia tutkimuksia, joissa käsitellään raaka-aineen jatkojalostusmahdollisuuksia. Raaka-aineen uusi käyttömahdollisuus saattaisi kannustaa metsänomistajia taimikoiden hoitoon ja harvennushakkuihin, joiden toteuttaminen olisi hyvin tärkeää järeän ja laadukkaan tukkiraaka-aineen saamiseksi myös tulevaisuudessa. Tutkimustulosten valossa näyttäisi siltä, että pieniläpimittaisesta koivusta saadaan parhaiten terveoksaista sahatavaraa. Runkojen apterauksessa voidaan sahaukset kohdentaa oksaisiin tukkeihin tavoiteltaessa terveoksaisten sahatavaran suurta osuutta. Pieniläpimittaisen koivun sahauksista tehtyjen päätelmien mukaan järkevänä minimilatvaläpimittana voidaan pitää 100–120 mm:ä (Lindblad, et al., 2003, s. 54-59).

HFV-kuivauksessa rungon läpimitalla ei ole merkitystä kuivausprosessin kannalta, joten kuivauksessa voidaan käyttää huomattavasti pieniläpimittaisempaa puutavaraa kuin mitä sahauksessa käytetään. Tämä saattaisi mahdollistaa molempia osapuolia kannattavan yhteistyökuvion rakentamisen raaka-ainehankintaan, koska HFV-kuivauksessa pystytään hyödyntämään koivusahauksen ulkopuolelle jäävä latvatukki. On vaikea ennustaa miten pieniläpimittaisen koivun sahaus yleistyy,

mutta raaka-ainehankinnasta ei muodostu ongelmaa vaikka raaka-ainehankinnan synergiaetuja ei löytyisi sahateollisuuden kanssa. Metsänhoitoyhdistysten kanssa on mahdollista luoda toimiva raaka-ainehankintaverkosto ja sillä tavoin turvata harvennushakkuista saatava raaka-aine. Nykyinen tilanne koivikoiden harvennushakkuissa Päijät-Hämeessä on sellainen, että riittäviä harvennuksia ei pystytä toteuttamaan, koska harvennushakkuista saatavalle puutavaralle ei löydy ostajia - ei ainakaan hinnalla, joka olisi metsänomistajan kannalta kiinnostava (Lehti 2004).

### 3.1 KUIVAUSTUTKIMUKSEN TAUSTAA JA TAVOITTEET

HFV-kuivauksen tutkimusprojekti käynnistettiin Lahdessa syksyllä 1997, osana EAKR-rahoitteista Puuakatemia-hanketta. Tuolloin oli syntynyt ajatus kehittää kuivausmenetelmä, joka mahdollistaisi kuivuaihioiden loppukuivausaikojen lyhentämisen. Alipainekuivaus mahdollistaa kuivausaikojen lyhentämisen verrattuna perinteisiin kuivausmenetelmiin. Alipainekuivaamoissa yleisesti käytössä olevilla lämmönsiirtotekniikoilla on omat erityispiirteensä, eivätkä ne ole riittävän tehokkaita nopean kuivausajan saavuttamiseksi. Tutkimusprojektin lähtökohdaksi valittiin alipainetekniikka ja lämmönsiirto tultaisiin toteuttamaan dielektrisellä kuumennuksella. Molemmat ovat tunnettuja tekniikoita puuteollisuuden eri alueilta. Alipaineen hyödyntämisestä puun kuivauksessa löytyy mainintoja kirjallisuudesta jo 1930-luvulta Yhdysvalloissa ja Saksassa. Samalta aikakaudelta löytyvät ensimmäiset sovellukset suurtaajuuskuumennuksen hyödyntämisestä puuteollisuudessa, missä sitä käytettiin liimasauman kovetukseen. Vuonna 1945 myönnettiin amerikkalaisille Luthille ja Krupnickille patenti koskien puutavaran kuivausmenetelmää suurtaajuustekniikkaa ja alipainetta hyödyntäen. 1960-luku oli dielektrisen kuumennuksen kulta-aikaa sen kehityksen ja tutkimuksen näkökulmasta katsottuna. Läntisen USA:n ensimmäinen radiotaajuus-alipainekuivaamo rakennettiin 1970-luvulla perustuen Koppelmanin patenttiin. 1980-luvulla tehtiin USA:ssa useita tutkimuksia RFV-kuivauksesta. Tutkimustulokset olivat lupaavia kuivausaikojen ja -laadun suhteen. Lupaavista kuivaustuloksista huolimatta menetelmä ja sen eri sovellukset eivät yleistyneet eivätkä ne ole saavuttaneet kaupallista menestystä. Menetelmää on tutkittu Pohjois-Amerikan lisäksi myös Japa-

nissa (Kobayashi, Miura ja Kwai, 1999) ja Itävallassa (Resch ja Gautsch, 2000) sekä Venäjällä (Djakonov ja Gorjaev, 1981).

British Coloumbian yliopisto aloitti paikallisen metsäteollisuuden kanssa Kanadan liittohallituksen tukeman tutkimusprojektin vuonna 1989 (Avramidis, Zwick, 2001). Professori Stavros Avramidis on julkaissut lukuisia tutkimuksia aiheesta vuodesta 1992 lähtien. Uusimmat tutkimustulokset RFV-kuivaustutkimuksesta Avramidis esitti Helsingissä vuonna 2001 pidetyssä COST-E15 puun kuivauksen kehittämiskonferenssissa. Tämä yli 10 vuoden mittainen tutkimus on edesauttanut RFV-kuivaamojen kaupallisen toiminnan kehittymiseen Kanadan Ontariossa (HeatWave Technologies Inc. 2004) sekä Albertassa (Peace River Timothy Inc. 2004).

Euroopan sahateollisuudessa RFV-laitteistot eivät ole yleistyneet kolmesta erisyystä: laitteistoilla on korkeat investointikustannukset, suurissa kuivaamoissa suurtaajuuskentän hallinta on vaikeaa, mikä aiheuttaa suuria kosteuseroja sekä se, että sähkön hinta on Keski-Euroopassa ja Pohjois-maissa moninkertainen verrattuna esimerkiksi Kanadan hintatasoon.

Lahden ammattikorkeakoulun tutkimusprojektin lähtökohdat poikkeavat suuresti muualla tehdystä tutkimustyöstä. Tutkimusprojektin lähtökohtana oli huonekaluteollisuudessa käytettävien määrämittaisten aihoiden nopea jatkokuivaus ulko-kuivasta lehtipuusta huonekalukuivaksi massiivipuuaihioksi. Tämä toimintatapa mahdollistaa huonekalujen valmistusprosessin muuttamisen perinteisestä tuotantotavasta joustavaan tilauskohtaiseen tuotantomalliin. Raaka-aineen pitkät kuivaus- ja varastointiajat ole enää määräävässä asemassa tuotannosuunnittelun kannalta, vaan uuden kuivausmenetelmän myötä voidaan toimia pienemmillä raaka-aine- ja välivarastoilla. Tämä alentaa raaka-aineen pääomakustannuksia ja mahdollistaa entistä nopeammat toimitusajat sekä joustavamman tuotantomallin.

Aihiokuivauksen yhtenä lähtökohtana oli myös kuivata huonekaluaihioita tuoreesta lehtipuusta sekä kuivata pyöreää esisorvattua koivua. Tästä saatiin lupaavia tuloksia heti ensimmäisistä kuivauksista lähtien. Pyöreän koivun kuivaus osoittau-



tui niin mielenkiintoiseksi tutkimuskohteeksi, että kuivausmenetelmästä ja sen taloudellisista vaikutuksista haluttiin saada lisää tietoa ja käytännön kokemusta.

### 3.2 HFV-KUIVAUKSEN TEKNIKKAA

HFV-kuivauksessa lämpöenergia, jota tarvitaan puussa olevan kosteuden poistamiseksi, siirretään puuhun suurtaajuusenergiana. Tähän tarkoitukseen löytyy markkinoilta suurtaajuusgeneraattoreita aina yhteen megawattiin asti. Käytettävissä olevat luvalliset radiotaajuudet ovat 13,56 MHz, 27,12 MHz ja 40,68 MHz. Tekniikan laitoksen HFV-kuivaamoon valittiin 27,12 MHz:n radiotaajuus riittävän tunkeutumissyvyyden varmistamiseksi. Aallonpituus saadaan laskettua jakamalla valon nopeus käytetyllä taajuudella. Aallonpituudeksi tulee tuolloin 11 metriä, joka on noin 14-kertainen laboratoriokuivaamossa kuivattavan puutavaran pituuteen nähden. RF-kentän voimakkuus pienenee eksponentiaalisesti elektrodin kosketuspinnasta puun sisäosiin päin mentäessä. Valitun taajuuden tunkeutuvuus syvyys kuivauksen loppuvaiheessa on vielä riittävä ja sen merkitys vähenee kuivauksen edistyessä, sillä lämmitysvaiheen jälkeen lämpö siirtyy puussa veri-höyryn välityksellä. Tämän lisäksi suurtaajuusenergia kohdistuu aina kosteimpiin alueisiin, mikä edesauttaa kuorman tasaisen loppukosteuden saavuttamista.

Puuta kuumennettaessa suurtaajuusenergialla siinä olevat ja siihen muodostuneet sähköiset dipolit pyrkivät noudattamaan sähkökentän suunnan vaihteluita ja dipolien liike aiheuttaa kitkaa ympäristön kanssa, joka johtaa materiaalin lämpiämiseen. (Siimes et.all 1986, s. 9). Kun puuaines lämpenee sisäosasta pintaa enemmän, se johtaa tilanteeseen, jossa vesihöyryn osapaine-ero kasvaa sisäosan ja pinnan välillä. Muodostunut lämpötila- ja kosteusgradientti edesauttaa kosteuden nopeaa poistumista. Puussa oleva kosteus kulkeutuu kohti puun pintaosia, josta se poistetaan osittain veden muodossa ja osittain höyrystyneenä vetenä.

Normaalissa ilmanpaineessa veden höyrystymislämpötila on 100 °C ja höyrystymiseen tarvittava energiamäärä on 0,63 kWh/kg. Kun taas 0,10 barin paineessa veden höyrystymislämpötila on noin 45 °C ja tuossa lämpötilassa höyrystämiseen

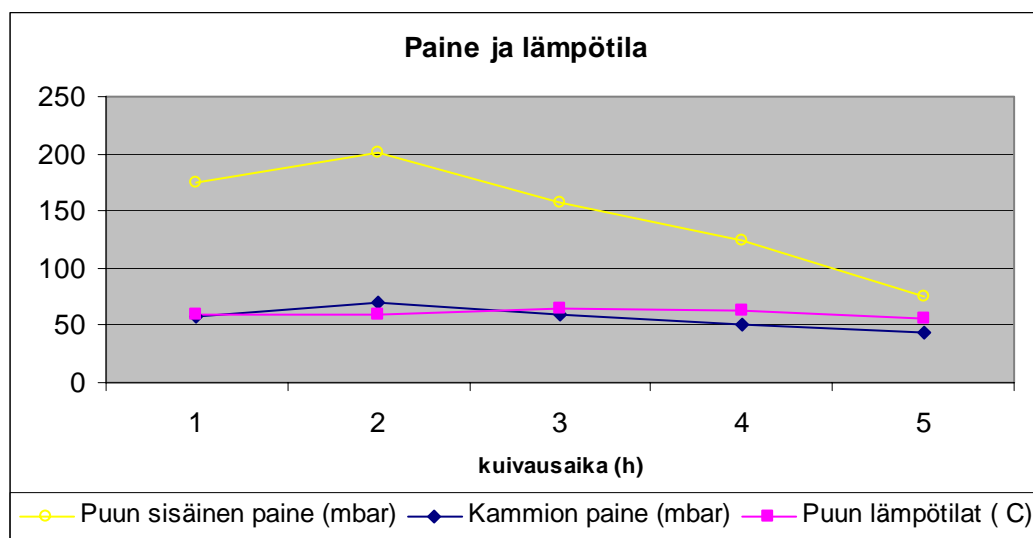
tarvittava energiamäärä on 0,67 kWh/kg. Veden kiehumislämpötilan ja paineen välinen yhteys on ratkaistavissa kaavasta (Siau 1993, s. 75-77)

$$P_o = 8.75 \times 10^7 \text{Exp}\left(-\frac{10400}{RT}\right) \dots\dots 3.2 \quad (5)$$

jossa  $P_o$  on vallitseva paine,  
 $R$  on kaasuvakio 1,987 cal/molK ja  
 $T$  on lämpötila Kelvin-asteikolla

Tämän tutkimuksen koekuivauksissa alipainekammion paineet ovat vaihdelleet välillä 40...80 mbar, jolloin veden kiehumispisteen tulisi pysyä välillä 30...40 °C. Kuten kuvioista 15 voidaan havaita, puun lämpötila on ollut noin 60 °C läpi kuivausprosessin. Tämän johdosta voidaan todeta, että kammion alipaine ei pelkästään määrää veden kiehumispistettä puun sisällä, vaan määrääväksi tekijäksi tulee puun sisäinen paine. H. Resh ja C. Hansmann ovat tutkimuksissaan osoittaneet tehon syötön (W) ja puun sisäisen paineen (mbar) korrelaation. Puun sisäisen paineen suuruus riippuu syötettävän suurtaajuuskentän voimakkuudesta.

Tutkimuksessa havaittiin vastaavia tehon syötön ja puun sisäisen paineen riippuvuussuhteita kuin mitä Resh ja Hansmann ovat esittäneet. Kuivauksen edetessä ja puun kuivuessa höyrynpaine laskee puun sisällä ja puun sisäinen paine lähestyy kammion painetta sitä kuitenkaan tavoittamatta. Kuvion 15 lähteenä ovat olleet aikavälillä 30.5.2002 – 16.4.2003 tehdyt koekuivaukset. Kuvion käyrät esittävät näiden 12 kuivauksen keskiarvoja.



Kuvio 15. HFV-kuivauksen paine- ja lämpötilakäyttäytyminen.

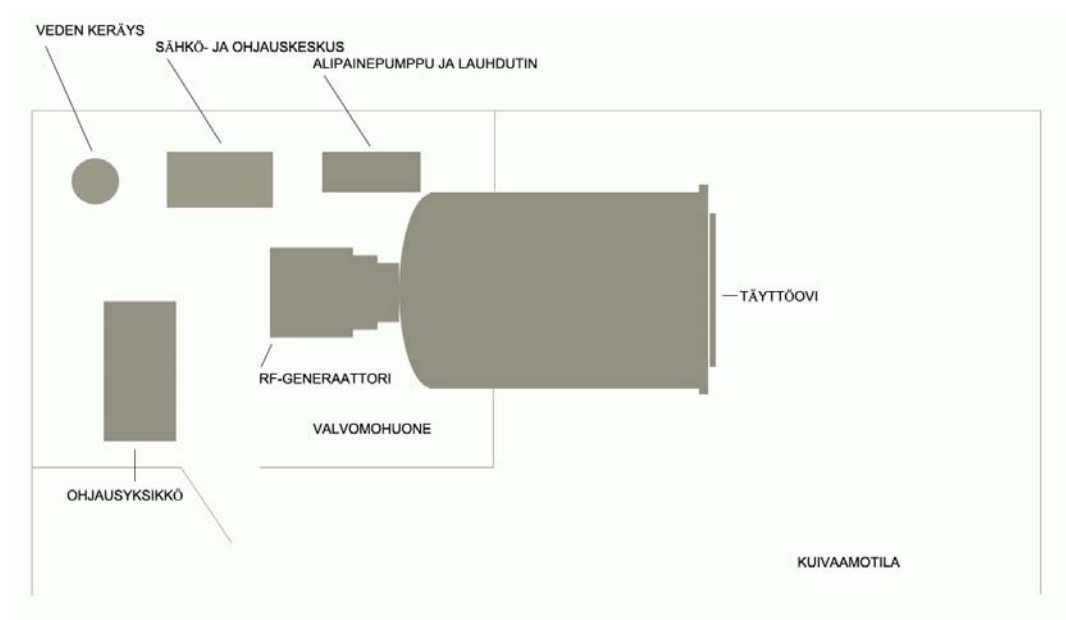
Koekuivauksista saatujen kokemusten ja tutkimustulosten mukaan tuoreen koivun HFV-kuivauksen eräs suurimmista ongelmista on puun lämpötilan hallinta kuivausprosessissa.

### 3.3 LABORATORIOKUIVAAMON MITOITUS JA TOTEUTUS

#### 3.3.1 Kuivaamon rakenne

HFV-kuivaamo koostuu periaatteessa kolmesta toiminnallisesta kokonaisuudesta, joiden sijoittelu selviää kuviosta 16. Ensimmäinen osakokonaisuus koostuu tiiviistä kammion, jonka sisään kuorma sijoitetaan. Alipaine kammion sisälle saadaan aikaiseksi kahdella alipainepumpulla. Alipainekammion vaippa toimii koko pinta-alaltaan suurena kondenssiopintana, sillä kuivaamo sijaitsee tuuletetussa ulkoverastossa. Tämän lisäksi kammion vaippaan on rakennettu vesikiertoinen jäähdytyslementti. Lisäjähdytystä tarvitaan, kun kuivaamo siirretään lämpimiin sisätiloihin. Kammion sisäpinnalle kondensoituva vesi poistetaan kammion alareunan tyhjennyskaivon kautta ja kondensoitumaton vesihöyry poistetaan alipainepumpujen kautta kondensoimalla se kammion ulkopuolella olevassa lauhduttimessa. Toinen HFV-kuivaamon osakokonaisuus koostuu RF-generaattorista, joka sijait-

see kammion välittömässä läheisyydessä. Kammion ja generaattorin välissä sijaitsee napaisuuden vaihtokytkin, jota kääntämällä tietyin aikajaksoin saavutetaan tasainen loppukosteus kuivauskuormassa. Vaihtokytkin on yhdistetty liuskoilla alipainesäiliön läpivientiin, josta RF-teho siirretään alipainesäiliössä sijaitseville elektrodeille, jotka kiristetään molemmin puolin kuivauskuormaa. Kuivaamon kolmas osakokonaisuus pitää sisällään laitteiston ohjausjärjestelmän, joka perustuu ohjelmoitavaan logiikkaan ja antureihin. Kuivausprosessissa syntyvä tiedon keräys sekä valvonta hoidetaan tietokoneen avulla.



Kuvio 16. HFV–kuivaamon periaatekuvio.

Myöhemmin kuivaamoon hankittiin lamellipumpun lisäksi nesterengaspumppu, jonka avulla saatiin kammion alipaine laskettua 80 mbarin paineesta noin 50 mbarin paineeseen. Paineen lasku tarkoittaa veden kiehumislämpötilan laskua 41 asteesta noin 28 asteeseen. Kuten aiemmin todettiin, puuhun sitoutuneen veden kiehumispiste riippuu suurelta osin puun sisäisestä paineesta, joten saavutettu paineen pudotus ei vaikuttanut juurikaan puun kuivauslämpötilaan.

### 3.3.2 Kuivauksen yleinen kulku

1. Kuivauskuorma pinotaan kuormalavalle tai erillisen kuivauskehikon päälle. Pyöreitä koivuaihioita kuivattaessa syysuunnan pitää olla kohtisuorassa tasoelektrodilevyihin nähden, jotta päästään tasaiseen loppukosteuteen riippumatta kappaleen sijainnista.
2. Kuorma punnitaan ja sen tilavuus määritellään mahdollisimman tarkasti.
3. Kuivauskuorma asetetaan alipainekammioon kahden tasoelektrodilevyn väliin. Levyjen etäisyys kuivauskuormasta on välillä 0...3 cm. Kuorman sijainti pyritään saamaan keskelle elektrodilevyjä, mikäli kuorman poikkeileikkauspinta on elektrodilevyä pienempi. Elektrodilevyt yhdistetään pannalla, jolloin generaattorin värähtelypiiri on suljettu.
4. Alipainekammion oven sulkemisen jälkeen voidaan aloittaa generaattorin viritys. Generaattorin sovituspääpiiri on saatava vastaamaan mahdollisimman tarkasti kuorman taajuusaluetta. RF-tehon sovitus on kuivausprosessin aikana itsestään säätyvä, jolloin kuorman lämmitessä RF-teho muuttuu. Kuorman ollessa generaattorille kapasitiivinen anodivirta kasvaa kun kuorma lämpenee ja induktiivisessa kuormitustilanteessa tilanne on päinvastainen eli anodivirta laskee kuorman lämmitessä. HFV-kuivaamon sovitus haetaan hila- ja anodivirran säädöillä kapasitiiviseksi, jolloin tehonsäätöön ei optimitapauksessa tarvitse paljoa puuttua. Kuitenkin tuoreen puun kuivauksessa kuorman kapasitanssi muuttuu merkittävästi kuivauksen edetessä niin, että generaattorin säätövarat tulevat käytettyä lähes loppuun asti. Generaattorin alkuvirityksen jälkeen säätötoimenpiteitä joudutaan tekemään tunnin välein aina kuivauksen loppuun asti.
5. Kuivauksen päättäminen tehdään kuormasta poistetun veden määrän perusteella. Vertailutulos saadaan teoreettisen laskennan avulla, kun tiedetään puutavaran lähtökosteus, tilavuus ja paino. Tarkastelun paikkaansa pitävyys on verrattain hyvä, mikäli kuivauskuormien lähtöarvot on määritetty riittävän tarkasti.

Kevättalvella 2004 suoritetuissa asiakaskuivauksissa havaittiin, että kuivauksen lopetusajankohdan määrittelyssä päästään aivan samaan tarkkuuteen seuraamalla laitteiston energiankulutusta. Tämän kaltainen valvonta on helpompi automatisoida kuin poistetun veden määrän seuranta, mutta se toimii vain tapauksissa, joissa kuormien lähtöarvot ovat toisiaan vastaavat.

### 3.4 KOEKUIVAUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

#### 3.4.1 Tuoreen koivun kuivaus

Koivun kuivaus on erittäin vaikea kaikilla kuivaustavoilla sen värimuutosten vuoksi. Koivun kuivaus tulisi suorittaa alle 50 °C:een, sillä kuivauksen alkuvaiheessa värivirheitä syntyy helposti ja tästä johtuen kuivausajat ovat hyvin pitkiä. Uusimpien tutkimustuloksien mukaan koivun alkukuivausvaihe, joka voidaan rajata PSKP:n yläpuolelle, tulisi suorittaa jopa alle 40 °C:een (Lahtinen 2004). Koivun puuaineksen värimuutoksia kuivausprosessin yhteydessä on tutkittu viime vuosina jonkin verran muun muassa Joensuun yliopistossa. Selkeää syytä värimuutoksen syntymekanismista tai siihen johtavista tekijöistä ei ole saatu selville.

Koska tutkittua tietoa koivun nopeasta kuivauksesta ei ole saatavilla, tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään koivun värimuutoksia lyhyen kuivausajan lähtökohdista. Tarkemmat tutkimustiedot löytyvät luvusta 3.4.6. Esitutkimuksessa kävi ilmi, että 60 °C lämpötilassa selkeitä värimuutoksia tapahtuu jo neljän tunnin jälkeen. Koekuivauksista saadut tulokset olivat yhteneviä testituloksen kanssa. Ensimmäisistä kuivauskokeista lähtien havaittiin puuaineksessa tapahtuneen normaalia poikkeavia värimuutoksia. Kuivauskokeiden edetessä törmättiin selkeisiin värivirheisiin toistuvasti. Kuormasta mitattujen lämpötilojen ja värimuutosten välistä korrelaatiota ei kuitenkaan pystytty löytämään. Koska HFV-kuivaus on selektiivinen, imeytyvät radioaallot kuivattavan puuaineksen kosteimpiin kohtiin. Tästä johtuen saattaa kuivauskuormaan syntyä tehokeskittymiä, joiden lämpötila on mittauspisteestä saatujen tulosten yläpuolella. Koekuivauksissa mitatut lämpötilat ovat liikkuneet välillä 50...60 °C. On hyvin luultavaa, että jossain kuorman

osassa lämpötila on ajoittain niin korkea, että se mahdollistaa puuaineksessa tapahtuvan värimuutoksen. Värimuutosten ennustaminen pelkästään lämpötilaseurannan avulla on mahdotonta, samoin on mahdotonta sanoa, missä kuorman osassa värimuutoksia tapahtuu vai tapahtuuko niitä lainkaan.

HFV-kuivauksessa puun lämpötilaan voidaan vaikuttaa suurtaajuusenergian syöttöteholla, ei niinkään kammion alipaineella. Kuivaustutkimuksen edetessä huomattiin, että syöttötehon rajoituksella ei päästä haluttuun lopputulokseen ilman, että kuivausajat pitenevät huomattavasti, tehtiin se sitten tehonsyötön jaksottamisella tai pienempää syöttötehoa käyttäen.

Tutkimustulosten ja koekuivauksista saatujen kokemusten perusteella päädyttiin vaihtoehtoon, jossa tuore koivu kuivataan niin nopeasti, että puuaineksen värimuutoksia ei ehdi syntyä. Valittu kuivaustapa mahdollistaa suuren vuotuisen kapasiteetin tuoreen koivun kuivauksessa, mutta nostaa kuivaamon hankintahintaa merkittävästi.

Periaatteessa kuivausprosessia on mahdollista nopeuttaa käytetystä neljän tunnin kuivausajasta, mikäli värivirheitä ilmenee vielä joissain olosuhteissa. Esimerkiksi koivun kaatoajankohdalla saattaa olla vaikutusta värimuutoksen reaktioherkkyyteen. Samalla tavoin kuin uusimpien tutkimustulosten perusteella kaatoajankohdalla saattaa olla merkitystä koivun värimuutoksiin perinteisiä kuivausmenetelmiä käytettäessä (Luostarinen et. al., 2001). Tekniset rajoitteet estävät kuitenkin kuivausprosessin nopeuttamisen tämän tutkimuksen laboratoriokuivaamossa. Kuivauksen nopeuttamisella on joka tapauksessa rajansa, sillä liiallinen tehonsyöttö nostaa puun sisäisen paineen yli puun kestävyuden ja puuhun syntyy halkeamia.

#### 3.4.2 HFV-kuivauksen energian kulutus

Puun kuivauksen energiakustannuksilla on merkittävä osuus sahatavaran jalostusketjussa. Tämän vuoksi puun kuivauksen kustannusrakenne ja siihen vaikuttavien tekijöiden tunteminen on tärkeää. HFV-kuivauksessa tarvittava energia tuotetaan

sähköllä eikä siten tavanomaisilla kuivaustavoilla hyödynnettävää lämpöenergiaa voida käyttää kuivausenergian tuottamiseen. Asiassa on kaksi puolta: sähköenergiaa on saatavana kaikkialla mutta toisaalta se on huomattavasti kalliimpaa kuin itse tuotettu lämpöenergia. Kun energiaa siirretään suurtaajuusenergiana suoraan kuormaan, muita häviöitä kuin generaattorin hyötösuhde ei tarvitse ottaa huomioon. Nykyaikaisille RF-generaattoreille valmistajasta riippuen luvataan noin 70 %:n hyötösuhde. Realistiset odotukset generaattorin hyötösuhteesta sijoittuvat 60...70 %:n välille. Generaattorin tehosta riippuen niitä valmistetaan ilmajäähdytteisinä ja suurempia malleja vesijäähdytteisinä. Suurempiin kuivaamolaitteistoihin on mahdollista rakentaa häviöenergian talteenottojärjestelmä ja saada häviölämpö hyödynnettyä esimerkiksi kuivaamotilan lämmityksessä. Tehokkaasta jäähdytyksestä huolimatta generaattorin triodiputki vanhenee kuivausprosessin yhteydessä. Valmistajat antavat niiden kestoiksi 5000-7000 tuntia, mutta käytännössä niiden vaihtoväli on noin 10000 tunnin luokkaa. Putkien hinnat ovat varsin korkeat, karkeasti sanottuna noin 10 % generaattorin uushankintahinnasta. Siksi triodiputken uusimisesta johtuvat kustannukset on otettava huomioon suurtaajuuskuivauksen kustannuksia määriteltäessä.

Muita kuivaustapoja tarkastellessa energiankulutus riippuu hyvin monista tekijöistä, joten tarkkoja lukuja ei ole mahdollista esittää. Kuvioista 17 käy ilmi suuntaa antavia arvoja eri kuivaustapojen energiankulutuksesta (Isomäki, 1999, s. 27).

<b>Alkukosteus 20%, loppukosteus 8%</b>	
Kamarikuivaus	1,4 -1,8 kWh/kg
Kuumakuivaus	0,7 -1,1 kWh/kg
Lauhdekuivaus	0,8 -1,2 kWh/kg
Alipainekuivaus	0,8 -1,2 kWh/kg

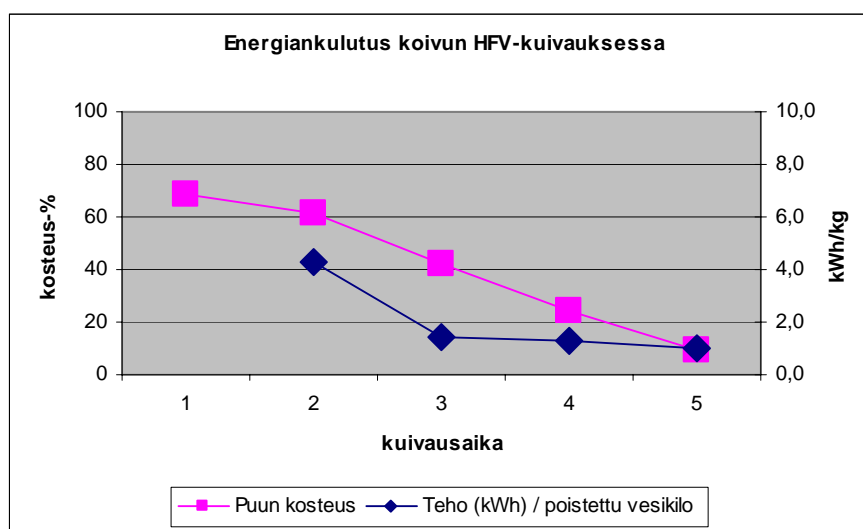
Kuvio 17. Kuivaamojen yleisiä energiankulutuslukemia, energian kulu-  
tus/poistettu vesi.

Esitettyihin kuivaustapoihin verrattuna HFV-kuivaus kuluttaa muita kuivaustapoja enemmän energiaa. Vastaavilla lähtö- ja loppukosteusarvoilla toteutettujen HFV-kuivausten energiakulutukset ovat vaihdelleet välillä 2,1 – 2,3 kWh/kg.



Korkeammista energiakustannuksista huolimatta HFV-kuivaus on hyvin kilpailukykyinen kuivausmenetelmä aihiovalmistuksen kokonaiskustannuksia tarkasteltaessa. HFV-kuivaus tarjoaa myös muita huomattavia etuja aihiovalmistukseen.

Tuoreen koivun kuivauksessa päästään huomattavasti alhaisempiin energiakustannuksiin kuin ulkokuivan puutavaran kuivauksessa. Kuviosta 18 voidaan havaita energiankulutuksen olevan alle 1,5 kWh/kg alkulämmitysvaihetta lukuun ottamatta. Alkulämmitysvaiheen suurempi energiatarve huomioiden saadaan kokonaisenergiankulutukseksi 1,6 kWh/kg.



Kuvio 18. Energiankulutus koivun HFV-kuivauksessa.

Kuivaamon kokonaisenergiankulutus riippuu pääsääntöisesti kuivattavan puutavaran lähtökosteuden ja tavoiteltavan loppukosteuden erotuksesta. Puutavaran haluttu loppukosteus on yleensä alle 10 % ja lähtökosteus koivulla vaihtelee kaatoajankohdasta riippuen 65 %:n ja 95 %:n välillä. Samasta tukista pätkeyillä kappaleilla saattaa olla myös kosteuseroja. Koivulla kosteus kohoaa tyvestä latvaan päin ja alenee ytimestä pintaan päin. Toisena lähtökosteuteen vaikuttavana tekijänä on puutavaran kaatoajankohta. Koivun maksimaalinen kosteus ajoittuu kevääseen ennen puun lehtien puhkeamista (Kärkkäinen, 1985, s. 128). Tämä antaa mahdollisuuden alentaa puutavaran kuivauskustannuksia, mikäli puutavaran hankinta voidaan järjestää talvivarastoinnin avulla siten, että touko-, kesä- ja heinäkuun

aikana raaka-ainetarve saadaan täytettyä varastoidulla puutavaralla. Nämä seikat riippuvat paljon myös puun hankinnan logistisista mahdollisuuksista.

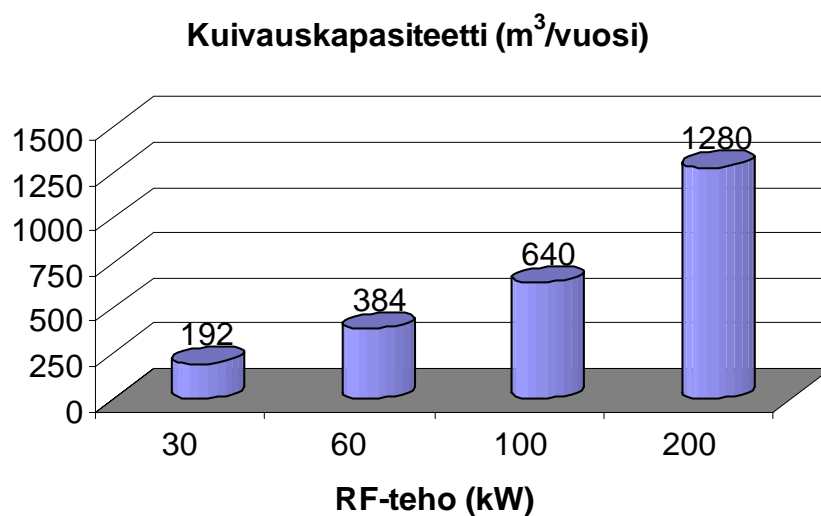
### 3.4.3 Kuivauskapasiteetti

HFV-kuivaamon kapasiteetti riippuu useasta eri tekijästä. Tässä tutkimuksessa kuivausajaksi on määritelty neljä tuntia, joten eri kuivausaikojen vaikutuksia ei ole otettu huomioon kuivauskapasiteettia määriteltäessä. Puutavaran lähtö- ja tavoitekosteuden ohella alipainekammion tilavuus sekä suurimpana vaikuttavana tekijänä RF-generaattorin teho määrittävät HFV-kuivaamon kapasiteetin. Lisäksi kapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä ovat kuivattavan raaka-aineen esityöt eli se, kuivataanko puutavara määrämittaan katkaistuna esisorvattuna sorvausaihiona vai tukista katkaistuna kuorellisena pölkkyinä. Esisorvaus vaikuttaa kuivaamon kapasiteettiin kahdella eri tavalla. Sorvattujen aihoiden tilantarve on pienempi kuin kuoripäällä kuivatuilla rungoilla, joten yhteen kuivauskuormaan mahtuu puuainesta suurempi kiintokuutiomäärä. Samoin yhtä lopputuotetta kohden tarvitsee esisorvattua puuta kuivata puuta pienempi määrä. Edellä mainittujen etujen lisäksi esisorvatut aihiot kuivuvat hieman nopeammin kuin kuoripäällä kuivatut. Se, kannattaako kuoripäällä kuivattua puutavaraa pitää vaihtoehtona esisorvatulle aihiolle, riippuu puutavaran alkutuotantomahdollisuuksista sekä raaka-aineen varastoinnista ja siihen liittyvästä hankintalogistiikasta.

Raaka-aineen säilyminen ilman laho- ja tuholaisvaurioita on huomattavasti varmempaa, kun sen varastointi järjestetään mahdollisimman pitkänä tukkina. Puutavara tulee sahata ja esisorvata määrämittaan vasta juuri ennen kuivausta, mikäli sille ei ole järjestetty puskurivarastointia hallituissa olosuhteissa. Muussa tapauksessa puutavaraan pintaosa ja päädyt pääsevät kuivumaan ja niihin voi muodostua mikrohalkeamia, jotka saattavat laajentua kuivausprosessissa silmin havaittaviksi halkeamiksi.

Tutkimuksessa esitetyt kapasiteetilaskelmat perustuvat Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen laboratoriokuivaamolla tehtyihin koekuivauksiin. Saa-

tujen koekuivaustulosten perusteella voidaan määrittää HFV-kuivaamon vuotuinen kuivauskapasiteetti, koska laitteiston teknisiä ratkaisuja ei tarvitse muuttaa siirryttäessä teholuokassa suurempiin laitteistoihin. Laskelmassa oletetaan tuotantolaitteistolla pystyttävän kuivaamaan yhdessä työvuorossa kaksi kuivauserää, joten kahden työvuoron aikana kuivataan neljä kuivauserää. Kuvion 19 kapasiteetilaskennassa on käytetty 240 kuivauspäivää, johon voidaan sisällyttää huolto- ja kehitysaikoja laskennallisen vuosikapasiteetin niistä kärsimättä.



Kuvio 19. HFV-kuivaamon vuotuinen kuivauskapasiteetti eri tehovaihtoehdoilla.

#### 3.4.4 HFV-kuivauksen laatu

Puun tilavuus pienenee sen kuivuessa, kutistuminen alkaa puun syiden kyllästymispistettä vastaavassa puun kosteudessa ja jatkuu lähes lineaarisesti tavoitekosteuteen asti. Perinteisillä kuivaustavoilla tämä ominaisuus nousee useasti kuivauskaavan laadinnassa määrääväan asemaan, tai ainakin sen pitäisi, mikäli tavoitteena on kuivata korkealaatuista puutavaraa. Jos puu kuivuu nopeasti, pintaosaan syntyvä vetojännitys aiheuttaa puun sisäosaan puristusjännityksen. Puu kestää ilman vaurioita jonkin verran kuormitusta. Mikäli voimat kasvavat suuriksi, kutistumisesta johtuvat vetojännitykset venyttävät pintaa pysyvästi ja jos pinta ei kykene venymään syntyy puun pintaan halkeamia. Kuivauksen loppuvaiheessa, puun pintaosan ja sisäosan kosteuserojen tasaannuttua, kääntyvät jännitykset

päinvastaisiksi, mikä aiheuttaa puun sisäosiin halkeamia. Pinnan kuivumisesta aiheutuvat kuivausvirheet ovat varsin haitallisia puutavaran jatkojalostuksen kannalta. Kuivauskaavojen huolellisella suunnittelulla voidaan näitä kuivausvirheitä vähentää, mutta niitä ei voida poistaa kokonaan.

HFV-kuivaus poikkeaa perinteisistä kuivaustavoista siinä, että kuivumisprosessin aikana puun pintaosa ei kuivu puun sisäosia enempää. Koska kuivaus on selektiivinen, imeytyvät radioaallot kuivattavan kappaleen kosteimpiin ja viileimpiin alueisiin. Suurtaajuusenergian suurin tehotiheys kohdistuu jatkuvasti uuteen kohteeseen ja tällä on selkeä kosteusgradienttia tasaava vaikutus. Tämä yhdessä koivun anisotropian kanssa selittää, miksi HFV-kuivatussa koivussa ei juuri esiinny pintakovuutta eikä pinta- tai sisähalkemia. Lisää tutkimustietoa HFV-kuivatun koivun ominaisuuksista löytyy Lassi Ahon vuonna 2000 valmistuneesta insinööri-työstä, jossa on tutkittu materiaalin lujuutta ja kosteuselämistä sekä muita ominaisuuksia.

HFV-kuivaus ei tummenna koivun väriä kuten perinteiset kuivausmenetelmät. Kun lopputuotteelta vaaditaan kaunista ja vaaleaa pinnan struktuuria, voidaan se toteuttaa ilman pintakäsittelyaineeseen sekoitettua vaaleaa pigmenttiä. Toisaalta tuotteisiin, joissa käytetään myös muilla kuivaustavoilla tuotettuja komponentteja, saattaa tästä ominaisuudesta muodostua haittatekijä.

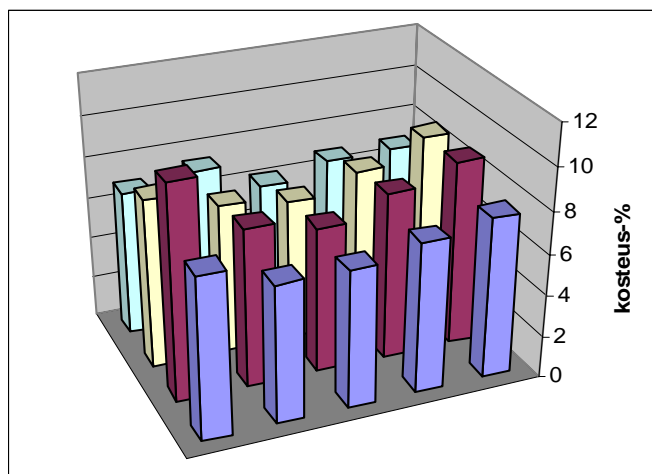
Kuivatun puutavaran tasainen loppukosteus on erittäin tärkeä kuivauslaadun kriteeri. Puukappaleen kosteuden tulisi olla mahdollisimman tasainen eikä kuivattujen kappaleiden välisiä eroja saisi esiintyä. Loppukosteuden vaihtelurajat ovat määritelty yleisesti käytössä olevassa European Drying Groupin (EDG) kuivauslaatusuosituksissa. EDG luokittelee kuivatun sahatavaran seuraavasti. Tavoitekos-teudet ovat 18 %, 14 % ja 10 %, jotka on jaettu kolmeen laatuluokkaan. Näissä kuivauslaatuluokissa S (standard), Q (quality dried) ja E (exclusive) sallitaan määritellyt kosteusmittauspoikkeamat tavoitekos-teudesta (Welling, 1994). Kuivauslaatusuositusten lisäksi käytetään asiakaskohtaisia sopimuksia kuivauslaadun kriteereistä, varsinkin parketti- ja liimalevyteollisuuden kuivauslaatukriteerit ovat

hyvin tiukat. Lopputuotteissa, joissa liitostekniikkana käytetään liimausta, on puutavaran loppukosteuden oltava hyvin tarkasti kontrollissa, sillä yhdenkin poikkeavan kosteuden omaavan kappaleen pääsy tuotantoprosessiin saattaa pilata koko tuotteen.

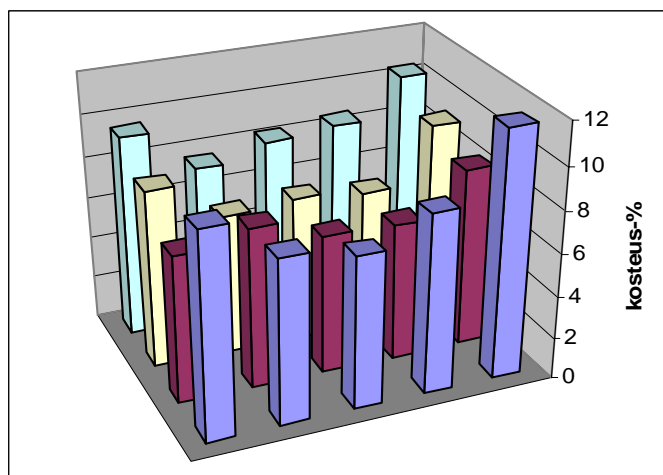
Pyöreän tuoreen koivun HFV-kuivauksen tavoitekosteuden tarkkuutta tarkastellessa päästään EDG:n kriteerien mukaan parhaimpaan E-luokkaan. Tarkempia tuloksia tarkastellessa esimerkkitapauksessa on otettu tutkittavaksi kaikki kuivauskuorman kappaleet. Kosteusmittauksissa on käytetty puun sähkövastukseen perustuvaa piikkimittaria. Mittaussyvyytensä on käytetty 30 mm ja kosteuslukemat on selvitetty kappaleen keskeltä ja molemmista päistä. Koekuivauksissa on haluttu saada loppukosteushajonnan lisäksi selvyys suurtaajuuskentän tasaisuudesta. Tämän vuoksi kuivattavat koivuaihiot on asennettu kuivauskehikkoon, jolla saadaan kuorma jaettua tasaisesti koko elektrodin pinta-alalle. Kappaleiden sijoitusmenettely käy selväksi kuvioista 20 ja mittaustulokset kuvioista 21-23. Kosteusmittaustuloksien esityksissä on käytetty samaa sijoitusmenettelyä.



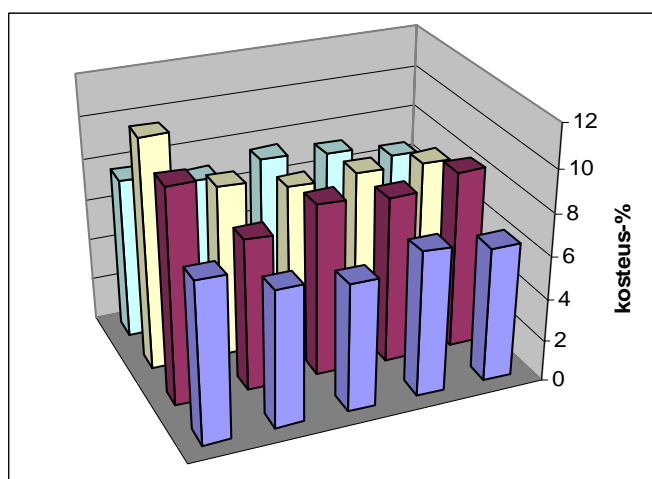
Kuvio 20. Koekuivauskuorma kosteushajonnan selvittämiseksi ennen kuivauskammioon siirtoa.



Kuvio 21. Kosteushajonnan mittaustulokset kappaleiden vasemmasta päästä.



Kuvio 22. Kosteushajonnan mittaustulokset kappaleiden keskeltä.



Kuvio 23. Kosteushajonnan mittaustulokset kappaleiden oikeasta päästä.

Kuten näistä tuloksista voidaan päätellä, on suurtaajuuskenttä kohtuullisen tasainen koko sen pinta-alan vaikutusalueella. Tarkasteltaessa koekappaleiden pituus-suuntaista kosteusgradienttia nähdään kohtuullisen suuria kappalekohtaisia eroja. Normaalikuivauksissa kappalekohtaisten erojen suuruus on esitettyjä tuloksia pienempi. Tämä saattaa selittyä sillä, että normaalissa kuivausprosessissa kappaleet ovat koko pituudeltaan kontaktissa viereisiin kappaleisiin ja suurtaajuuskenttä voi ohjautua suuremman kosteuden omaaviin kohtiin myös poikittaisessa suunnassa. HFV-kuivauksissa tasaisen loppukosteuden saavuttamiseksi onkin suositeltavaa kuivata puutavara aina tavoitekosteutta alhaisemmalle tasolle varsinkin kohteissa, joissa vaaditaan hyvin tasaista loppukosteutta.

Kevättalvella 2004 suoritettujen koekuivauksien yhteydessä havaittiin, että joissakin esisorvatuissa kuivauserissä ilmeni sisähälkeamia kun taas vertailukuivauksissa olleista esisorvaamattomissa aihioissa hälkeamia ei esiintynyt. Tämä on ensimmäinen kerta tämän tutkimuksen aikana, kun tuoreen koivun kuivauksissa on törmätty vastaaviin kuivausvirheisiin. Tarkemmat selvitykset sisähälkeamien synnystä puuttuvat, mutta ne saattavat liittyä pinnan kuivumisesta aiheutuneisiin mikrohalkeamiin. Toinen selitys hälkeamien synnylle voi olla kuivausprosessin aikana syntynyt puun sisäisen paineen nousu yli puuaineksen kestäkyvyn, joka voi ilmetä paineen purkautumiskanavana aihion kyljessä.

#### 3.4.5 Asiakaskuivaukset

Aikavälillä 15.1 – 6.5.2004 suoritettiin yli kaksikymmentä koekuivausta kaato-tuoreella pyöreällä koivulla. Ensimmäinen toimituserä, kuivaukset 1–9 kuivattiin kuorimattomina. Kuivaukset sijoittuivat tammi-helmikuun vaihteeseen, jolloin puussa oleva vesi on jäätyneessä tilassa. Puita ei sulatettu ennen koekuivauksia, jonka johdosta kuivausajat olivat huomattavasti pidempiä kuin myöhemmin keväällä suoritetuissa kuivauksissa.

Toisen toimituserän puut voidaan jakaa kolmeen ryhmään, joista kuivaukset 10–14 oli sorvattu 120 mm:n aihioiksi asiakkaan toimesta. Kuivaukset 15–17 suoritet-

tiin noin kuukauden kuluttua toimituksesta. Tämä erä sorvattiin pyöreiksi aihioiksi Tekniikan laitoksen viilusorvilla ennen kuivausta. Kuivaukset 18–22 kuivattiin vastaavasti kuin kuivaukset 1–9 eli puutavaralle ei tehty esisorvausta. Puutavaran säilytyspaikkana ennen kuivauksia oli tuuletettu ulkovarasto. Puutavaran varastointikehikot oli peitetty muovikalvoilla, joilla estettiin puutavaran enneaikainen kuivuminen ja päätyhalkeamien syntyminen.

Energian kulutuksen suhteen kaikki kuivaukset olivat yhteneväisiä. Yhden vesilitran haihduttamiseen käytetty energiamäärä vaihteli kaikissa kuivauksissa välillä 1,5–1,6 kWh. Toisen toimituserän kuivausajat vaihtelivat 4–4,5 tunnin välillä, kun taas ensimmäisen toimituserän kuivausajat olivat 1–1,5 tuntia pidempiä, joka johtui jäätyneestä puutavarasta.

Kuivumisprosessin kannalta on sama, kuivataanko puut esisorvattuina tai vain määrämittaan katkaistuna. Puutavaran jatkojalostuksen kannalta on kuitenkin taloudellisempaa suorittaa esisorvaus ennen kuivausta, jolloin kuivataan vain tarvittava puutavara työstövaroineen. Lisäksi puutavara voidaan esilajitella sekä poistaa siitä esisorvauksen jälkeen esille tulleet laatupoikkeamat. Jäätyneen puutavaran kuivausta ei voi suositella kentän epävakaisuuden vuoksi eikä siitä johtuvan kuivauskapasiteetin pienentymisen takia. Puutavara on syytä sulattaa ennen kuivausprosessin aloittamista.

Esisorvausjäte ja hylätyt kappaleet voidaan toimittaa paperiteollisuuden raaka-aineeksi, jolloin raaka-aineeseen sitoutunut pääoma saadaan lähes kokonaisuudessa takaisin. Tämä riippuu tietysti siitä, paljonko tätä sivutuotetta suunnitellussa liiketoiminnassa kertyy. Toinen edellytys sivutuotteen taloudelliselle hyödyntämiselle on etäisyys lähimpään selluloosateollisuuden raaka-aineen vastaanottopisteeseen.

Osalle kuivatuista aihioista (15 kpl) suoritettiin lämpökäsittely. Aihiot kerättiin satunnaisesti eri kuivauseristä. Lämpökäsittelykaavana käytettiin tunnettua koirulle laadittua lämpökäsittelykaavaa. Lämpökäsittely suoritettiin 193 °C:n lämpö-



tilassa, 120 minuutin aikajaksona. Lämpökäsittelylaatu oli tasainen eikä näkyviä halkeamia havaittu kuin yhdessä kappaleessa. Halkaistun kappaleen tarkastelu vahvisti havainnot, väri oli tasainen myös kappaleen halkaisupinnoilla.

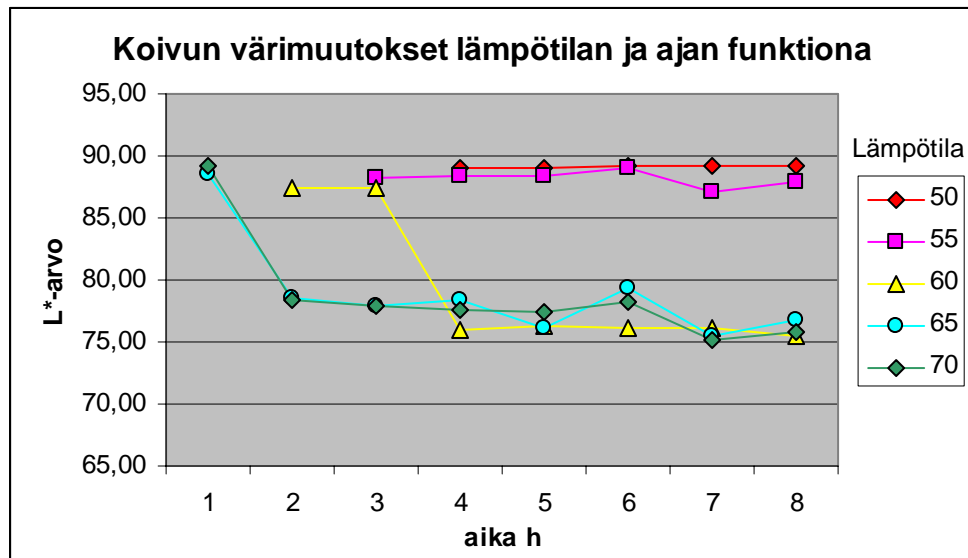
#### 3.4.6 Tuoreen koivun värimuutoksen esitutkimus

Ensimmäisissä kuivauskokeissa havaittiin selviä tummentumia koivun värissä. Silmin havaittavia värivirheitä esiintyi sekä mitallistetuissa aihioissa että pyöreissä koivurungoissa. Pyöreissä rungoissa värivirheet sijoituivat puun sydänosan alueelle mutta pintaosissa värimuutoksia ei havaittu. Aihioissa värivirheiden sijainti oli sattumanvaraista ja yleensä ne sijaitsivat kappaleiden päissä. Värimuutosten satunnainen sijainti johtuu RF-kenttään muodostuneista ”kuumista alueista”, joiden lämpötila on korkeampi kuin viereisissä kappaleissa tai saman kappaleen pintaosissa. Tämän kaltainen käyttäytyminen on RF-kentälle ominaista. Kenttä hakeutuu johtavan materiaalin osiin, joissa kosteus ja lämpötila ovat kulloinkin muuta ympäristöä korkeampia.

Aikaisempaa tutkimustietoa koivun värjäytymisestä nopeassa kuivauksessa ei ole olemassa. Oli siis kehitettävä menetelmä, jolla ilmiötä voidaan tutkia tarkemmin. Käytössä oli muutaman asteen tarkkuudella säädettävä lämpökaappi, jonka suhteellinen ilmankosteus nostettiin niin korkeaksi, että puun kuivumista tutkimuksen aikana ei tapahtunut. Koekappaleet oli työstetty kaatotuoreesta koivusta, joka oli kaadettu tutkimusta edeltävänä viikkona. Koekappaleiden sivuun porattiin reikä siten, että se asettui kappaleen keskelle. Reiän syvyys oli mitoitettu keskelle kappaletta. Termoelementin sijainti oli siis kappaleen keskellä korkeus- ja leveys-suunnassa. Tällä tavoin varmistuttiin siitä, että koko kappaleen lämpötila oli taantunut lämpökaapin asetearvoihin.

Kappaleiden värimuutos mitattiin elektronisella valokennomittarilla, Minolta CR200:lla. Mittari ilmoittaa pinnan värimuutoksen erityisillä värikoordinaateilla L (vaaleus), a\* (punaisuus), b\* (keltaisuus), jotka sijaitsevat pallokoordinaatistossa. L saa arvot 0 ... 100 (täysin tumma ... täysin vaalea). Arvon a\* asteikko on -100

(vihreä) ... +100 (punainen) ja arvon  $b^*$  -100 (sininen) ... +100 (keltainen). Väriin muutoksia voidaan tarkastella kunkin tekijän osalta erikseen tai voidaan laskea kokonaisvärieromuutos  $\Delta E$ , joka on kahden väriavaruuden vektorin erotusvektorin pituus. Tässä tutkimuksessa tuloksia on tarkasteltu pinnan vaaleuden/tummuuden kannalta. Kuviossa 24  $L^*$ -arvo saa sitä pienemmän arvon mitä tummemmaksi puuaines on muuttunut. Tulokset on esitetty graafisessa muodossa ja niiden arvioinnissa auttaa tieto siitä, että ihmissilmä kykenee erottamaan yli 3 yksikön väriarvomutokset.



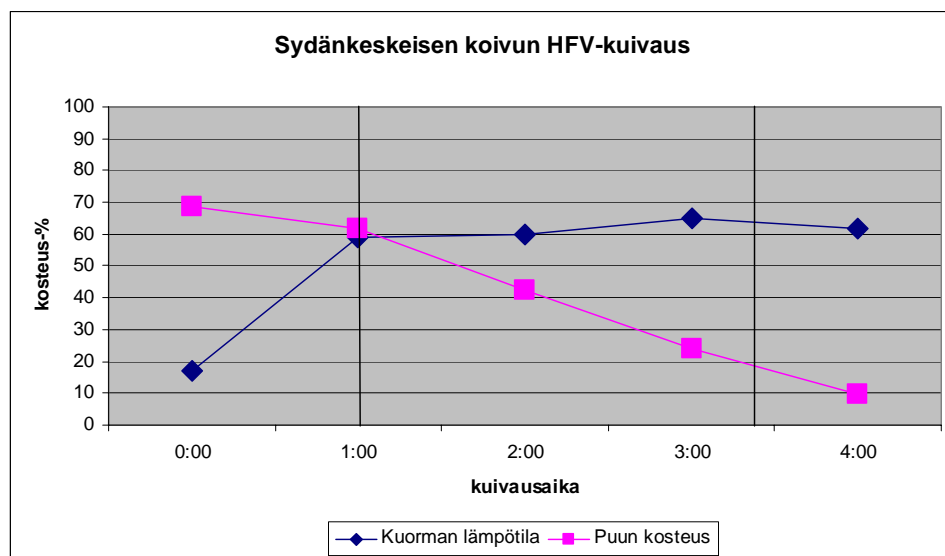
Kuvio 24. Koesarjat 1 - 5 lämpötiloissa 50–70 °C

Värimuutoksia seurattiin tunnin välein siten, että koekappaleet poistettiin lämpökaapista testausajan tultua täyteen ja värimuutokset määriteltiin valokennomittarilla. Kuten kuvioista 24 havaitaan, 50 °C:n lämpötilassa värimuutoksia ei tapahtunut 8 tunnin aikana. Lämpötilan ollessa 60 °C värimuutoksia havaittiin kolmen tunnin jälkeen ja yli 60 °C:n lämpötiloissa ensimmäisen tunnin jälkeen. Värimuutokset olivat voimakkaita ja mielenkiintoista oli havaita, miten tasainen väri kaikissa koekappaleissa oli värimuutoksen tapahduttua.

Tutkimuksessa tehty koesarja auttoi hahmottamaan riittävän tarkasti lämpötila-alueen, jossa silmin havaittavat värimuutokset tapahtuvat. Kokeessa tutkittavat

muuttujat olivat lämpötila ja aika. Ilman suhteellinen kosteus, hapen määrä kuivausilmassa ja kuivausympäristön vallitseva ilmanpaine rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle, koska testausolosuhteet olisivat tuolloin olleet vaikeasti luotavissa.

Saatujen tutkimustulosten valossa laadukkaan vaalean koivun kuivaus onnistuu, mikäli puun lämpötila ei kuivausprosessissa ylitä 60 °C:a. Toiseksi rajaehdoksi tutkimustuloksien mukaan muodostuu kuivausaika. Pääsääntöisesti koivun värimuutokset tapahtuvat PSKP:n yläpuolella, joten kuivaus on suoritettava mahdollisimman nopeasti. Koekuivaamon tekniset rajoitteet huomioiden testikuivauksien tavoiteajaksi asetettiin 4 tuntia. Värimuutoksille altistava aika alkaa siitä, kun puun lämpötila nousee 60 °C:een lämpötilaan ja värimuutoksen riski alenee sen jälkeen, kun puun tasapainokosteus on laskenut alle PSKP:n.



Kuvio 25. Värimuutoksien riskivyöhykke koivun HFV-kuivauksessa.

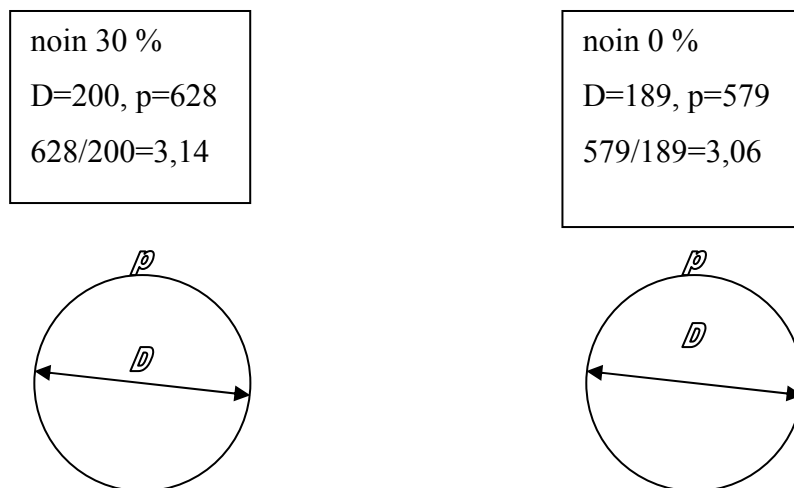
Oheinen kuva esittää kahdentoista koekuivauksen testituloksien laskennalliset keskiarvot puun lämpötilalle ja kosteudelle. Kun tiedetään koivun PSKP:n olevan 65 °C:n lämpötilassa 17 %:n vaiheilla (Kärkkäinen, 1985, s.190). Kuvioista 25 nähdään, että värimuutoksien riskivyöhykke jää tällä tavoin kuivattaessa noin kahteen tuntiin.

### 3.4.7 Koivun anisotropia

Puukappaleen kutistumista ja paisumista kosteuden muuttuessa kutsutaan puun anisotropiaksi. Puuaineksella on erilaiset fysikaaliset ominaisuudet säteen, tangentin ja pituuden suunnassa, joiden seurauksena puun kutistuminen ja paisuminen ovat eri suuruusluokkaa eri suunnista tarkasteltuna.

Koivun runkokuivauksessa kutistuminen puun syiden kyllästymispisteestä absoluuttisen kuivaksi säteen suunnassa on 5,3 %, tangentin suunnassa 7,8 % ja pituussuunnassa 0,6 % (Wagenfuhr, 1996).

Koivun kutistumista voidaan tarkastella kolmessa eri suunnassa. Likimääräinen kutistuma saadaan laskettua, kun tunnetaan koivun teoreettinen kutistuminen säteen suunnassa  $b_r$  ja tangentin suunnassa  $b_t$ . Pituussuunnan kutistuma on alle 1 %, joten se voidaan jättää laskennan ulkopuolelle. Otetaan koivun rungosta pyöreä kiekko, jonka kosteus on 20 °C:n lämpötilassa 30 % ja halkaisija on 200 mm, kehän pituus on tuolloin  $\pi * 200$  mm. Kutistumisen jälkeen halkaisijan uusi pituus on  $200 - b_r$  ja kehän uusi pituus on  $\pi * 200 \text{ mm} - b_t$ .



Kuvio 26. Pyöreän koivutukin laskennalliset mitat PSKP:n yläpuolella ja absoluuttisen kuivana.

Kuten kuviosta 26 nähdään, on koivun kutistuma absoluuttisen kuivana hyvin lähellä ympyrän halkaisijan ja kehän pituuden välistä suhdetta. Tämä selittää osittain sen, minkä takia HFV-kuivattu pyöreä koivu ei halkea eikä siihen synny kuivausjännityksiä.

#### 4 YRITYSKYSELY

HFV-kuivauksella voidaan tuottaa sorvauksessa käytettäviä aihioita edullisemmin kuin perinteisillä aihiovalmistustavoilla. Yrityskyselyn avulla haluttiin selvittää, mitä etuja yritysten edustajat näkevät uudessa kuivausmenetelmässä ja mitkä ovat kyselyssä määritellyn esimerkkiaihion vaihtoehtoiset valmistustavat ja valmistuskustannukset. Kyselytutkimuksen kohderyhmäksi valittiin koivuaihioiden valmistajia ja sorvausalan yrityksiä. Kysely postitettiin yhteensä 15 yritykselle, joista vastaus saatiin kolmasosalta. Osa kyselyyn valituista yrityksistä on ollut mukana HFV-kuivauslaitteiston kehityksessä koekuivausten muodossa. Näillä yrityksillä on ollut entuudestaan jonkin verran tietoa kuivauslaitteistosta sekä HFV-kuivauksen mahdollisuuksista. Kohderyhmä on hyvin suppea, koska koivuaihioiden valmistajia on Suomessa verrattain vähän. Sama koskee sorvausalan yrityksiä, joiden koivun käyttö ylittää 200 m<sup>3</sup>:n rajan.

Kohderyhmälle lähetetty kyselylomake saatekirjeineen on tämän työn liitteinä 1 ja 2. Kyselylomakkeen rakenne muodostui kolmesta pääryhmästä: Ensimmäinen ryhmä sisälsi yritystiedot ja toimintaa kuvaavat numerotiedot. Toisessa ryhmässä pyrittiin selvittämään vastaajan mielipidettä HFV-kuivauksesta ja sen tuomista eduista aihio- ja tuotevalmistuksessa. Kolmannessa ryhmässä pyrittiin selvittämään määriteltyjen sorvausaihioiden valmistuskustannuksia perinteisillä valmistusmenetelmillä sekä niistä saatavaa markkinahintaa.

Vastanneiden yritysten koko oli verrattain pieni, henkilömäärä oli alle viisi työntekijää. Puolet yrityksistä toimii huonekaluteollisuuden aihio- ja komponenttivalmistuksessa ja puolet on sorvausalan yrityksiä. Yritysten vuotuinen puunkäyttö sijoittuu 50-400 m<sup>3</sup>:n välille ja koivun osuus siitä liikkuu välillä 5-50 %. Saatu tulos on yllättävä, koska koivun käytön uskottiin olevan huomattavasti saatuja lukemia korkeampi. Koivun käyttö huonekaluteollisuuden raaka-aineena on todellisuudessa huomattavasti suurempaa kuin tämän tutkimuksen kyselyyn vastanneiden yritysten käytöstä voisi päätellä. Suurimmat koivua raaka-aineena käyttävät

yrietykset eivät palauttaneet vastauksiaan, mikä oli tämän kyselytutkimuksen kanalta hyvin ongelmallista.

HFV-kuivauksen etuja aihiovalmistuksessa koettiin olevan, mutta jotkut vastaajista näkivät menetelmässä myös negatiivisia piirteitä. Vastanneet tunsivat mielestään HFV-kuivauksen toimintaperiaatteen, mahdollisuudet ja rajoitteet varsin hyvin. Nopean kuivausajan koettiin lisäävän tuotannon joustavuutta varsin yksimielisesti, samoin sydänkeskeisen koivun käyttö aihiovalmistuksen raaka-aineena nähtiin alentavan aihoiden valmistuskustannuksia. Raaka-aineen saatavuudesta ympärivuotisesti kaikilla vastaajilla ei ollut yhtä positiivisia odotuksia. Aihiovalmistuksen maksimipituudeksi määriteltiin kyselyssä 1 metri ja tämän pituusmitan riittävyys jakoi mielipiteet kahtia. 1000 m<sup>3</sup>:n vuosikapasiteetti koettiin riittäväksi, joka on varsin ymmärrettävää, kun huomioidaan vastanneiden yritysten oma koivun kulutus. Kysyttäessä sydänkeskeisen koivun käyttöönoton halukkuutta oli vastauksista luettavissa kiinnostusta uuden raaka-aineen käyttöä kohtaan. Kysyttäessä HFV-kuivaamon soveltuvuutta yrityksen nykyiseen tuotantoon puolet vastanneista yrityksistä arvioi kuivausmenetelmän sopivan hyvin tai erittäin hyvin nykyisiin tuotantomalleihin.

Yrityskohtaiset vastaukset on esitetty kuviossa 27, jossa on myös vastauksia tarkentavia kommentteja.

Vastausten jakautuminen	1 täysin eri mieltä	2 jokseenkin eri mieltä	3 en osaa sanoa	4 jokseenkin samaa mieltä	5 täysin samaa mieltä	Kommenttirivi
Tunnen HFV-kuivauksen toimintaperiaatteen, sen mahdollisuudet ja rajoitteet.		1			3	"koekuivauksia"
Nopea 4 tunnin kuivaus lisää tuotannon joustavuutta.				2	2	"tapauskohtaisesti"
Sydänkeskeisen koivun hyödyntäminen alentaa aihoiden valmistuskustannuksia.				1	3	
Tuoretta koivurunkoa on saatavilla läpi vuoden.	1			2	1	"kesäaikana vaikeuksia saada raaka-ainetta"
Kuivattavan kappaleen pituus (1m) on riittävä.		2			2	"pääsääntöisesti"
1000 m <sup>3</sup> vuosikapasiteetti on HFV-kuivaamolle riittävä.			2		2	
Käyttäisittekö tuotteissanne sydänkeskeistä koivua, jos sitä olisi saatavilla kuivattuna?			1	1	1	"kyllä, jonkin verran"
HFV-kuivaamo soveltuisi hyvin tuotantomme.			1	1	1	"ei omaa kuivaamoja tulevaisuudessakaan"

Kuvio 27 HFV-kuivauksen etuja aihiovalmistuksessa koskevat vastaukset kysymyksittäin.

HFV-kuivauksella saavutettavia etuja ja sydänkeskeisen koivun käyttötarkoituksia haluttiin kartoittaa yritys näkökulmasta katsottuna seuraavilla kysymyksillä. Kurssivoidut tekstit ovat suoria lainauksia palautetuista kyselylomakkeista.

Mitä etuja nopea kuivaus toisi yrityksellenne?

- varastointitarpeen väheneminen
- joustavuuden lisääntyminen tuotannossa
- laadunvarmistus



- vähäisempi raaka-ainetyö
- edullisempi raaka-aine
- nopeampi varastonkierto

Mitä etuja tuoreen koivun käyttö toisi yrityksellenne?

- *työkustannuksien aleneminen*
- *lisäisi huomattavasti markkinamahdollisuuksia*

Missä tuotteissa sydänkeskeistä koivua voitaisiin hyödyntää parhaiten?

- *sorvattavissa, läpimitaltaan paksuissa kappaleissa*
- *sorvituotteissa*
- *huonekalut*
- *erikoistuotteet*
- *jalkatuotteet*
- *liimatut aihiot*

Miten hyödyntäisitte suuria koivurunkoja (D 30-40 cm), kun ne saadaan kuivattua ilman kuivaushalkeamia?

- *suuret pylväät*
- *sorvatuissa tuotteissa*
- *normaalissa komponenttituotannossa*
- *sorvausaihioina ilman liimaustarvetta*



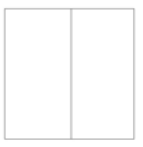
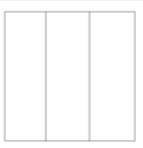
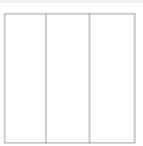
Mikä olisi riittävä kuivauskapasiteetti sydänkeskeiselle puutavaralle teidän yrityksänne?

- *400 m<sup>3</sup>*
- *vaikea sanoa, arviolta muutama kuutio/vuosi, ainakin aluksi*
- *tällä hetkellä n. 50-100 m<sup>3</sup>*

Yritykset näkevät HFV-kuivauksen tarjoavan huomattavia etuja nopean kuivaustavan tuoman tuotannon joustavuuden lisääntymisen ja varastointitarpeen vähentymisen kautta. Myös raaka-aineen edullisuus ja sen vähäisempi työstötarve aihi-

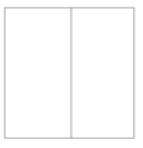

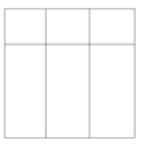
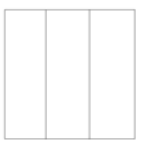
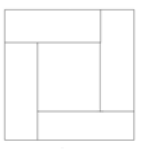
oiksi nähdään selkeinä etuina perinteisiin menetelmiin verrattuna. Sydänkeskeisen pyöreän koivun tuotteistaminen nähdään voimakkaimmin koskevan sorvattuja tuotteita, mutta kyselyyn vastanneet näkevät sillä olevan myös mahdollisuuksia huonekalujen komponenttituotannossa.

Kyselyn seuraavassa pääryhmässä haluttiin kartoittaa sorvausaihioiden valmistuskustannuksia perinteisillä valmistusmenetelmillä sekä aihioista saatavaa markkinahintaa. Kysymyslomakkeeseen oli määritelty sorvattu lopputuote, jonka pituus oli 800 mm. Yrityksiltä pyydettiin lopputuotteen valmistukseen tarvittavasta sorvausaihiosta rakennepiirroshdotus, valmistuskustannukset ja aihioista saatava markkinahinta. Perusaihion koko oli 70 x 70 x 800 mm, jonka lisäksi pyydettiin kaksi paksuudeltaan poikkeavaa dimensiota.

Sorvausaihion pituus 800 mm				
Aihion koko 70 x 70	Piirrä ehdotus rakenteesta	Valmistuskustannukset (eur/kpl)	Markkinahinta (eur/kpl)	Kuva sydänkeskeisestä lopputuotteesta
a <sub>1</sub> )		-	-	
b <sub>1</sub> )		-	3	
c <sub>1</sub> )		6	7	
d <sub>1</sub> )		10	20	

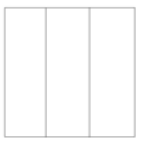

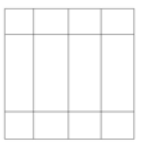
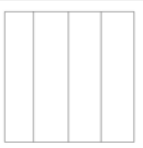
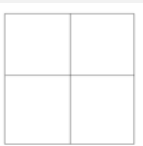
Kuvio 28. 70 x 70 x 800 mm kokoisen sorvausaihion rakenne, valmistuskustannukset ja markkinahinta.

Kuvioiden 28 - 30 aihiorakenteista a<sub>1...3</sub>:n ei saatu lainkaan valmistuskustannuksia eikä markkinahintoja, koska vastaajaryitys ilmoitti, ettei heillä ole ahiomyyntiä.

Sorvausaihion pituus 800 mm				
Aihion koko 100x100	Piirrä ehdotus rakenteesta	Valmistuskustannukset (eur/kpl)	Markkinahinta (eur/kpl)	Kuva sydänkeskeisestä lopputuotteesta
a <sub>2</sub> )		-	-	
b <sub>2</sub> )		-	8	
c <sub>2</sub> )		8,5	10	
d <sub>2</sub> )		15	30	

Kuvio 29. 100 x 100 x 800 mm kokoisien sorvausaihion rakenne, valmistuskustannukset ja markkinahinta.

Kuvion 29 aihiorakenteen b<sub>2</sub>:n lähtökohtana ovat olleet vakioaihiot, joiden kerannaisina eri valmisdimensiot synnytetään.

Sorvausaihion pituus 800 mm				
Aihion koko 130x130	Piirrä ehdotus rakenteesta	Valmistuskustannukset (eur/kpl)	Markkinahinta (eur/kpl)	Kuva sydänkeskeisestä lopputuotteesta
a <sub>3</sub> )		-	-	
b <sub>3</sub> )		-	16	
c <sub>3</sub> )		10	12	
d <sub>3</sub> )		20	40	

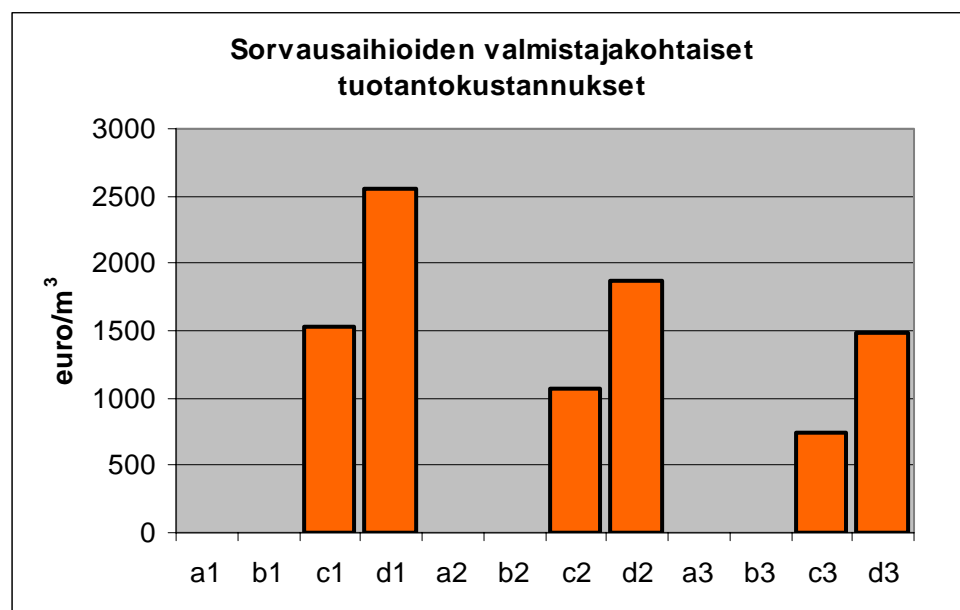
Kuvio 30. 130 x 130 x 800 mm kokoisien sorvausaihion rakenne, valmistuskustannukset ja markkinahinta.

Kuvion 30 aihiorakenteen b<sub>3</sub>:n lähtökohtana ovat olleet vakioaihiot, joiden kerannaisina eri valmisdimensiot synnytetään.

Yrityksiltä saaduista sorvausaihioiden rakenteesta voidaan todeta niiden olevan pienimmässä 70 x 70 mm:n kokoluokassa hyvin toistensa kaltaisia. Valmistaja-kohtaiset erot näkyvät valitun raaka-aineen vuoksi liimasaumojen määrässä, mikä osaltaan vaikuttaa aihion valmistuskustannuksiin sekä lopputuotteen ulkonäköön. Yksinkertaisimmillaan rakenne on ahiiossa a<sub>1</sub>, joka tuotantokustannuksiltaan on

varmasti edullisin, mikäli raaka-aineen saatavuus ei osoittaudu ongelmaksi. Seuraavassa 100 x 100 mm:n dimensiassa alkaa esiintyä jo enemmän rakenteellisia eroavuuksia, jotka vaikuttavat huomattavasti aihion valmistuskustannuksiin. Samankaltainen rakenteiden monimuotoisuus jatkuu myös suurimmassa 130 x 130 mm:n dimensiassa.

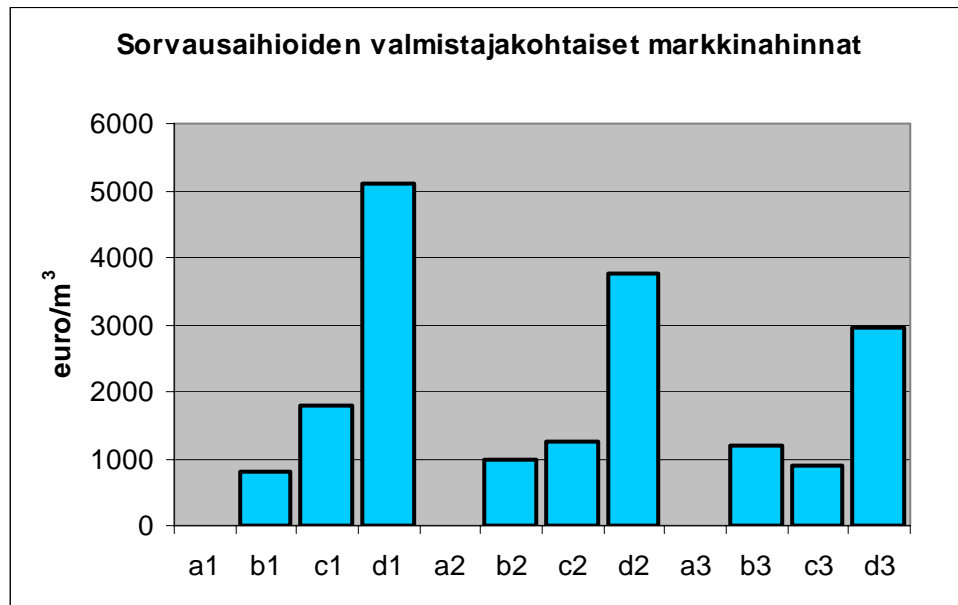
Sorvausaihioiden rakenteellisia eroavuuksia esiintyi runsaasti. Niillä on vaikutusta aihoiden tuotantokustannuksiin, kuten kuvioista 31 nähdään, mutta lähes 50 %:n erot valmistuskustannuksissa herättävät väistämättä lisäkysymyksiä kustannuksien laskentaperusteista. Eriteltyjä valmistuskustannuksia ei valitettavasti saatu yhdekkään yritykseltä. On ymmärrettävää, että tapauskohtaisesti valmistuskustannukset voivat vaihdella riippuen tuotannon kustannusrakenteesta, valitusta rakenneratkaisusta ja käytetystä raaka-aineesta, mutta näin suuria eroja on vaikea ymmärtää.



Kuvio 31. Sorvausaihioiden valmistajakohtaisia tuotantokustannuksia

Vastanneilta yrityksiltä saadut markkinahinnat vaihtelevat myös huomattavasti, kuten kuvioista 32 voidaan havaita. Joillakin yrityksillä on käytetty valmistuskustannuksien kertoimena 2,0:aa markkinahinnan määrittämiseksi ja toisessa ääri-laidassa on käytetty kerrointa 1,2. Mikäli tutkimusaineisto olisi laajempi, voitai-

siin korkein ja alhaisin markkinahinta pudottaa pois tuloksien käsittelystä, jotta saataisiin todenmukaisempi keskihinta. Kuutiohinnoiksi muutettuna aihioden markkinahinta näyttäisi laskevan aihiokoon kasvaessa ja kaikkien aihiovariaatioiden laskennalliseksi keskiarvohinnaksi saadaan noin 2000 euroa/m<sup>3</sup>.



Kuvio 32. Sorvausaihioiden valmistajakohtaisia markkinahintoja

Aihiovalmistuksessa käytetyllä raaka-aineella on suuri merkitys aihion kokonaiskustannuksiin. Jotta saataisiin selville, millä tavoin valittu raaka-aine vaikuttaa sorvausaihioiden valmistuskustannuksiin perinteistä aihiovalmistustapaa käyttäen, tehtiin vertailulaskelmia sorvausaihioiden valmistuskustannuksista eri raaka-aineilla. Laskelmiin otettiin mukaan koivusahatavaran oksakoivulaatu, jossa sallitaan terveitä oksia, A-laadun koivusahatavara ja näiden lisäksi sahatuore A-laatulokan koivu, jonka kuivauskustannukset selvitettiin erikseen. Raaka-aineiden hankintahintoina käytettiin konsernin sisäänostohintoja, jotka ovat varsin vertailukelpoisia pk-yritysten sisäänostohintojen kanssa. Vertailulaskelmat löytyvät luvusta 5.3.

## 5 HFV-KUIVAUKSEN KUSTANNUKSET

Kuivausprosessi on merkittävin kustannustekijä sahatavaran valmistuksessa. Tämän vuoksi kuivauskustannuksien selvittäminen HFV-kuivauksen osalta muodostui hyvin tärkeäksi. HFV-kuivauksen kustannukset muodostuvat pääasiassa pääomakustannuksista ja energiakustannuksista. Pääomakustannukset voidaan jakaa edelleen kuivaamoinvestoinnista johtuviin pääomakuluihin ja puutavaran pääomakuluihin.

HFV-kuivaamon hankintahintaa voidaan pitää korkeana suhteessa sen kuivauskapasiteettiin, mutta sillä voidaan saavuttaa etuja, jotka eivät ole muilla kuivausmenetelmillä mahdollisia. HFV-kuivaamon hankintahinnat ovat laitevalmistajan ilmoittamia hinta-arvioita, jotka perustuvat ensimmäisen teollisuusmittakaavassa toteutettavan HFV-kuivaamon hinnoitteluperiaatteisiin. Hintoihin sisältyvät kuivaamolaitteisto ja tarvittavat toimilaitteet. Kustannuksissa ei ole huomioitu sähkö-, vesi- tai rakennusteknisiä kustannuksia.

Ensimmäisen tuotannollisen HFV-kuivaamon jälkeen valmistettujen kuivaamoiden hankintahinnat saattavat laskea seuraavien toimitusten yhteydessä, mutta valmistajan mukaan on vaikea arvioida, kuinka paljon hinta voisi laskea ennen ensimmäisestä kuivaamotoimituksesta saatuja kokemuksia. Alle 100 kW:n generaattoreiden osalta suljetun vesijäähdytyksen korvaaminen ilmajäähdytyksellä saattaisi mahdollistaa hintojen alentamisen (Tetri, 2004).

Tekma Wood Oy:n antamat kuivaamohinnat on ilmoitettu niiden ulostulotehon mukaan:

-	30 kW	440 000 EUR
-	60 kW	480 000 EUR
-	100 kW	526 000 EUR
-	200 kW	690 000 EUR

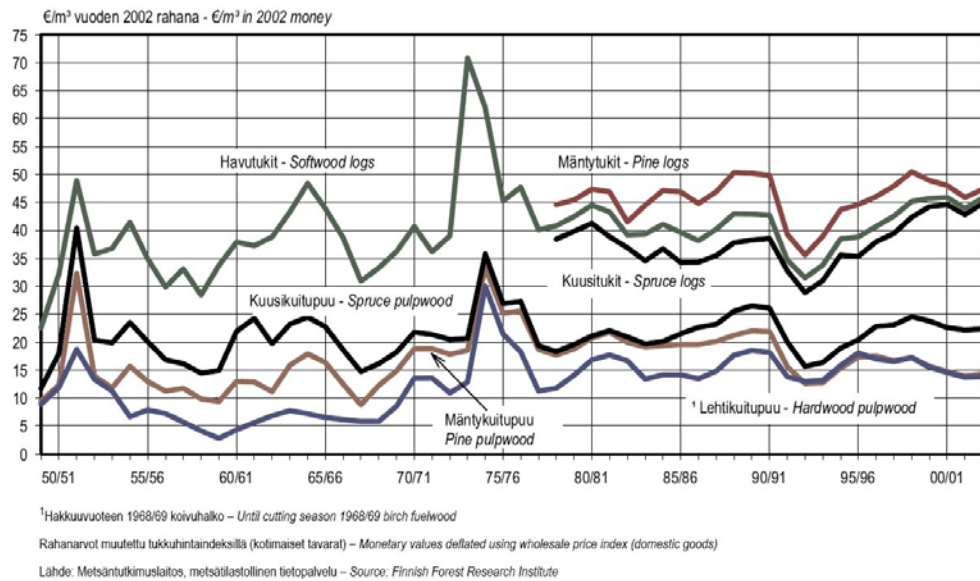


## 5.1 RAAKA-AINEHANKINTA

Puuta raaka-aineena käyttävien yritysten puunhankinnan lähtökohtana on turvata raaka-aineen saanti vuoden kaikkina aikoina. HFV-kuivattujen sorvausaihoiden valmistuskustannuksien määrittelyssä raaka-aineeksi on valittu sydänkeskeinen pyöreä koivu. Valinta mahdollistaa kuitupuuksi rinnastettavan hyvälaatuisen koivun hyödyntämisen uudella tavalla. Koivukuitupuun määritelmäksi ymmärretään yleensä vähintään kaksi metriä pitkä rungon osa, jonka latvaläpimitta on yli 8 cm. Kuitupuuosan pitää täyttää puunostajien yleisesti soveltamat laatuvaatimukset.

Koivurunko on kuitupuuta huomattavasti arvokkaampaa raaka-ainetta. Rungon kuorellinen läpimitta 3,1 metrin korkeudella on oltava vähintään 18,0 cm. Rungot erotetaan apterauksen yhteydessä oksattomiin tyvitukkeihin, kuivaoksaisiin välitukkeihin ja tuoreoksaisiin latvatukkeihin.

HFV-kuivauksessa voidaan käyttää oksatonta tyvitukkaa, tuoreoksaista latvatukkaa tai sitten kuitupuuta, jonka hankintahinta on näistä alhaisin, kuten kuviosta 33 voidaan havaita. Mikäli hyvälaatuista tyvitukkaa halutaan käyttää sorvausaihoiden valmistuksessa, nostaa se raaka-ainekustannuksia noin puolella verrattuna laskelmissa käytettyyn kuitupuuhun, mutta pienentää esisorvauksen jälkeistä hylkyprosenttia.



Kuvio 33. Raakapuun kantohinnat yksityismetsien puukaupoissa.

## 5.2 PÄÄOMAKUSTANNUKSET

Kuivaamoinvestoinnin pääomatarve muodostuu hankintamenosta ja käyttöpääomasta. Kuivaamohankintaan sidottu pääoma voidaan vapauttaa vuosittain tehtävinä poistoina. Tämän tutkimuksen laskelmissa poistojen vaikutuksia ei ole otettu huomioon. Käyttöpääomalla tarkoitetaan niitä varoja, joita sitoutuu yrityksen liiketoimintaan, esimerkiksi varastoihin ja myyntisaamisiin.

### 5.2.1 Hankintameno

Laskelman pohjana ovat laitevalmistajalta saadut kuivaamolaitteistojen hankintahinnat eri teholuokissa. Kuivaamojen laskennalliset vuosikapasiteetit on määritetty tämän tutkimuksen yhteydessä tehtyjen koekuivauksien perusteella ja niitä on käsitelty tarkemmin luvussa 3.4.3.

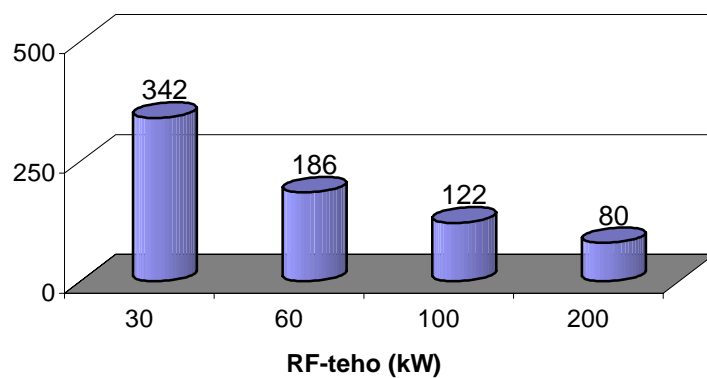
Kuivaamon vuotuiset pääomakustannukset voidaan laskea annuiteettiperiaatteella kaavasta:

$$PK_{\text{kuivaamo}} = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \times H, \quad (6)$$

jossa H on hankintakustannus,  
i on laskentakorko ja  
n on pitoaika.

Vuotuinen korko on 8 % ja investoinnin takaisinmaksuaika 10 vuotta.

**Kuivaamon vuotuiset pääomakustannukset (EUR / m<sup>3</sup>)**



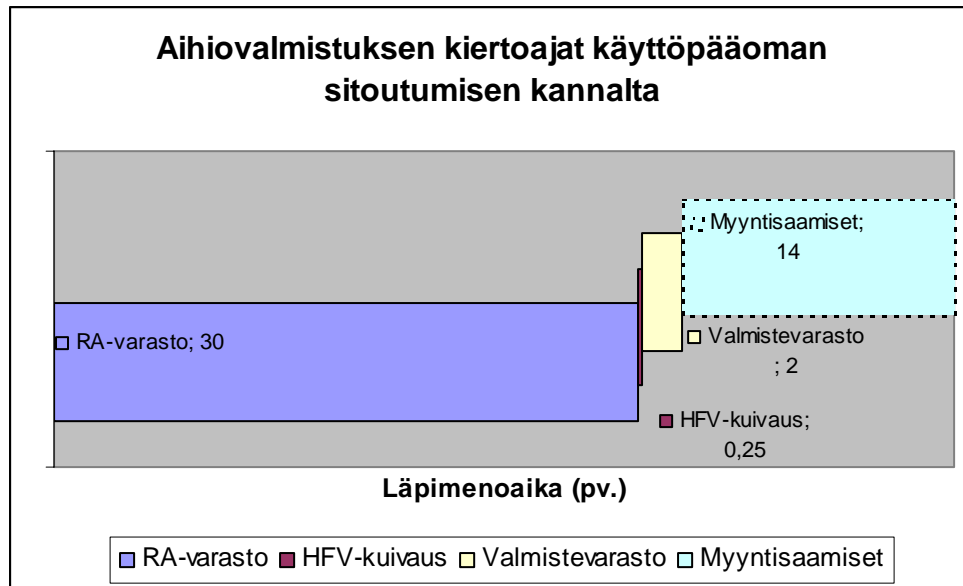
Kuvio 34. HFV-kuivaamojen vuotuiset pääomakustannukset.

Kuviosta 34 voidaan havaita, että kuivaamon pääomakustannukset laskevat voimakkaasti, kun laitteiston koko kasvaa. Esitetyt pääomakustannukset toteutuvat vain, mikäli kuivaamon kapasiteetti on täydessä käytössä, mikä on syytä huomioida, kun määritellään hankittavan tuotantolaitteiston kokoluokkaa suhteessa yrityksen todellisiin tarpeisiin.

### 5.2.2 Käyttöpääoma

Käyttöpääomaa sitoutuu, kun maksuperusteisia kustannuksia syntyy ennen vastaavia tuottoja. Tässä laskelmassa käyttöpääomaa käsitellään pääoman kierton-

peuden avulla ja sitä havainnollistetaan tuotantoprosessia kuvaavalla kaaviolla, kuvio 35.



Kuvio 35. Aihiovalmistuksen kiertajat käyttöpääoman sitoutumisen kannalta.

Raaka-ainevaraston käyttöpääomalaskelmassa otetaan huomioon raaka-ainevaraston arvo yhden kuukauden osalta. Raaka-aineen vuotuinen hankintamäärä on kaksinkertainen laitteiston kuivauskapasiteettiin nähden, koska hukkaprosentin oletetaan olevan 50 %. Kuitupuun keskimääräiseksi hankintahinnaksi arviointiin 30 euroa/m<sup>3</sup> sisältäen pienhankintalisän. HFV-kuivaus esisorvausvaiheineen kestää vain muutamia tunteja, joten sen vaikutus pääomakustannuksiin on hyvin pieni. Kuivauksen osuutta ja sen jälkeisen tasaannutuksen vaikutusta tuotteen pääomakustannuksiin tarkastellaan sorvausaihioiden valmistushinnalla. Tuotteiden lämpötilatasaannutukseen katsottiin riittävän kahden vuorokauden tasaannutusaika lämpimässä varastotilassa, joka toimii samalla tuotteiden valmisteverastona. Varaston kiertonopeudeksi saadaan tässä tapauksessa  $(360 \text{ pv} / 2 \text{ pv}) = 180$ . Vaikka kiertonopeus todellisuudessa muodostuisi tätä pienemmäksi, sen taloudelliset vaikutukset ovat kohtuullisen alhaiset lopputuotteen kokonaiskustannuksiin nähden. Myyntisaamiset rajattiin pääomakustannuslaskelman ulkopuolelle.

Tuotteen pääomakustannukset on laskettu kaavasta:

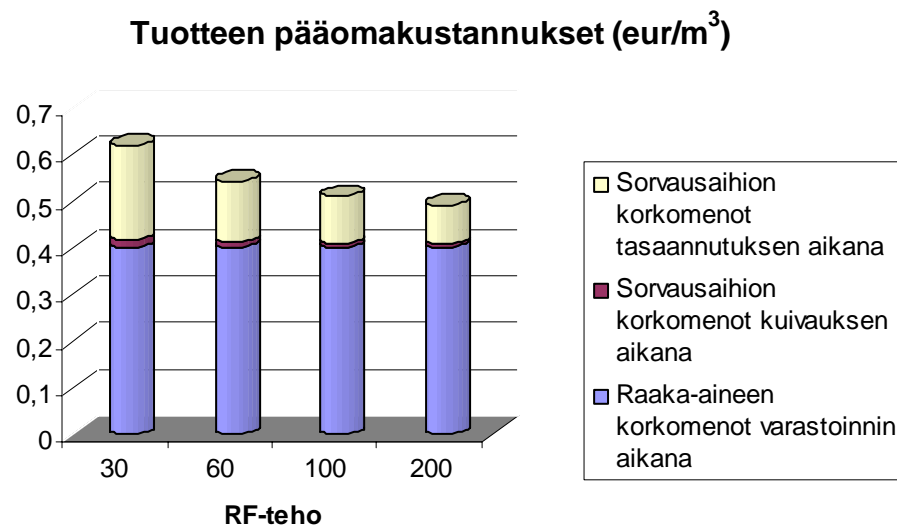
$$PK_{tuote} = t_k \times p \times i \text{ (eur/m}^3\text{)}, \quad (7)$$

jossa  $t_k$  on kuivaus- tai varastointiaika  $\frac{x}{360}$ ,

$p$  on tuotteen hinta (eur/m<sup>3</sup>) ja

$i$  on laskentakorko

Vuotuisena korkona laskelmissa käytetään 8 %:n korkokantaa.



Kuvio 36. Sorvausaihioiden pääomakustannukset tuotantovaiheittain.

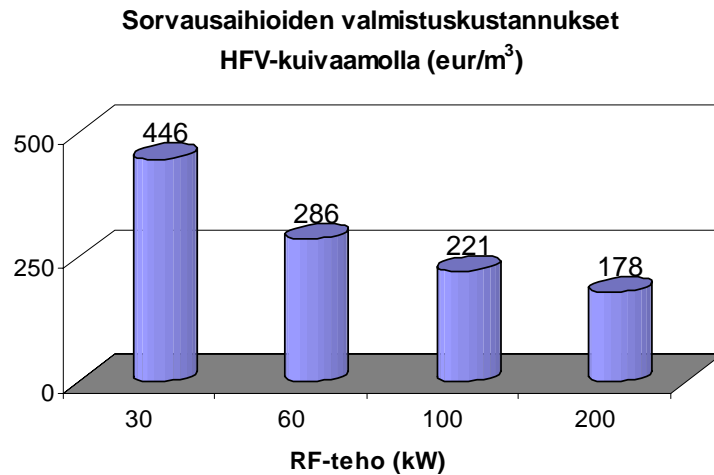
Tuotteen pääomakustannuksista suurin osuus muodostuu raaka-ainevaraston korkomenoista ja niihin voidaan vaikuttaa raaka-aineen hankintalogistiikalla. Kokonaisuudessa tuotteen pääomakustannukset jäävät hyvin vähäisiksi, mikä voidaan havaita kuvioista 36. Tästä johtuen, kannattaa raaka-aineen hankinta järjestää siten, että se palvelee tuotantoa mahdollisimman joustavasti ja ottaa huomioon paikalliset metsänhoito-olosuhteet.

### 5.3 AIHIOIDEN VALMISTUSKUSTANNUKSET

HFV-kuivattujen sorvausaihioiden valmistuskustannusten erittely on tehty seuraavien oletusten mukaisesti: Aihiovalmistuksen raaka-aineena voidaan käyttää kuitupuuta, jonka hankintahinta on noin 25 eur/m<sup>3</sup>. Aihioiden esisorvausvaiheessa voidaan raaka-aineelle tehdä laadullista lajittelua. Hylkyprosentti riippuu hankitun raaka-aineen laadusta ja tässä laskelmassa oletetaan hylkyprosentin olevan 50–70 %. Hylätty raaka-aine voidaan myydä hankintahinnalla selluteollisuuden raaka-aineeksi. Hankintaerät ovat luonnollisesti kohtuullisen pieniä, joten HFV-kuivaukseen sopivan puutavaran lajittelusta harvennushakkuiden yhteydessä joudutaan maksamaan normaalia korkeampi hinta. Kuivausvirheistä johtuvia tulonmenetyksiä ei laskelmassa huomioida, koska niitä ei menetelmällä esiinny, ei ainakaan sellaisia, joista olisi haittaa sorvaustuotteiden valmistuksessa.

Valmistuskustannuksiin vaikuttavat tekijät:

- päämakustannukset on eritelty luvussa 5.2. ja ne lisätään valmistuskustannuksiin seuraavasti:  $PK = PK_{\text{kuivaamo}} + PK_{\text{tuote}}$
- raaka-aineen pienhankintaerän lisäkustannuksen oletetaan olevan noin 20 %:n luokkaa
- rahti- ja esisorvauskustannukset ovat luokkaa 10 eur/m<sup>3</sup>
- kuivaukseen energiankulutus on noin 600 kWh/m<sup>3</sup>
- sähkön hinta Lahden alueella keskisuurelle teollisuudelle on 0,066 eur/kWh
- triodiputken kulumisesta aiheutuneet kustannukset vaihtelevat 8-14 eur/m<sup>3</sup> välillä riippuen laitteiston kokoluokasta



Kuvio 37. Sorvausaihioiden valmistuskustannukset generaattoritehon suhteen.

HFV-kuivauksella valmistettujen sorvausaihioiden valmistuskustannukset ovat voimakkaasti riippuvaisia tuotantolaitteiston teholuokasta, kuten kuviosta 37 havaitaan. Mitä suurempia tuotantomääriä laitteisto kykenee tuottamaan, sitä alhaisemmiksi muodostuvat sorvausaihioiden valmistuskustannukset.

Jotta voitaisiin vertailla, miten kustannustehokas HFV-kuivaukseen perustuva valmistusmenetelmä on sorvausaihioiden tuotannossa, tehtiin vertailulaskelmia sorvausaihioiden valmistuskustannuksista perinteistä aihiovalmistustapaa käyttäen. Vertailulaskelmien monipuolistamiseksi laskelmiin otettiin raaka-aineita eri lähtökohdista: 50 mm oksakoivu kilpailee lähimmin sydänkeskeisen koivuaihion kanssa, koska molemmissa laatuluokissa sallitaan terveitä oksia. 50 mm A-laatu on oksatonta koivusahatavaraa, jonka hankintahinta on jopa kaksinkertainen kuivattuun oksakoivuun nähden. Näiden lisäksi valmistuskustannusvertailuun valittiin sahatuoretta 50 mm A-laatuluokan koivua, jonka kuivauskustannukset saatiin koivun rahtikuivausta harjoittavalta yritykseltä. Hinta vaikuttaa kohtuullisen oikealta verrattaessa sitä kuivauskustannuksiin, joita selvitettiin kirjallisuustutkimuksen yhteydessä.

Liimausmenetelmällä valmistetun sorvausaihion valmistuskustannukset on määritetty käyttäen standardiaikajärjestelmää, kuvio 38. Sorvausaihion koko on sama

kuin kyselytutkimuksen keskimäinen koko eli 100x100x800 mm ja aihion valmistukseen käytetään yhtä liimasaumaa. Laskelmalla pyrittiin selvittämään aihion valmistukseen käytetyn raaka-aineen hintavaikutuksia tuotantohintoihin nähden.

<b>Laskenta standardiaikajärjestelmällä</b>	euroa/kpl
Höyläyksen työvaiheaika on 10 s/kpl ja höylän käyttökustannukset ovat 17 eur/h	0,09
Sahauksen työvaiheaika on 40 s/kpl ja sahan käyttökustannukset ovat 17 eur/h	0,38
Liimauksen työvaiheaika on 20 s/kpl ja liimauksen käyttökustannukset ovat 15 eur/h	0,17

Kuvio 38. Aihiovalmistuksen työvaiheet ja niiden hinnoitteluperusteet.

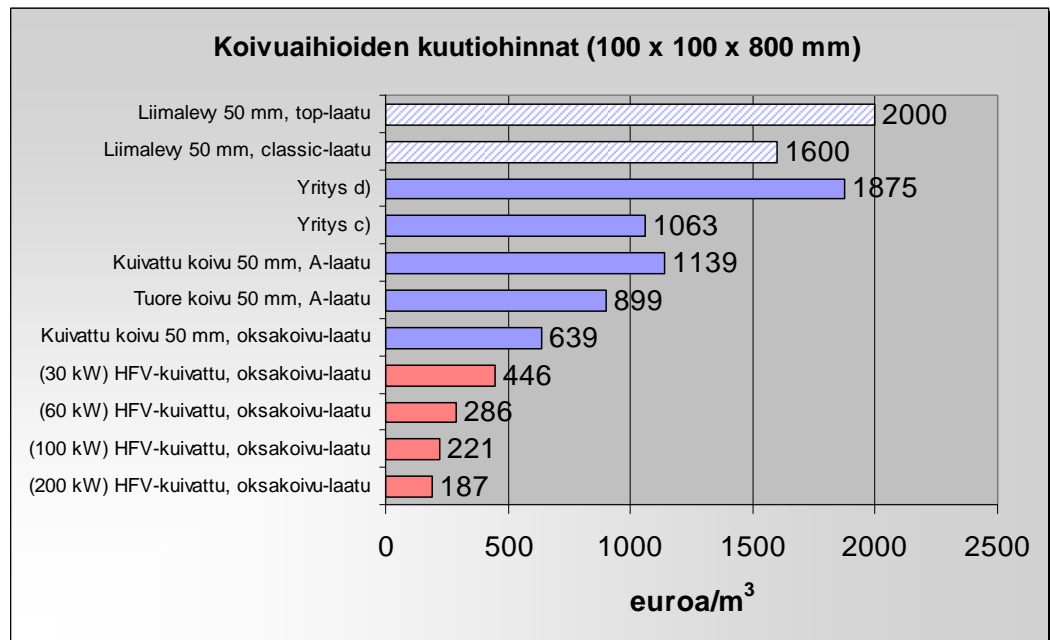
Laskelmaan valitut raaka-aineet ovat: kuivattu oksakoivu 50 mm, kuivattu koivu A-laatu 50 mm ja tuore koivu A-laatu 50 mm. Kaikilla laatuluokilla oletetaan läpisahatun koivun saantoprosentiksi 50 %.

	euroa/m <sup>3</sup>	euroa/aihio
<b>Tuore koivu 50 mm, A-laatu</b>	350,00	5,60
kuivauskustannukset	30,00	0,48
sahaus	94,44	0,76
höyläys	23,61	0,19
liimaus	20,83	0,17
<b>Yhteensä:</b>	<b>898,89</b>	<b>7,19</b>
<b>Kuivattu koivu 50 mm, A-laatu</b>	500,00	8,00
sahaus	94,44	0,76
höyläys	23,61	0,19
liimaus	20,83	0,17
<b>Yhteensä:</b>	<b>1138,89</b>	<b>9,11</b>
<b>Kuivattu koivu 50 mm, oksakoivu-laatu</b>	250,00	4,00
sahaus	94,44	0,76
höyläys	23,61	0,19
liimaus	20,83	0,17
<b>Yhteensä:</b>	<b>638,89</b>	<b>5,11</b>

Kuvio 39. Sorvausaihioiden raaka-ainelähtöiset valmistuskustannukset.



Kuten kuvioista 39 nähdään, ovat HFV-kuivattujen sorvausaihioiden valmistuskustannukset oleellisesti alhaisempia kuin perinteisillä valmistustavoilla tuotetut aihiot. Suuret kustannuserot muilla tavoin tuotettuihin aihioihin nähden selittyvät edullisen raaka-aineen ja vähäisten työkustannuksien kautta.



Kuvio 40. Koivuahioiden valmistuskustannuksia ja koivuliimalevyjen markkinahintoja.

Kuvion 40 kaksi ylintä hintaa kuvaa koivuliimalevyn myyntihintoja. Koivuliimalevyt otettiin esitykseen mukaan, koska niille on muodostunut yhtä selkeä markkinahinta kuin sahatavaratuotteille. Nämä hinnat voivat auttaa lukijaa suhteuttamaan aihiovalmistuksen kustannuksia verrattuna markkinoilta saatavaan hintatasoon. Esitykseen otettiin mukaan myös yrityskyselyn kautta saatuja sorvausaihioiden valmistuskustannuksia, jotka saatiin kahdelta yritykseltä. Nämä yrityksiltä saadut hinnat asettuvat omien valmistuskustannuslaskelmien yläpuolelle.

On vaikea arvioida, mikä olisi oikea markkinahinta koivupuiselle 100 x 100 x 800 mm:n sorvausaihiolle ilman aiheesta tehtyä markkinatutkimusta, mutta investointilaskelmia varten on tehtävä oletuksia aihioiden markkinahinnasta. On parempi olettaa tuotteelle alhainen markkinahinnan alaraja kuin asettaa se liian ylös.

Tässä tapauksessa alaraja asetetaan vastaamaan kuivattua hyvälaatuista koi-vusahatavaraa, jonka kuutiohintaa markkinoilla vaihtelee 500 ja 700 euron välillä, alv 0 %. Yläraja asetetaan varovasti ilman ylioptimistisia odotuksia tuhanteen euroon, joten se vastaa yrityskyselystä saatua alinta markkinahintaa ahiokuutiolle. Tämän lisäksi investointilaskelmiin otetaan mukaan näiden raja-arvojen keskiarvoksi saatu kuutiohintaa.

## 6 HFV-KUIVAAMOINVESTOINTI

Kuivaamoinvestointipäätös voi perustua olemassa olevan tuotteen valmistuskustannuksien oleelliselle alentumiselle, tuotteen ulkonäköön ja rakenteelliseen lisäarvoon sekä näiden kautta suurempien markkinaosuuksien saavuttamiseen. Investoinnin suuruusluokka riippuu suuresti siitä, millaiseen tuotantokapasiteettiin kuivaamoinvestoinnilla pyritään. Ylisuureen tuotantokapasiteettiin ei tule pyrkiä, sillä se nostaa investointikustannuksia voimakkaasti. Investointi on tuottavin silloin, kun sen käyttöaste on lähellä 100 %. HFV-laiteinvestoinnin suuruus on noin 440 000 – 690 000 euroa, joten investointi vaatii suuria panostuksia kuivaamohankintaan ryhtyvältä yritykseltä.

Esimerkiksi RF-teholtaan 200 kW HFV-kuivaamolaitteisto, jonka käyttöaste on 100 %, tuottaa pyöreitä sorvausaihioita vuodessa noin 1 280 kuutiota, jos tuotannon oletetaan toimivan kahdessa vuorossa 16 h/vrk:ssa ja 240 päivää vuodessa. Raaka-ainetta kuivaamo tarvitsisi vuodessa n. 2 560 m<sup>3</sup> ja vuotuiset raakaainekustannukset olisivat noin 77 000 euroa. Sähköenergiaa kuivauksissa kuluisi 768 000 kWh, josta kertyisi vuodessa 51 000 euron kustannukset.

Kun tämän kaltaista investointihanketta aletaan suunnitella yritystasolla, vaativat investointilaskelmat tarkempaa tutkimustietoa pyöreiden koivuaihoiden markkinahinnoista ja ennusteita markkinoiden kehittymisestä. Samalla tarkentuvat tuotantolaitteiston kapasiteettitarve ja kaikkien osatekijöiden kustannukset. Markkinaselvitystuloksien ja investointia koskevien kustannustietopäivitysten jälkeen on mahdollista siirtyä laskemaan yrityskohtaisia investointilaskelmia. Tämän tutkimuksen investointilaskelmat ovat tehty yleisellä tasolla perustuen lopputuotteen markkinahintaoletuksiin ja kuivaamojen hankintahinnat eivät sisällä kokonaisuinvestoinnin kaikkia kustannuksia.

## 6.1 INVESTOINNIN KANNATTAVUUS

Normatiivisen näkemyksen mukaan yrityksen tavoitteena on voiton maksimointi ja sitä kautta yrityksen omistajien varallisuuden kasvattaminen. Normatiivisessa investointiteoriassa oletetaan investointien seuraamuksien olevan ilmaistavissa taloudellisessa tasossa kassavirtoina, joihin investointilaskelmat voidaan perustaa. Investointiteorian mukaan nettokassavirta ja sen ajallinen jaksottuminen määräävät investoinnin kannattavuuden. Investoinnin kannattavuuteen liittyy muitakin tekijöitä kuin investoinnista saatavat nettotulot, jotka jaksottuvat investoinnin pitäjälle. Muita kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat ne investoinnin osatekijät, joita investointihankkeessa tarvitaan ennen kuin se on käyttövalmiina. Näiden kaikkien osatekijöiden kustannuksia ei välttämättä aina muisteta tai huomata ottaa huomioon investointilaskelmia tehtäessä. Myös investoinnin jäännösarvolla voi olla merkitystä investoinnin kannattavuuteen. Yleensä näin ei kuitenkaan ole, sillä investoinnin jäännösarvolla on yleensä niin vähän merkitystä, ettei sitä oteta huomioon investointilaskelmissa.

Investoinnin kannattavuutta voidaan tarkastella esimerkiksi laskentakoron avulla, jonka yritys joutuu maksamaan rahoittaessaan investoinnista johtuvia kustannuksia. Kohtuullista tuottoastetta yrityksen toimintaan sitoutuneelle pääomalle on vaikea määritellä ilman tapauskohtaista analyysiä, mutta voidaan kuitenkin sanoa, että tuottovaatimus kasvaa investointiriskin lisääntyessä. Voidaan myös todeta, että yrityksen strategisille investoinneille sallitaan usein pienempi tuottovaatimus ja pidempi takaisinmaksuaika kuin muille investoinneille. Oman pääoman tuottovaatimus on yleensä korkeampi kuin vieraan pääoman, koska oman pääoman riskipitoisuus on suurempi kuin vieraan pääoman. Vieraan pääoman kulut ovat verovähennyskelpoisia, kun taas omasta pääomasta maksettavasta tuotosta ei voi tehdä vähennystä.

Sijoitetun pääoman tuotto prosentti mittaa suhteellista kannattavuutta eli sitä tuottoa, joka on saatu yritykseen sijoitetulle pääomalle. Tuottotason tulisi olla vähintään yrityksen vieraan pääoman käytöstä maksaman korvauksen suuruinen. Sijoitetun pääoman tuotto prosentti voidaan laskea kaavasta:

$$\frac{100 * (\text{nettotulos} + \text{korkokulut})}{\text{sijoitettu pääoma}} \quad (8)$$

Oman pääoman tuotto prosentti kuvaa yrityksen kykyä huolehtia omistajien yritykseen sijoittamista pääomista. Tuottotasovaatimus määräytyy yleensä omistajien asettamien tavoitteiden mukaisesti. Oman pääoman tuotto prosentti voidaan laskea kaavasta:

$$\frac{100 * \text{kokonaistulos}}{\text{oma pääoma yhteensä}} \quad (9)$$

Tuottotason alaraja voidaan määritellä markkinoilta saatavan riskittömän sijoituksen tuoton perusteella. Seuraavassa kuviossa esitetyt luvut ovat saatavissa kuukausittain ilmestyvästä Suomen Pankin Rahoitusmarkkinat -tilastokatsauksesta. Kuten kuvioista 41 nähdään, ovat obligaatiokorot ja yritysten lainakannan keski korot laskeneet vuodesta 1996 lähtien vuosittain. Tosin vuosi 2000 oli poikkeus, silloin korot nousivat yli prosenttiyksikön. Tällä hetkellä investointien tuottotason alaraja on hyvin alhaisella tasolla, kun sitä tarkastellaan riskittömän sijoituksen tuoton perusteella.

Vuosi	Valtion 5 vuoden obligaation korko (ilman 1.5%:n riskilisää)	Yritysten lainakannan keski korko
1996	6.03 %	5.14 %
1997	4.86 %	5.21 %
1998	4.30 %	4.85 %
1999	4.07 %	4.51 %
2000	5.27 %	5.97 %
2001	4.54 %	4.70 %
2002	4.41 %	4.32 %
2003	3.28 %	3.57 %
2004	3.25 %	3.43 %
3/05	2.97 %	3.40 %

Kuvio 41. Valtion 5 vuoden obligaation ja yritysten lainakannan keski korko.

Investointipäätökset tehdään perustuen pääosin laskelmiin, kuten esimerkiksi investoinnin takaisinmaksuaikaan ja nykyarvomenetelmään, joista saatuja tuloksia peilataan yrityksen strategiaan ja investoinnin riippuvuussuhteisiin, jolloin myös

laskelmien ulkopuoliset seikat saattavat vaikuttaa mahdollisiin investointipäätöksiin - ainakin jos investointien tuottotason alaraja on alhaisella tasolla.

## 6.2 INVESTOINNIN LÄHTÖKOHDAT

Tuottoihin vaikuttavat tuotteiden myyntihinnat ja -määrät. Tuottojen arviointi ja ennustaminen on yleensä hyvin hankala ja epämääräinen tehtävä, sitä se on myös tässä tapauksessa. Yrityskyselyn kautta saatiin siihen vastanneiden yritysten näkemyksiä sorvausaihioiden markkinahinnasta. Kyselytutkimuksessa saatujen markkinahintojen keskiarvoksi saatiin noin 2000 euroa/m<sup>3</sup>. Laskelmissa oletetaan HFV-kuivausmenetelmällä tuotetun sydänkeskeisen koivuisen sorvausaihion markkinahinnalla olevan kolme eri hintavaihtoehtoa, jotka ovat 600, 800 ja 1000 euroa/m<sup>3</sup> sen kaikilla eri dimensioilla, sillä sorvausaihion paksuus ei vaikuta aihiovalmistuksen kustannuksiin eikä tuotantokapasiteettiin. Tuottoihin vaikuttavat myyntihinnan ohella myös sorvausaihioiden valmistusmäärä, joiden valmistuskustannukset puolestaan riippuvat taas laitteistojen tehosta. Laitteistojen tuotantokapasiteetit ovat esitetty luvussa 3.4.3 ja valmistuskustannukset luvussa 5.3.

### *Investoinnin pitoaika*

Investoinnin pitoajalla tarkoitetaan investoinnin vaikutusaikaa tuotantoprosessissa. Kirjanpidossa käytetty poistoaika on tuotantovälineen taloudellinen pitoaika. Käyttöomaisuuden hankintameno jaksetaan poistoiksi sen koko taloudelliselle pitoajalle. Mikäli investointi rahoitetaan pääosin vieraalla pääomalla, niin tulorahoituksen on oltava vähintään poistojen suuruinen, jotta investointi saadaan rahoitettua sen taloudellisen pitoajan kuluessa.

Käytännössä tuotantovälineen teknistaloudellinen pitoaika on lähes aina taloudellista pitoaikaa suurempi. Tämän seurauksena käyttöomaisuuden kirjanpitoarvo pienenee omaisuuden fyysistä käyttöarvoa nopeammin.

Investointien taloudellisten pitoaikojen määrittelyssä voidaan käyttää apuna kokemusperäisiä tietoja vastaavien investointien taloudellisista pitoajoista. Taloudellisen pitoajan määrittelyssä noudatetaan varovaisuuden periaatetta. Tässä työssä käytetään investoinnin pitoaikana 10 vuotta, joka on tyypillinen pitoaika kii-vaamoinvestoinneille.

#### *Investoinnin jäännösarvo*

Jäännösarvo on investoinnin arvo, joka sillä on pitoajan lopussa vaihtoehtoisessa käytössä. Investointikohteen jäännösarvo on yleensä hyvin vaikeasti ennustettavissa. Jäännösarvo voidaan luotettavimmin arvioida, mikäli sillä on ”käytetyn tavaran” markkinat olemassa kuten autoilla. Tämän tutkimuksen laskelmissa kii-vaamoinvestoinnin jäännösarvo oletetaan nollassa.

#### *Poistot*

Poistoilla pitkäaikaisen tuotantovälineen hankintahinta jaksotetaan niiden ajanjaksojen kustannuksiksi, joina tämä tuotantoväline on käytössä. Poistot perustuvat käyttöomaisuuden arvonalentumiseen. Poistojen tarkoitus on estää uusinvestointeihin tarvittavan rahan jakaminen osinkoina tai veroina. Näin varmistetaan käyttökapasiteetin säilyminen tulevaisuudessa.

Poistoaika voidaan määrätä ajan tai käyttömäärän perusteella. Käytön mukaisia poistoja sovelletaan koneille, joiden käytöstä aiheutuva kuluminen aiheuttaa käyttökelpoisuuden vähenemistä. Poistot kannattaa tehdä verotussyistä niin suurina kuin tilinpäätöksen tuottovaatimus ja elinkeinoverolaki (EVL 25 %, menojäännös) sallii. Tämän tutkimuksen laskelmissa poistojen vaikutuksia ei ole otettu huomioon.

*Investoinnin riskit*

Uuden kuivausteknologian käyttöönottoon liittyy tavallista kuivaamoinvestointia suurempi riski, joka koskee itse kuivaamolaitteistoa ja sen käyttöönotosta johtuvia suunnittelelmattomia kustannuksia. Laitteiston sisäänajo ja testaus saattavat viedä tavallista kuivaamoinvestointia enemmän aikaa ja niiden yhteydessä saatetaan joutua ratkomaan ennalta arvaamattomia ongelmia. Teollisuusmittakaavan kokoisien kuivaamolaitteiston RF-teho saattaa nousta yli kymmenkertaiseksi verrattuna tässä tutkimuksessa käytettyyn laboratoriokuivaamon RF-tehoon. Tehon lisäyksestä ei pitäisi seurata ongelmia, kunhan kuivaamon suunnittelussa noudatetaan samoja suunnitteluperiaatteita, mitä käytettiin laboratoriokuivaamon suunnittelun yhteydessä (Kotikangas, 2003). Vastaavan teholuokan kuivaamoja ei ole olemassa, joten kaikki suunnittelun oletukset pohjautuvat HFV-kuivausprojektin aikana saatuihin kokemuksiin ja tutkimustuloksiin.

Kannattavuuslaskelmien laadintaan liittyy usein epävarmuustekijöitä, joita ei puutteellisten tietojen takia edes pystytä poistamaan. Tässä tutkimuksessa tehtyjen laskelmien ensimmäinen epävarmuustekijä koskee tulojen muodostumista. Sydänkeskeisiä pyöreitä koivuaihioita ei ole ollut ennen markkinoilla, joten aihioista saatujen tulojen määrittäminen on hankalaa. Toinen epävarmuustekijä liittyy HFV-kuivaamolaitteiston hinnoitteluun. Laitteiston valmistaja on ilmoittanut, että seuraavien tuotantolaitteistojen hinnat saattavat olla prototyyppikuivaamoja alhaisemmat. Toisaalta ensimmäisen HFV-kuivaamolaitteiston investointilaskelmiin ei liity hinnoitteluriskiä, koska laitteiston hinta on prototyypin kohdalla se, minkä laitevalmistaja on ilmoittanut. Investointilaskelmissa on lopputuotteelle arvioitu kolme eri markkinahintaa, jotka ovat 600, 800 ja 1000 eur/m<sup>3</sup>. Markkinoilta saatava hinta asettuu luultavasti näiden hinta-arvioiden yläpäähän tai jopa niiden yli, jos hintaa verrataan tässä tutkimuksessa tehtyyn kyselytutkimukseen ja sen tuloksiin. Yritysten antamien hinta-arvioiden keskiarvoksi saatiin kyselytutkimuksessa noin 2000 euroa/m<sup>3</sup>. Investointilaskelmissa on huomioitu erikokoisten kuivaamolaitteistojen vaikutukset tuotteiden valmistuskustannuksiin luvun 5 mukaisesti.



### 6.3 INVESTOINTILASKELMAT

Investointien päätöksentekotilanteessa tulisi olla vähintään kaksi toisistaan poikkeavaan vaihtoehtoa, joita vertaillaan keskenään. Vaihtoehdot voivat poiketa toisistaan hankkeen koon, teknisten ratkaisujen, lopputuotteen ominaisuuksien tai hankkeen riskipitoisuuden mukaan (Sandström, 1994, s. 90).

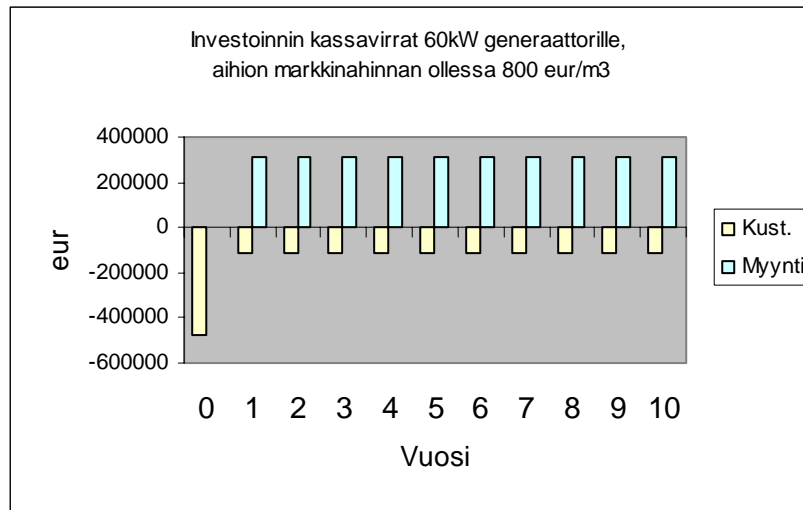
Investointihankkeita on arvioitava ennen kaikkea toisiin vastaaviin hankkeisiin. Absoluuttista paremmuusjärjestystä eri investointivaihtoehdoille voi olla vaikea löytää. Investointien selvittämisessä on päästy pitkälle, mikäli vaihtoehtojen paremmuus- ja kustannusjärjestys on selvinnyt.

Tässä tutkimuksessa käsitellään neljän eri teholuokan investointivaihtoehtoa. Vaihtoehdot poikkeavat toisistaan niin hankintahinnan, tuotantokapasiteetin kuin valmistuskustannuksienkin suhteen. Tuotettavalla lopputuotteella oletetaan olevan kolme mahdollista markkinahintaa, joihin eri investointivaihtoehtoja peilataan. Lopputuotteen laadun kannalta kaikki investointivaihtoehdot ovat yhteneväisiä.

Investointilaskelmia tarkastellaan takaisinmaksuajan kannalta ja tämän lisäksi niitä käsitellään menetelmällä, joka ottaa huomioon rahan aika-arvon eli tulevien kassavirtojen diskonttauksen nykyhetkeen. Tähän ryhmään kuuluvien menetelmien tulokset antavat investointivaihtoehtoehdoille yleensä saman järjestyksen. Tähän tutkimukseen menetelmäksi valittiin nykyarvomenetelmä, jossa investoinnin tuottovaatimus voidaan määrittellä etukäteen. Investointivaihtoehtojen vertailuun käytetään suhteellisen nykyarvon menetelmää.

Tarkastellaan esimerkiksi 60 kW kuivaamolaitteistoa, jonka hankintameno on 480 000 euroa ja laitteiston pitoaika 10 vuotta. Oletetaan, että 10 vuoden kuluttua kuivaamolla ei ole enää arvoa. Kustannuslaskennassa käytetään 8 % korkokantaa. Aihoiden markkinahinnan ollessa 800 eur/m<sup>3</sup> saadaan vuotuisiksi myyntituloiksi 307 200 euroa. Kustannusten ollessa 109 824 euroa, saadaan näiden erotuksena

keskimääräisen vuoden nettotuloiksi 197 376 euroa. Investoinnin kassavirrat voidaan esittää kuten kuviossa 42.



Kuvio 42. Kymmenen vuoden investoinnin rahavirrat.

### *Takaisinmaksuaika*

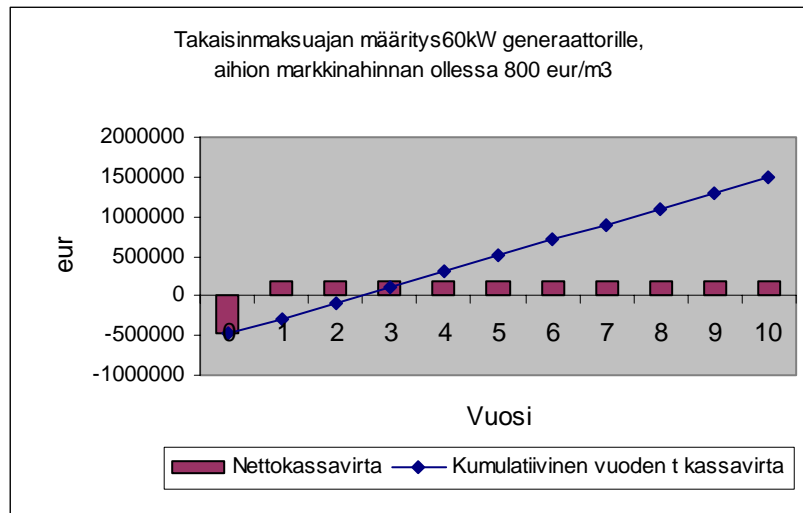
Koroton takaisinmaksuaika on yksinkertaisin ja yksi käytetyimmistä menetelmistä. Menetelmä ilmoittaa ajan, jona investointiin sidottu pääoma vapautuu hankkeesta. Takaisinmaksuaika ei huomioi investoinnin pitoaikaa eikä se varsinaisesti mittaa investoinnin kannattavuutta. Tämän vuoksi sen rinnalla tulisi käyttää muita menetelmiä, kuten esimerkiksi nykyarvomenetelmää. Yksinkertaisimmillaan takaisinmaksuaika voidaan laskea jakamalla hankintameno tyypillisen vuoden nettotuloilla:

$$\sum_{t=1}^{n^*} S_t - H = 0 \quad (10)$$

$$n^* = \frac{H}{S}, S = \text{vakio}$$

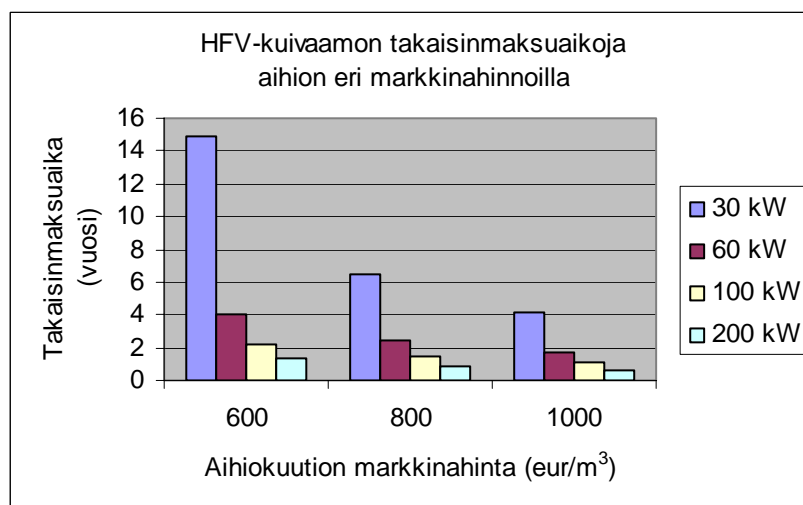
Esimerkissä on käytetty samaista 60 kW kuivaamolaitteistoa, jota käytettiin investointiesimerkin kassavirtojen määrittämisessä. Kumulatiivinen kassavirtaesitys on havainnollinen apuväline arvioitaessa investoinnin kannattavuutta. Kuvio 43

voidaan havaita, että kun kumulatiivinen kassavirta leikkaa X-akselin, on kassavirta nolla ja takaisinmaksuaika 2,4 vuotta.



Kuvio 43. Kumulatiivinen kassavirta ja takaisinmaksuaika.

Mitä lyhyemmäksi takaisinmaksuaika muodostuu, sitä kannattavampi investointihanke yleensä on. Seuraavassa kuviossa on esitetty kaikkien investointivaihtoehtojen takaisinmaksuajat aihioden eri markkinahinnoilla laskettuna. Kuten kuviossa 44 voidaan havaita, osoittautuvat pienimmän teholuokan kuivaamon takaisinmaksuajat muita vaihtoehtoja huomattavasti pidemmiksi.



Kuvio 44. Kuivaamolaitteistojen takaisinmaksuajoja.

Takaisinmaksuaikavaatimus riippuu investoinnin pitoajasta ja investointityypistä. Pienien kehitysinvestointien takaisinmaksuaikana käytetään yleensä vuoden tai sen alle olevaa takaisinmaksuaikaa, kun taas pitkäaikaisten tuotannollisten investointien takaisinmaksuaikavaatimus saattaa olla useita vuosia.

### *Nykyarvomenetelmä*

Nykyarvomenetelmä on perusinvestointilaskentamenetelmä, jossa lasketaan tulevien kassavirtojen nykyarvoa. Nykyarvomenetelmässä investoinnin tuottovaatimus määritellään etukäteen ja se voi vastata esimerkiksi yrityksen rahoituskorkoa. Tulevien kassavirtojen nykyarvoa verrataan investoinnista aiheutuneisiin kustannuksiin. Erotuksen ollessa positiivinen osoittautuu investointi kannattavaksi ja sen ollessa negatiivinen on investointi kannattamaton. Nykyarvo saadaan laskettua kaavasta:

$$NA = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} - H \quad (11)$$

, missä

NA = nykyarvo

$S_t$  = nettokassavirta vuonna t

i = laskentakorko

H = investoinnin kustannus vuonna 0

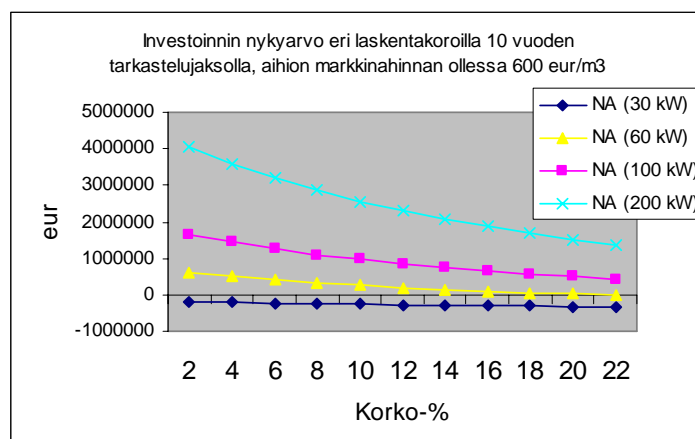
$NA \geq 0$  = kannattavuusehto

Seuraavassa laskuesimerkissä tarkastellaan HFV-kuivaamoinvestointia, jossa generaattorin koko on 30 kW ja valmistettavista aihioista saatava markkinahinta on 800 eur/m<sup>3</sup>. Laskentakorkona käytetään 8 %:a ja tarkastelujakso on määritelty kymmenen vuoden pituiseksi. Tämän kokoluokan kuivaamon valmistuskustannukset olivat luvun 5.3 mukaan 446 eur/m<sup>3</sup>.

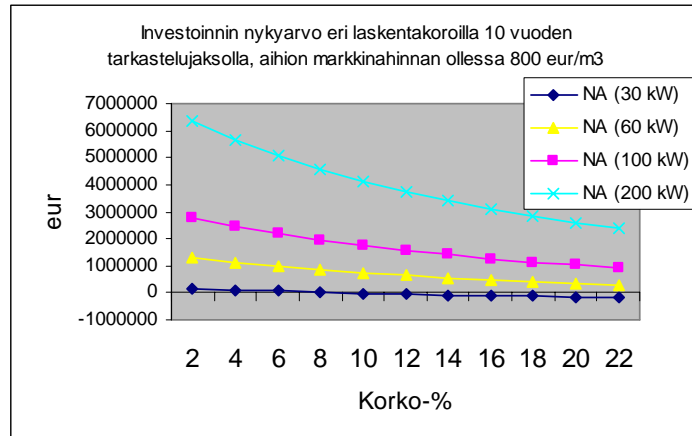
Vuosi	Hankintameno	Nettotulo	Diskonttoteijä	Nykyarvo
0	480000			
1		67968	0,9259	62933
2		67968	0,8573	58272
3		67968	0,7938	53955
4		67968	0,7350	49959
5		67968	0,6806	46258
6		67968	0,6302	42831
7		67968	0,5835	39659
8		67968	0,5403	36721
9		67968	0,5002	34001
10		67968	0,4632	31482
			Yhteensä	456071
			H	440000
			NA	16071

Kuvio 45. Investoinnin nykyarvo

Esimerkkilaskelman, kuvio 45 nykyarvoksi saadaan 16 071 euroa, investointi on siis kannattava kahdeksan prosentin laskentakorolla. Kuvioista 46 voidaan nähdä miten 10 % laskentakorkoa käytettäessä muuttuu samainen investointi kannattamattomaksi. Korkeampaa laskentakorkoa käytettäessä tulevien kassavirtojen nykyarvo pienenee. Investointihankkeita vertailtaessa on hyvä tarkastella investoinnin nykyarvon herkkyyttä eri laskentakoroilla. Kuvioista 46–48 voidaan havaita miten eri laskentakorot vaikuttavat investoinnin kannattavuuteen, muuttuvana tekijänä kuvioissa on aihioista saatava markkinahinta.

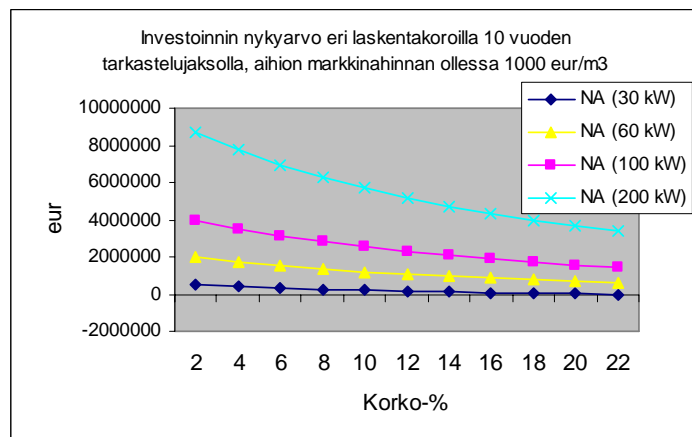
Kuvio 46 Investoinnin nykyarvo eri laskentakoroilla, kun aihion markkinahinta on 600 eur/m<sup>3</sup>.

Kuviosta 46 voidaan nähdä, että 30 kW tehoinen kuivaamo ei tule kannattavaksi pienimmälläkään laskentakorolla markkinahinnan ollessa 600 eur/m<sup>3</sup>. Toinen havainto on, että 60 kW kuivaamo muuttuu kannattomaksi 22 % laskentakorolla.



Kuvio 47. investoinnin nykyarvo eri laskentakoroilla, kun aihion markkinahinta on 800 eur/m<sup>3</sup>.

Kuten kuviossa 45 todettiin, että 30 kW tehoinen HFV-kuivaamo on kannattava vielä 8 % laskentakorolla, mutta muuttuu kannattamattomaksi sitä korkeammilla koroilla. Kuviosta 47 havaitaan muiden kuivaamovaihtoehtojen olevan kannattavia vielä 22 % laskentakorolla.



Kuvio 48. Investoinnin nykyarvo eri laskentakoroilla, kun aihion markkinahinta on 1000 eur/m<sup>3</sup>.

Kuviosta 48 nähdään, että aihoiden markkinahinnan ollessa 1000 eur/m<sup>3</sup> ovat kaikki investointivaihtoehdot kannattavia kaikilla esitetyillä laskentakoroilla. Kaikilla markkinahintaoletuksilla (kuviot 46–48) suurimman kokoluokan kuivaamovaihtoehdolla on muita suurempi investoinnin arvon lisäys.

#### *Suhteellinen nykyarvomenetelmä*

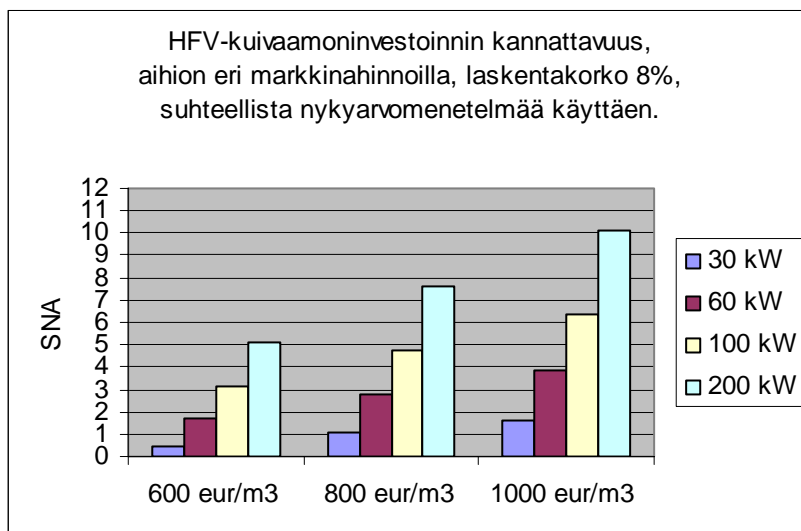
Suhteellisen nykyarvon menetelmä on eräs nykyarvomenetelmän sovellus, jolla on mahdollista arvioida erikokoisten hankkeiden kannattavuutta.

$$SNA = \frac{\text{nettokassavirtojen nykyarvo}}{\text{perusinvestointi}} \quad (12)$$

Suhteellisessa nykyarvomenetelmässä nettokassavirtojen nykyarvo jaetaan hankintamenolla. Mikäli osamäärä on suurempi kuin yksi, on investointi kannattava ja jos se on pienempi kuin yksi, on investointi kannattamaton.

Menetelmä antaa hyvin samankaltaisen tuloksen kuin mitä saatiin nykyarvomenetelmällä HFV-kuivaamoinvestointivaihtoehtoja tarkasteltaessa.

Esimerkin lähtöarvot ovat samat kuin nykyarvomenetelmässä. Tarkasteltavaksi korkokannaksi valittiin 8 % laskentakorko. Kuviosta 49 nähdään, että ainoastaan 30 kW kuivaamoinvestointi jää kannattamattomaksi aihion markkinahinnan ollessa 600 eur/m<sup>3</sup>.



Kuvio 49. Investoinnin suhteellinen nykyarvo 8 %:n laskentakorolla, kun aihoiden markkinahinnat ovat 600, 800 ja 1000 eur/m<sup>3</sup>.



## 7 YHTEENVETO

Tuoreen koivun kuivaus muutamassa tunnissa puusepäнкуivaksi aihoksi ilman kuivausvirheitä on tutkimuksessa saatujen tuloksien mukaan mahdollista. Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen kehittämä HFV-kuivausmenetelmä luo uusia mahdollisuuksia pieniläpimittaisen koivun hyödyntämiselle puusepänteollisuuden raaka-aineena. Suurin kustannushyöty saavutetaan pyöreiden sorvausaihioiden valmistuksessa, joiden tuottamiseen menetelmä sopii erinomaisesti. Sydänkeskeistä raaka-ainetta voidaan käyttää myös huonekaluteollisuuden komponenttivalmistuksessa, varsinkin jos raaka-aineena käytetään paksumpaa koivun tyvitukkia.

Mikäli HFV-kuivausta tarkastellaan sahatavaralähtöisesti, ovat menetelmän kuivauskustannukset huomattavasti korkeampia kirjallisuustutkimuksen lähdeaineistoon verrattuna. On selvää, että HFV-kuivaus ei ole kilpailukykyinen kuivausmuoto sahatavarakuivauksessa. Menetelmän kannattavuus perustuu edulliseen raaka-aineeseen ja jatkojalostuksen vähäisiin työvaihekustannuksiin. HFV-kuivauksella tuotetut sorvausaihiot ovat hyvä esimerkki pyöreän sydänkeskeisen koivun hyödyntämisestä uudella tavalla.

Nopea kuivausmenetelmä mahdollistaa tuotteiden valmistusprosessin muuttamisen perinteisestä tuotantotavasta joustavaan tilauskohtaiseen tuotantomalliin. Raaka-aineen pitkät kuivaus- ja varastointiajat eivät ole enää määrävissä asemassa tuotannonsuunnittelun kannalta, vaan uuden kuivausmenetelmän myötä voidaan toimia pienemmillä raaka-aine- ja välivarastoilla. Tämä alentaa raaka-aineen pääomakustannuksia ja mahdollistaa entistä nopeammat toimitusajat sekä joustavamman tuotantomallin.

Yhtenä huomion arvoisena seikkana voidaan pitää kuivattavan pyöreän puutavaran pituutta, joka laboratoriokuivaamossa on maksimissaan 800 mm. Tuotantolaitteistossa pyöreän puutavaran maksimimittaa voidaan pidentää kolmanneksella eli maksimipituudeksi tulisi noin 1100-1200 mm. Puutavaran pituusmitan rajaehto

koskee vain pyöreää puutavaraa, jolloin puutavaran kuivaussuunta on oltava poikittain elektrodilevyihin nähden. Särmätyjen aihoiden kuivaus voidaan järjestää pitkittäin elektrodilevyihin nähden, jolloin pituusmitalla ei ole varsinaista raja-arvoa.

Yrityskyselyn tuloksista voidaan vetää johtopäätös, että HFV-kuivaus tarjoaa huomattavia etuja nopean kuivaustavan ja varastointitarpeen vähentymisen kautta. Myös raaka-aineen edullisuus ja työstötarpeen vähentyminen koetaan etuna aihionvalmistuksessa. Yrityksiltä kysyttiin myös sorvausaihioiden valmistuskustannuksia perinteisillä valmistustavoilla. Yritysten antamat valmistuskustannukset olivat huomattavasti korkeampia kuin HFV-kuivauksella tuotettujen aihoiden kustannukset, valmistuskustannuksien yhteenveto on esitetty kuviossa 40.

Koska kuivaamoinvestointi vaatii siihen ryhtyvältä yritykseltä suuria panostuksia, ovat investoinnin lähtökohdat ja tarvittavat laskelmat aina yrityskohtaisia. Tässä tutkimuksessa on pyritty esittämään investointiesimerkkejä eri tuotantokapasiteetin omaaville kuivaamolaitteistoille. Koska kassavirtalaskelmat perustuvat uuteen tuotteeseen - sydänkeskeiseen pyöreään sorvausaihioon, päädyttiin malliin, jossa tuotteella on kolme mahdollista markkinahintaa, joiden valossa investoinnin kannattavuutta on tarkasteltu. Investointilaskentamenetelmiksi on valittu takaisinmaksuaika ja nykyarvomenetelmä, joka ottaa huomioon rahan aika-arvon. Investointivaihtoehtojen vertailua 8 % korkokannalla on lisäksi tarkasteltu suhteellisen nykyarvon menetelmällä. Tarkasteltu korkokanta on sama, jota on käytetty myös kustannuslaskennassa.

Pienimmän laskelmiin mukaan otetun HFV-kuivaamon RF-teho on 30 kW ja sen vuotuinen tuotantokapasiteetti on alle 200 kuutiota. Laskelmien perusteella voi todeta kokoluokan hinnan olevan korkea suhteessa sen tuotantokapasiteettiin, koska tuotantokapasiteetin kaksinkertaistamisen hintavaikutus on alle 10 % kuivaamon hankintahinnasta. Kuivaamon takaisinmaksuaika muodostui huomattavasti muita vaihtoehtoja pidemmäksi ja se osoittautui kannattavaksi vasta lopputuotteen korkeammilla markkinahinnoilla, kun tuottotavoitteena käytettiin 8 %:n

laskentakorkoa. Mikäli lopputuotteiden markkinahinta osoittautuu yrityskohtaisissa laskelmissa riittävän korkeaksi tai tyydyttään pienempään investoinnin tuotto- tasoon, saattaa tämäkin vaihtoehto olla perusteltu, jos laitteiston kapasiteetti on muutoin yrityksen tarpeisiin oikean kokoinen.

60 kW HFV-kuivaamo on hyvin kiinnostava investointivaihtoehto, sillä sen generaattorin jäähdytys on toteutettu ilmajäähdytyksellä, joka voi laitevalmistajan mukaan olla yksi kuivaamon hankintahintaa laskeva tekijä. Takaisinmaksuaika on parhaimmillaan alle kaksi vuotta ja se osoittautuu nykyarvomenetelmällä tarkasteltuna kannattavaksi kaikilla oletetuilla markkinahinnoilla, jopa 22 %:n laskentakorkoa käytettäessä.

Kahdella suurimmalla kuivaamovaihtoehdolla takaisinmaksuajat liikkuvat välillä 0.7 – 2.2 vuotta, jotka ovat tämän kokoisissa investointihankkeissa hämmästyttävän lyhyitä. Suurimman kokoluokan kuivaamoinvestoinnin nykyarvo on yli kaksinkertainen 100 kW kuivaamoon nähden. Voidaankin sanoa, että mikäli investoinnilla ei ole pääomarajoitetta, kannattavimmaksi hankkeeksi osoittautuu suurimman kokoluokan kuivaamolaitteisto.

## 7.1 SUOSITUKSET JATKOTUTKIMUKSELLE

Kuivausprosessia on tutkittu ja kehitetty pääasiassa kokeiluluonteisesti ja onnistumisien kautta on päästy tutkimuksessa eteenpäin. Tämä johtuu siitä, että ko. teknologiasta ei ole löytynyt yksityiskohtaista tutkimustietoa, jota olisi voitu hyödyntää menetelmäkehityksessä. RF-kuivauksesta on kirjoitettu yleisellä tasolla joitakin tutkimuksia, joihin on viitattu luvussa 3.1. Pyöreiden koivuaihoiden kuivauksessa RF-kentän tehotiheys on kuitenkin moninkertainen ja kuivausajat huomattavasti lyhyempiä, joten kirjallisuuslähteiden tutkimustuloksia ei ole voitu hyödyntää kuivausmenetelmän kehitystyössä. Tutkimustuloksilla, jotka ovat muodostuneet tämän kehitysprojektin aikana mahdollistavat HFV-kuivauksen teknisen toteutuksen. Laajat koekuivausmateriaalit ja riittävät määrät toistoja

varmistavat, että niiden perusteella kyetään valmistamaan toimiva kuivauslaitteisto tuotantomittakaavalla toteutettuna.

Tähänastisesta tutkimuksesta huolimatta ovat HFV-kuivaustutkimukseen käytetyt resurssit olleet varsin vähäisiä. Menetelmän jatkokehityksen kannalta olisi tärkeää saada käynnistettyä useita eri tutkimushankkeita, joilla varmistetaan kuivausmenetelmän jatkokehitys ja HFV-kuivauksen yleistyminen kotimaassa. Tutkimusalueita löytyy niin menetelmän kaupallistamisesta kuin kuivauksen menetelmäkehityksen puoleltakin.

Tavoitteena tulisi olla yhteistyön tekeminen niiden tahojen kanssa, jotka pystyvät varmistamaan uuden kuivausmenetelmän jatkokehityksen. Yhtenä vaihtoehtona voitaisiin tutkia verkostokuivauksen toteuttamiskelpoisuutta HFV-kuivauksen ympärille. Hankkeen ajatuksena voisi olla, että siihen osallistuisi ryhmä pk-yrityksiä, jotka hyötyisivät HFV-kuivauksen eduista. Investointi voitaisiin toteuttaa yhteisinvestointina tai alihankintaverkostona, jolloin kuivaamoinvestoinnin tekijänä toimisi aihiovalmistaja, joka tuottaisi verkostolle pyöreitä sorvausaihioita.

Edellä mainitut lähtökohdat antaisivat hyvät mahdollisuudet tutkia alueellista tai yli aluerajojen toimivan verkostokuivauskonseptia, joka voisi tuottaa edullista ja hyvälaatuista koivuraaka-ainetta sorvaus- ja aihiovalmistuksen pk-yrityksille. Verkoston suunnittelussa ja rakentamisessa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi puualan osaamiskeskusten synergiaetuja (Lahti-Seinäjoki) ja syventää kyseisillä alueilla toimivien yritysten välistä yhteistyötä. Ylimaakunnallisen hankkeen toteuttamista tukisi muutama merkittävä seikka: Päijät-Hämeessä sijaitsevat laajat raaka-ainevarannot ja alueella toimii koivuaihiotuottajia, kun taas Pohjanmaalla on sorvituotteiden valmistusta huomattavasti Päijät-Hämettä enemmän.

## LÄHDELUETTELO

Aho, Lassi. Suurtaajuuskuivatun koivun ominaisuudet, Insinööriyö. LAMK. Lahti 2000.

Aho, Teemu. Investointilaskelmat. Weilin+Göös. Vaasa 1989.

Avramidis, S. and. Ziwick, R.L. Exploratory radiofrequency/vaccum drying of three B.C. coastal softwoods. Forest Prod. J., 42, 7/8: 17-24. 1992

Bodie, Zvi & Merton, Robert C. Finance. Upper Saddle River. New Jersey 2000.

Djakonov, K. F., Gorjaev, A. A., Wood drying with high frequency current. Forest Management Publishing. Moskova 1981.

EDG-Recommendation, Assessment of drying quality of timber, pilot edition (for testing) 23.10.1994. Editor dr. J. Welling.

European Drying Group, 1994: EDG-recommendation - Assessment of drying quality of timber.

Forsén, Holger & Tarvainen, Veikko. Sahatavaran jatkojalostuksen asettamat vaatimukset kuivauslaadulle ja eri tuotteille sopivat kuivausmenetelmät. VTT Publications 517. 69s. Espoo 2003.

Heino, Petri. Ympäristösuojelun vuosikirja. Puuteollisuus vuoden 2002 tilastot. Helsinki 2002.

Hukka, Antti. Drying cost and quality with different types of drying kilns. COST-E15 annual conference, Helsinki, Finland. pp. 1-8. 2001.

Isomäki, Olavi. Suurtaajuusalipainekuivaus. Puutekniikka 4 1999.

Kobayashi, Y., Miura, I., Kawai, Y. 1999a: High performance drying using combination of HF and hot air under atmospheric pressure. Proceedings of 6th International IUFRO Wood Drying Conference, Stellenbosh, South Africa. pp. 18-21. 1999.

Koppelman, E. Process and apparatus for seasoning of wood. U.S. Patent 3,986.268. U.S. Patent Office, Washington DC 1945.

Kotikangas, Kauko. Sahatavaran kuivaus alipaineessa. Wood Working Puuntyöstö N:o 4-5 1998.

Kärkkäinen, Matti. Puutiede. Sallisen Kustannus Oy. Hämeenlinna 1985.

Kärri, Timo. Uusi-Rauva, Erkki. Investointiprojektin kustannussuunnittelun perusteet. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. LTKK tuotantotalouden osaston opetusmoniste. Lappeenranta 1992.

Lehtonen, Juha-Matti. Tuotantotalous. WSOY. Vantaa 2004.

Lindblad, Jari. Tammiruus, Vesa. Kilpeläinen, Harri. Lehtimäki, Jani. Heräjärvi, Henrik. Verkasalo, Erkki. Pieniläpimittaisen koivun hyödyntäminen huonekaluteollisuuden tarpeisiin. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 899. Joensuu 2003.

Luikov, A. V. and Mikhailov, Y. A. *Theory of Energy and Mass Transfer*. Revised English Edition, Pergamon Press, Oxford 1965.

Luikov, A.V. Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press. Oxford 1966.

Luostarinen, Katri. Asikainen, Antti. Möttönen Veikko. Koivusahatavaran värinmuutokset kuivauksessa. Joensuun yliopisto. Metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 134. Joensuu 2001.

Luth, H.J. Krupnick, S.R.. Method and apparatus for drying lumber. U.S. Patent 2,387.595. U.S. Patent Office, Washington DC 1945.

Paajanen, Tero. Sahatavaran kuivauksen kehittäminen teollisuudessa, lisenssiaattityö. TKK. Helsinki 1990.

Pellinen, Matti. Mekaanisen metsäteollisuuden energiahankinnan vaihtoehdot, diplomityö. TKK. Helsinki 1996.

Resch, H., Gautsch, E. Drying of lumber in vacuum using dielectric heating. Proc. 2nd. Workshop COST E15 "Quality drying of Hardwood", Univ. of West-Hungary, Sopron. 2000.

Riekkinen, Mika. Kärki, Timo. Koivun kuivausmenetelmät 2000-vuosituhannele. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 810. Joensuu 2001.

Salin, Jarl-Gunnar. Sahatavaran kuivauksen mallien ja laskentarutiinien kehittäminen. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Valtion painatuskeskus. Sarja D:166. Helsinki 1989.

Sanström, Jaana. Strategisten tuotannollisten investointien suunnittelun ohjaus konserniympäristössä, lisenssiaattityö. LTKK. Lappeenranta 1994.

Siau, J.F. 1983. A proposed theory for nonisothermal unsteady-state transport of moisture in wood. Wood Sci, Technol. 17(1):75-77.

Siimes Heikki. Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980-1982. Sahatavaran kuivauskäsikirja. VTT, tiedotteita. Espoo 1983.

Siimes, Heikki. Tarvainen, Veikko. Peräniitty, Markku. Suurtaajuuskuivauksen käyttömahdollisuudet mekaanisessa metsäteollisuudessa. Imatran Voima Oy, Tutkimusraportteja IVO-A-04/86. Helsinki 1986.

Stanish, M.A., Schajer, G.S., Kayihan, F. A mathematical model of drying for hygroscopic. porous media. AICHE Journal, Vol. 32, No 8, pp 1301-1311, 1986.

Stein, Hellem. Investment in drying Kilns for Lumber, A case study; A comparison between modern kilns with the same annual drying capacity (Käännös Stein Hellemin esitelmästä Bangkokissa lokakuussa 1998). Wood Working Puuntyöstö N:o 10 1998.

Wagenfuhr, R. Holzatlas. 4 Verlag. WEB Fachbuchverlag Leipzig. 688s. 1996.

Viitaniemi P., Jämsä S., Koskela K., Suomi-Lindberg L. ja Metsä S. Modifioidun puun reaktiomekanismit. Raportti 2. Metsäalan tutkimusohjelma Wood Wisdom. Helsinki 2000.

Zhangjing Chen. Primary Driving Force in Wood Vacuum Drying. Virginia. 1997.

Zwick, R.L. Avramidis, S. Q-sift - a novel processing approach to meet the end-user's requirements for wood moisture content. COST-E15 annual conference, Helsinki, Finland. pp. 94-103. 2001.

## SÄHKÖISET LÄHTEET

HeatWave Technologies inc. [HeatWave Technologies inc:n www-sivuilla]  
[viitattu 15.6.2004].

Saatavissa: <http://www.heatwave.com/index.htm>

Peace River Timothy Inc. [Peace River Timothy Inc:n www-sivuilla]  
[viitattu 15.6.2004].

Saatavissa: <http://www.prti.net/index.html>



Suomen pankki, Tilastokatsaus 5/2005, [Suomen Pankin www-sivuilla]  
[viitattu 18.5.2005].

Saatavissa: [http://www.bof.fi/fin/5\\_tilastot/5.2\\_Tilastojulkaisut/RAMATI/Ur0505.pdf](http://www.bof.fi/fin/5_tilastot/5.2_Tilastojulkaisut/RAMATI/Ur0505.pdf)

TekmaWood Oy. [TekmaWood Oy:n www-sivuilla]  
[viitattu 2.7.2003].

Saatavissa: [http://www.tekmawood.fi/index\\_tekmawood.html](http://www.tekmawood.fi/index_tekmawood.html)

#### HAASTATTELUT

Kotikangas, Kauko. Projektiryhmän jäsen, IVO Teknologiakeskus (Fortum)

Lahtinen, Timo Antero. Projektipäällikkö, YTI-tutkimuskeskus. Puhelinhaastattelu 25.5.2004

Lehti, Antero. Toiminnanjohtaja, Salpausselän metsänhoitoyhdistys. Puhelinhaastattelu 5.2.2004

Tetri, Timo. Tuotepäällikkö, TekmaWood Oy.  
Sähköpostiviesti 31.1.2004

## LIITTEET

## LIITE I, 1

## ARVOISA PUUALAN TOIMIJA

## PYÖREÄN SORVAUSAIHION VALMISTUS

Olemme Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitoksen puutekniikanosastolla tutkineet pyöreän koivun kuivausta jo useamman vuoden ajan. Koekuivauksien perusteella olemme päätyneet siihen, että kuivaus tulee suorittaa mahdollisimman nopeasti, jotta värivirheiltä vältyttäisiin. Käytännössä tämä tarkoittaa alle 4 tunnin kuivausaikaa. Näin nopeaan kuivaukseen mahdollistaa laitoksellamme sijaitseva HFV -kuivaamo. Tällä tekniikalla saadaan koivun väri pysymään vaaleana ja aihiot saadaan kuivattua ilman kuivaushalkeamia. Olemme selvittämässä HFV-kuivauksella tuotettujen sorvausaihioiden valmistuskustannuksia, kun raaka-aineena voidaan käyttää kaatotuoretta pyöreää pienpuuta.

Tämän kyselyn tarkoituksena on kerätä vertailutietoa perinteisellä tavalla tuotetuista sorvausaihioista. Kaikki tiedot käsitellään ehdottoman luottamuksellisesti, eikä raportista pysty tunnistamaan yksittäisen yrityksen tietoja.

Tämä tutkimus kuuluu Lappeenrannan Teknillisen yliopiston puitteissa suoritettavaan tutkimustyöhön. Tutkimuksen suorittajana on ins. Jari-Pekka Suominen Lahden ammattikorkeakoulusta.

Pyydämme teitä ystävällisesti vastaamaan oheisiin kysymyksiin ja palauttamaan kyselylomakkeen täytettynä 24.10.2003 mennessä oheisessa palautuskuoressa osoitteeseen:


Lahden ammattikorkeakoulu  
Tekniikan laitos  
Jari-Pekka Suominen  
Ståhlberginkatu 10  
15110 Lahti

Kaikille vastanneille lähetämme tarkemmat vertailulaskelmat eri valmistusmenetelmien kustannuksista sekä tiivistelmän HFV-kuivauksen tutkimustuloksista. Mikäli teillä on kysymyksiä tutkimukseen tai kyselylomakkeeseen liittyen, vastaan mielelläni kysymyksiinne puh. 03-8283036, 050-5020696 tai sähköpostitse **jari.suominen@lamk.fi**

Vastauksestanne kiittäen

Jari-Pekka Suominen


## LIITE II, 1

 <b>LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU • Lahti Polytechnic</b>					
<b>KYSELYLOMAKE</b> , palautetaan 14.11.2003					
<b>YRITYSTIEDOT</b>					
Yrityksen nimi					
<i>Osoite</i>					
Katuosoite					
Postinumero					
Postitoimipaikka					
<i>Muut yhteystiedot</i>					
www-osoite					
Puhelin (keskus / yhteyshenkilö)	+358				
Faksi	+358				
<i>Yhteyshenkilö</i>					
Titteli / tehtävä					
Sukunimi					
Etunimi					
Sähköposti					
Matkapuhelin	+358				
<b>Lyhyt kuvaus liiketoiminnasta</b>					
Yrityksen perustamisvuosi					
Henkilöstön kokonaismäärä					
<i>Rastita (1000 eur)</i>	Ei lv: a	alle 100	100 - 500	500 - 2000	yli 2000
Liikevaihto(myynti) 2002					
Liikevaihto(myynti) 2003, arvio					
<b>Yrityksen päätuotteet</b>					
Vuotuinen puunkäyttö (m <sup>3</sup> )					
- koivun osuus siitä (%)					
Vuotuinen kuivauskapasiteetti (m <sup>3</sup> )					
<small>TEKNIKAN LAITOS  Ståhlberginkatu 10 • 15110 Lahti • Puh. (03) 828 19 • Faksi (03) 828 3015 • <a href="http://www.lamk.fi/il">www.lamk.fi/il</a></small>					

## LIITE II, 2

HFV-KUIVAUS						
HFV-kuivaus on menetelmä, jolla voidaan kuivata sydänkeskeisiä lehtipuuaihoita ilman kuivausvirheitä. Nopea kuivaus kaatotuoreesta huonekalukuivaksi on mahdollista hyödyntämällä alipaine- ja suurtaajuustekniikkaa. Tehtyjen kokeiden mukaan lopputuotteet säilyttävät muotonsa eivätkä halkea.						
Seuraavassa kysytään mielipidettänne HFV-kuivauksesta ja sen tuomista eduista aihio- ja tuotevalmistuksessa.						
<i>Rastita</i>	1 täysin eri mieltä	2 jokseenkin eri mieltä	3 en osaa sanoa	4 jokseenkin samaa mieltä	5 täysin samaa mieltä	Kommenttirivi
Tunnen HFV-kuivauksen toimintaperiaatteen, sen mahdollisuudet ja rajoitteet.						
Nopea 4 tunnin kuivaus lisää tuotannon joustavuutta.						
Sydänkeskeisen koivun hyödyntäminen alentaa aihoiden valmistuskustannuksia.						
Tuoretta koivurunkoa on saatavilla läpi vuoden.						
Kuivattavan kappaleen pituus (1m) on riittävä.						
1000 m <sup>3</sup> vuosikapasiteetti on HFV-kuivaamolle riittävä.						
Käyttäisittekö tuotteissanne sydänkeskeistä koivua, mikäli sitä olisi saatavilla kuivattuna?						
HFV-kuivaamo soveltuisi hyvin tuotantomme.						
Mitä etuja nopea kuivaus toisi yrityksellenne?						
Mitä etuja tuoreen koivun käyttö toisi yrityksellenne?						
Missä tuotteissa sydänkeskeistä koivua voitaisiin hyödyntää parhaiten?						
Miten hyödyntäisitte suuria koivurunkoja (Ø 30-40 cm), kun ne saadaan kuivattua ilman kuivaushalkeamia?						
Mikä olisi riittävä kuivauskapasiteetti sydänkeskeiselle puutavaralle teidän yrityksessänne?						

## LIITE II, 3

SORVAUSAIHION RAKENNE JA HINNOITTELU				
Seuraavassa osiossa kysytään sorvausaihioiden valmistuskustannuksia perinteisillä valmistusmenetelmillä sekä aihioista saatavaa markkinahintaa. Mikäli tarkkoja laskelmia ei voida tai haluta esittää, voitte ilmoittaa arvion kysytystä asiasta.				
Kaikkien sorvausaihioiden pituus on 800 mm				
Aihion koko	Piirrä ehdotus rakenteesta	Valmistuskustannukset	Markkinahinta	Kuva sydänkeskeisestä lopputuotteesta
70 x 70				
100x100				
130x130				
Yrityksenne kehittämisen kannalta suurimpia haasteita ovat tällä hetkellä:				

## LIITE II, 4

Olemme kiinnostuneita saamaan lisätietoa Tekniikan laitoksen projekteista ja palveluista:

- Haluan näytteen HFV-kuivatusta koivusta
- HFV-kuivaus
- Kuivaus / lämpökäsittely
- Puuteknologian tutkimus- ja testauspalvelut
- Huonekalutestaus

**Lomakkeen palautus:**  
**Lahden ammattikorkeakoulu**  
**Tekniikan laitos**  
**Jari-Pekka Suominen**  
**Ståhlberginkatu 10**  
**15110 Lahti**  
**tai**  
**fax 03 828 3015**  
[jari.suominen@lamk.fi](mailto:jari.suominen@lamk.fi)