

Holger Forsén & Veikko Tarvainen

Sahatavaran jatkojalostuksen
asettamat vaatimukset
kuivauslaadulle ja eri tuotteille
sopivat kuivausmenetelmät

VTT PUBLICATIONS 517

Sahatavaran jatkojalostuksen asettamat vaatimukset kuivauslaadulle ja eri tuotteille sopivat kuivausmenetelmät

Holger Forsén & Veikko Tarvainen
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-6263-1 (nid.)

ISSN 1235-0621 (nid.)

ISBN 951-38-6264-X (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

ISSN 1455-0849 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2003

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT

puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT

tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

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

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT

puh.vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7027

VTT Bygg och transport, Träkarlsvägen 2 A, PB 1806, 02044 VTT

tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7027

VTT Building and Transport, Puumiehenkuja 2 A, P.O. Box 1806, FIN-02044 VTT

phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7027

Toimitus Leena Ukskoski

Otamedia Oy, Espoo 2004

Forsén, Holger & Tarvainen, Veikko. Sahatavaran jatkojalostuksen asettamat vaatimukset kuivauslaadulle ja eri tuotteille sopivat kuivausmenetelmät [Drying quality requirements in sawn timber refining and suitable drying methods for different products]. Espoo 2003. VTT Publications 517. 69 s. + liitt. 9 s.

Avainsanat sawn timber, sawn lumber, sawmills, raw materials, upgrade, refining, deformation, kiln, drying, drying methods

Tiivistelmä

Sahatavaran jatkojalostuksessa on ensiarvoisen tärkeää, että raaka-aine on kuivattu niin, että tuotteeseen ei synny haitallisia muodonmuutoksia sen valmistusprosessissa eikä loppukäyttökohteessa, kuten esimerkiksi rakoja lautalattiaan, liimalevyn kupertumista tai osien yhteensopimattomuutta kokoonpanovaiheessa.

Tutkimuksessa selvitettiin viidessä case-tapauksessa jatkojalosteen raaka-aineelle asetettavat kuivauslaatuvaatimukset, jotka täyttämällä jatkojalostuksen ja loppukäytön ongelmat voidaan välttää. Jatkojalostusprosessit ja -tuotteet olivat ikkunoiden ja ovien karmien valmistus, elektrostaattinen maalaus, liimapuupalkit, paneelit ja lattialaudat sekä sormijatkaminen.

Kaikille on yhteistä, että keskikosteuden tulisi olla mahdollisimman lähellä loppukäyttökohteen tasapainokosteutta muodonmuutosten ja rakenteisiin syntyvien jännitysten ehkäisemiseksi. Toisaalta maalaukselle, höyläykselle ja liimaukselle on kullekin omat optimaaliset puunkosteudet, joten jossain määrin tulee tehdä kompromisseja parhaan lopputuloksen aikaansaamiseksi. Esimerkiksi huonekaluraaka-ainetta joudutaan höyläämään ja maalaamaan alemmassa kosteudessa kuin prosessin kannalta olisi edullisinta.

Nopeasta kuivauksesta johtuva pintakovuus (case hardening) aiheuttaa puuta työstettäessä haitallisia muodonmuutoksia, kuten esim. sahatavarasta halkaisemalla ja höyläämällä tehtyjen paneelien kupertumista. Maltillisella kuivauksella ja tasaannutuksella on haluttu case hardening -taso saavutettavissa. Tehdyn kyselytutkimuksen mukaan pintakovuudelle ei osata asettaa vaatimuksia. Tämän laatukriteerin tunnetuksi tekeminen ja käyttöönotto vähentäisi ongelmia jatkojalostuksessa ja loppukäytössä ja parantaisi osaltaan puun imagoa.

Kamarikuivauksen sekä yksi- ja kaksivaiheisen kanavakuivauksen soveltuvuusalueet sahatavaran paksuuden ja tavoitekosteuden suhteen selvitettiin kamarikuivauksen ja kaksivaiheisen kanavakuivauksen simulointimallien avulla. Kuivauskustannuksista otettiin huomioon pääoma- ja energiakustannukset. Tarkastelussa vakioitiin loppukosteus ja sen hajonta sekä halkeilun määrä.

Tulokset tukevat vallitsevaa käsitystä, jonka mukaan kaksivaiheinen kanavakuivaamo on kustannustehokas 50 mm:n ja sitä ohuemman tavaran kuivaamiseksi jopa puusepäнкуivaksi. Paksumpaa tavaraa voidaan vientikuivata kanavissa, mutta laadullisesti parhaaseen tulokseen jonkin verran korkeammin kustannuksin päästään kamarikuivaamalla. Tulokset osoittivat, että 1-vaiheinen kanavakuivaamo on oikein mitoitettuna edelleenkin paras vaihtoehto 50 mm paksun ja sitä ohuemman tavaran vientikuivaukseen ja joissakin tapauksissa jopa puusepäнкуivaukseen.

Forsén, Holger & Tarvainen, Veikko. Sahatavaran jatkojalostuksen asettamat vaatimukset kuivauslaadulle ja eri tuotteille sopivat kuivausmenetelmät [Drying quality requirements in sawn timber refining and suitable drying methods for different products]. Espoo 2003. VTT Publications 517. 69 p. + app. 9 p.

Keywords sawn timber, sawn lumber, sawmills, raw materials, upgrade, refining, deformation, kiln, drying, drying methods

Abstract

In sawn timber refining it is important that raw-material has been dried in a way that there are no deformations in a product. This is important in product's production process as well as in its target of usage. Deformations may cause for instance cracks in wooden plank floor, convexity in edge glued panels or non compatible wooden components in assembly line.

In this research we have found out drying quality requirements for raw material in five case studies. With these drying quality requirements it is possible to avoid problems in sawn timber refining and in end use. The wood refining processes were production of wooden windows and doors, electrostatic painting and fingerjointing. The refined products were windows, doors, glulam beams, panels and floorboards.

All products and processes had a requirement in common: average moisture content should be as close as possible to equilibrium end moisture content to prevent wood products from deformations and structural tensions. On the other hand there are optimal wood moisture contents for painting, planing and glueing. In there moisture contents there is a need to compromise to achieve the best results. For instance they need to plane and paint raw material for furniture in a lower moisture content than it would be favourable for the process.

Case hardening which results from fast drying causes those not desired deformations like for instance convexity when sanw timber has been split and planed for panels. With moderate drying and seasoning we can reach a desired case hardening level. We did a case hardening survey which tells that they find it difficult to set requirements for case hardening. However, there is a possibility to promote

this quality requirement in a way where they would take the requirement into use. This would cut down problems in refining and end use and simultaneously improve image for wood raw material.

We explained suitability for chamber kiln drying as well as both one and two stage channel kiln drying to be used to achieve targets in sawn timber thickness and target moisture content by simulation models. Capital and energy costs were taken into account as a part of drying costs. In this study we standardized end moisture content and its distribution as well as amount of cracking.

The results support the dominant assumption, which says that two stage channel drying kiln has high cost efficiency for drying thicknesses of 50 mm and less for moisture contents of joinery products. Thicknesses more than 50 mm can be dried in channel kilns but to some extent better quality can be achieved by chamber kilns. The results show that one staged channel kiln with proper dimensions is still the best opportunity for sawn timber with thicknesses of 50 mm and less for moisture contents of export products and, in some cases, for moisture contents of joinery products, too.

Alkusanat

Sahatavaran jatkojalostus ja ongelmaton loppukäyttö edellyttää, että sahatavara on kuivattu oikein. Sopiva ja mahdollisimman taloudellinen kuivausmenetelmä riippuu halutusta kuivauslaadusta ja sahatavaran dimensiosta. Tässä tutkimuksessa on Wood Focus Oy:n Valutec Oy:n ja Tekesin rahoittamana selvitetty jatkojalostuksen ja loppukäytön asettamia vaatimuksia kuivauslaadulle sekä millä kuivausmenetelmillä eri tapauksissa haluttuun kuivaustulokseen päästään.

Johtoryhmään kuuluivat Seppo Vainio (puheenjohtaja) / Stora Enso Timber Oy, Ismo Heinonen / Vapo Timber Oy, Antti Hukka / Valutec Oy, Timo Pöljö / Finnforest Oyj, Heikki Ruohonen / UPM-Kymmene Oyj, Hannu Suni / Kohiwood Oy, Jukka Ala-Viikari ja Aarni Metsä / WoodFocus Oy sekä Alpo Ranta-Maunus / VTT.

Haluamme esittää johtoryhmälle parhaat kiitokset työn suuntaamisesta ja sen kuluessa annetuista neuvoista. Lisäksi haluamme kiittää Kohiwood Oy:tä ja Skaala Ikkunat ja Ovet Oy:tä koemateriaalien valmistuksesta.

Veikko Tarvainen

Holger Forsén

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Alkusanat	7
1. Johdanto	11
2. Tutkimuksen toteutus.....	13
3. Kosteuslaatustandardit ja RT-kortit	14
4. Kysely jatkojalosteiden raaka-aineen kuivauslaatuvaatimuksista	19
5. Kuivauslaadun vaikutus lopputuotteen laatuun	24
5.1 Liimalevy.....	25
5.2 Sähköstaattinen maalaus.....	29
5.3 Verhouspaneeli	30
5.4 Liimapuupalkki.....	32
5.5 Sormijatkettu sahatavara	36
5.6 Ovien ja ikkunoiden valmistus	36
6. Kuivauslaadun, -ajan ja -kapasiteetin tarkastelu simulointimalleilla.....	38
6.1 Simulointimallit.....	38
6.2 Simuloidut kuivaamot	39
6.3 Simuloinnin koesuunnitelma	39
6.4 Tulokset	41
6.4.1 Kuivausajat.....	41
6.4.2 Kosteusgradientti ja kosteuden hajonta.....	45
6.4.3 Kuivauskapasiteetti	49
6.4.4 Energiankulutus.....	51
6.4.5 Kuivauskustannukset.....	53
6.5 Yhteenveto.....	62

7. Yhteenveto keskeisistä tuloksista	63
Loppusanat.....	66
Lähdeluettelo	68
Liitteet	
Liite A: Kysely jatkojalostuksen vaatimuksista sahatavaran kuivauslaadulle	
Liite C: Simuloinnin lähtöarvot ja laskentakriteerit	
Liite D: Energialaskennan lähtöarvot ja tulokset	

1. Johdanto

Sahatavaran jatkojalostuksessa on ensiarvoisen tärkeää, että raaka-aine on kosteudeltaan sopivaa niin, että tuotteeseen ei synny haitallisia muodonmuutoksia, kuten esimerkiksi rakoja laotalattiaan, liimalevyn kupertumista tai osien yhteen-sopimattomuutta kokoonpanovaiheessa.

EU-hankkeessa, johon myös VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka osallistui, on laadittu keskeisten eurooppalaisten puuntutkimuslaitosten yhteistyönä EDG:n kuivauslaatusuositukset (EDG-recommendation 1994), jotka ovat olleet perustana CEN-työryhmien laatiessa sahatavaran kosteuslaatusstandardeja. EDG:n kuivauslaatusuositukset sisältävät luokitukset kosteuden hajonnalle, sahatavaran pinnan ja keskiosan väliselle kosteuserolle (kosteusgradientille) sekä muodonmuutostaipumukselle halkaistaessa (casehardening, pintakovuus). Suositukset auttavat kuivauslaadun määrittämisessä, mutta niissä ei ole otettu kantaa, mikä kuivauslaadun tulisi eri jatkojalosteiden raaka-aineilla olla.

Suomen Puututkimus Oy:n (nykyinen Wood Focus Oy) toimeksiannosta tehtiin VTT Rakennustekniikassa vuonna 1998 esiselvitys kosteuslaadun vaikutuksesta järeämmästä sahatavarasta halkaisemalla ja höyläämällä valmistettujen paneelien ja lattialautojen kupertumiseen. Se antaa hyvän lähtökohdan tarkastella ko. tuotteiden sekä muidenkin jatkojalosteiden raaka-aineelle asetettavia kosteuslaatuvaatimuksia.

Sahatavaran kuivauslaadulle asetetaan joskus vaatimuksia "varman päälle", kun tarkkaa tietämystä jalostusprosessin ja lopputuotteen edellyttämästä kosteuslaadusta ei ole. Lisääntyneistä, yleensä perustelluista kosteuslaatuvaatimuksista ja alentuneista tavoitekosteuksista johtuen kuivauskapasiteetti on sahoilla usein pullonkaula. Kapasiteetin tehokas käyttö ja uusien kuivaamoiden hankintapäätöksien teko edellyttää oikean minimilaatuvaatimuksen tuntemista ja tiedon siitä, millä kuivausmenetelmällä mikäkin tavara kannattaa kuivata.

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa on tehty kamarikuivauksen simulointimalli LAATUKAMARI, joka on käytössä useilla sahoilla. Lisäksi on Valutec Oy:lle tehty kaksivaiheisen kanavakuivauksen simulointimalli. Kyseisillä malleilla voidaan analysoida teollisuudessa yleisimmät kuivausmenetelmät: yksi- ja kaksivaiheinen kanavakuivaus sekä kamarikuivaus. Simuloinnin etuna kuivausmenetelmien vertailussa verrattuna kokeelliseen tutkimukseen on mahdollisuus

eliminoida mm. kuivaamoiden teknisen kunnon ja puuraaka-aineen vaihtelun vaikutus tulokseen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ne eri jatkojalostusprosessien ja lopputuotteiden edellyttämät kuivauslaadut, jotka täyttävistä raaka-aineista ei synny ongelmia tuotteita valmistettaessa. Tutkimuksessa selvitettiin viiden tuoteryhmän (liimalevyt, seinäpaneelit, liimapuupalkit, ovet tai ikkunat ja lattialaudat) kohdalla, miten raaka-ainesahatavaralle asetettavat kuivauslaatuvaatimukset, sekä miten poikkeaminen niistä vaikuttaa lopputuotteeseen.

Toisena tavoitteena oli selvittää, millä nykyisin yleisesti käytössä olevilla kuivausmenetelmillä (kamari- sekä yksi- ja kaksivaiheinen kanavakuivaamo) mikäkin sahatavaraalaatu ja -dimensio tulisi kuivata, jotta tavoitekosteus ja haluttu kuivauslaatu saavutettaisiin taloudellisimmin. Valintaan vaikuttaa kuivauskustannusten lisäksi, kuinka suuria määriä eri tavaroita (sahatavaradimensiokosteusluokka) tuotetaan.

2. Tutkimuksen toteutus

Kirjallisuuden (standardit, RT-kortit, tuotelaatuvaatimukset) ja asiantuntija-haastattelujen perusteella tehtiin yhteenveto eri jatkojalosteiden edellyttämistä sahatavaran kosteuslaaduista. Lisäksi haastateltiin kuivaamovalmistajia ja sahojen kuivaushenkilöstöä kuivaamoiden investointikustannusten, kuivauskapasiteettien sekä tiettyjen kosteustasojen ja kosteuslaatuja edellyttämien kuivauskaavojen selvittämiseksi.

Jatkojalostuksen esimerkkitapauksissa selvitettiin minkä laatuista tavaraa sahoilta jatkojalostajille tulee. Ongelmia aiheuttaneiden raaka-aineiden kuivauslaatua analysoitiin syiden selvittämiseksi. Vaatimukset täyttämättömän raaka-aineen vaikutusta lopputuotteeseen tutkittiin tekemällä koekappaleita sekä myös laskennallisesti.

Simulointimallien avulla analysoitiin, millä kuivaamotyypeillä vaadittuihin kuivauslaatuihin voidaan päästä ja millä kuivaamoilla kuivaus kannattaa tehdä. Lähtökohdana olivat kuivaamovalmistajien esittämät tyypillisimmät kuivaamotavara-kuivauslaatu yhdistelmät.

Tulosten pohjalta laadittiin suositukset tarkasteltujen tuoteryhmien sahatavara-aineen kuivauslaatuvaatimuksista sekä kuivaamosuositukset eri käyttöön meneville tavaroille.

3. Kosteuslaatustandardit ja RT-kortit

Seuraavassa on tuoteryhmittäin katsaus sellaisista kansallisista ja EN-standardeista, joissa on esitetty kuivauslaatuvaatimuksia eri jatkojalosteiden sahatavararaaka-aineelle. Vaatimuksia on asetettu seuraaville kosteuslaadun osatekijöille:

- suurin ja pienin kosteus
- keskikosteuden vaihteluväli
- yksittäisen kosteusarvon vaihteluväli
- kosteusero yksittäisten kappaleiden välillä
- kosteusero puun pinnan ja keskiosan välillä (kosteusgradientti).

Taulukoissa 1–8 esitetään tuoteryhmittäin RT-korteissa, SFS-standardeissa sekä EN-standardeissa esitettyjä kuivauslaatuvaatimuksia.

Taulukko 1. Ikkunoiden ja ovien raaka-ainetta koskevat vaatimukset.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
SFS 4433 RT 41-10431 Puiset ikkunat ja tuuletus- luukut	valmistusvaihe 12 % raaka-aine 10 %	
SFS 4434 EHD Puuvien laatuvaatimukset	ulko-ovien raaka-aine max 12 % sisäovien raaka-aine max 10 %	Enintään 10 % puutavara- kappaleista saa ylittää tämän kosteuden

Taulukko 2. Liimatun massiivipuun raaka-ainetta koskevat kosteuslaatuvaatimukset.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
SFS-EN 385, sormijatkettu rakennesaha- tavara	8–18 % (joillakin liimoilla raja voi olla 23 %)	Liitettävien päiden kosteus- ero ei saa olla yli 5 prosent- tiyksikköä Liitettäessä puutavaran lämpötilan tulee liitoksen kohdalla olla vähintään 15 °C
SFS-EN 386, Liimapuu	laminaatin kosteus 8–15 % laminaattien kosteus 11–18 % kummassakin tapauk- sessa laminaattien välinen kosteusero max 4 prosent- tiyksikköä	

Taulukko 3. Puusepäntuotteiden raaka-ainevaatimukset kosteuden osalta.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
SFS-EN 942 Timber in joinery – General classification of timber quality ulkokäyttö sisäkäyttö	12–16 % lämmitys (12–21 °C) 9–13 % lämmitys (yli 21 °C) 6–10 %	Tiukempia arvoja saatetaan vaatia tietyissä kohteissa ja sovellutuksissa. Puusepäntuotteita, joiden kosteus on 6–10 % on saa- tavissa vain erikoistilauk- sesta tai sopimuksella. Tuotteet tulee erityisesti suojata ja varastoida oikean kosteuden säilyttämiseksi

Taulukko 4. Huonekaluraaka-aineen kosteuslaatuvaatimukset.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
RT 47-10681 Puukalusteet	valmistusvaiheessa < 10 % raaka-aine 8 %	

Taulukko 5. Höylättyä puutavaraa koskevat vaatimukset.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
RT 21-10750 Höylätty puutavara	yleensä 15–18 % erikoiskäyttö-tarkoitukset jopa alle 10 %	

Taulukko 6. Seinäpaneelit ja lattialaudat ym. tuotteet.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
RT 21-10626 Höylätyt laudat ja listat - ulkoverhouslaudat - sisäverhouslaudat - hirsiverhouslaudat - lattialaudat - listat	max 20 %, maalattava puuverhous max 15–20 % max 16 % max 10 %	erikoiskuivat lattialaudat höylätään vasta kuivauksen jälkeen, ja ne on varastoitava tilassa, jossa suhteellinen kosteus on alle 40 %
RT 82-10582 Puiset sisäverhoukset seinäpaneelit lattianpäällyste	asennusvaiheessa alle 16 % (RYL 90: 13–18 %) asennusvaiheessa alle 10 % (RYL 90: 8–12 %)	
RT 21-10492 Teollisesti pohjamaalatut ulko-verhouslaudat	alle 20 %	ennen pohjamaalausta puutavaran tulee olla esilämmitetty kokonaisuudessaan vähintään +5 °C:seen ja puun pinnan on oltava kuiva
RT 21-10539 Teollisesti maalatut sisäverhouslaudat ja puulistat	verhouslaudat 12–15 % lattialaudat alle 10 %	

Taulukko 7. Maalatut sisäverhouslaudat.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
RT 21-10539 Teollisesti maalatut sisäverhouslaudat ja puulistat Teollisen maalauksen maalausohjeita ja puuraaka-ainevaatimuksia A. Katot ja seinät 1. Asuin- ja julkiset tilat 2. Sauna ja pesuhuone B. Lattiat 1. Asuintilat 2. Asuintilat (loma-asunnot ja saunan pukutilat) C. Listat Asuin- ja julkiset tilat	lakkaus ja maalaus sekä sauna-suojaus mänty/kuusi alle 16 % lakkaus ja maalaus mänty/kuusi alle 10 % lakkaus mänty/kuusi alle 15–16 % lakkaus ja maalaus mänty/kuusi alle 16 %	

Taulukko 8. Muut tuotteet.

Standardi	Kosteusvaatimukset	Huom.
SFS 4895 (RT 14-10436) Hirsitalon laatuvaatimukset	höylähirsi 20 ± 4 % pyöröhirsi 22 ± 4 %	mitatut ja sallitut mittapoikkeamat koskevat hirssiä, joiden kosteus on 22 % puun kuivapainosta
Lamellihirret		

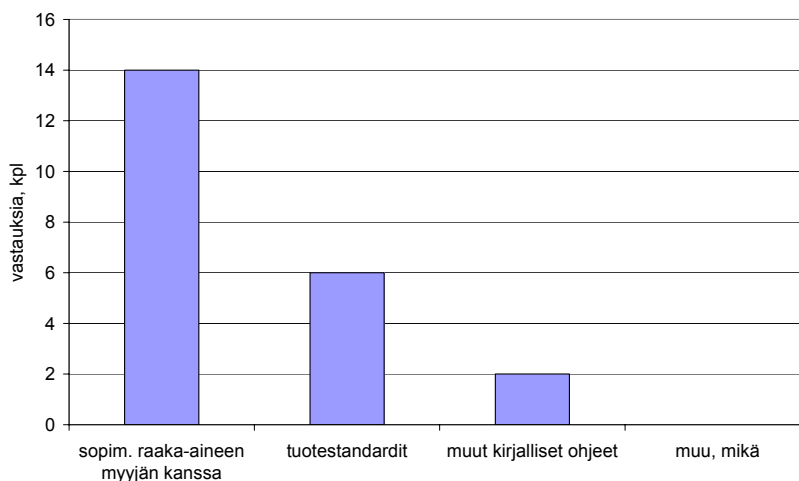
Taulukoissa 1–8 esitetyt kosteusvaatimukset ovat kappalekohtaisia. Toisin sanoen jokaisen kappaleen tulee olla kosteudeltaan annettujen rajojen sisällä. Lisäksi sormijatkoksilla ja liimapuupalkeilla on esitetty suurin sallittu liitettävien lamellien välinen kosteusero. Vaatimukset ovat selkeät. Vaihtoehtona on esittää vaatimukset keskiarvon vaihteluvälin ja sallitun hajonnan avulla. Esitystavan ongelma on se, että vaatimuksen hahmottaminen ei ole helppoa eikä vaatimus ole yksiselitteinen yksittäisen kappaleen kosteuden osalta. Laadunvalvonnassa ja suurien puumäärien käsittelyssä keskiarvo- ja hajontarajat sekä tilastolliset menetelmät on paras ratkaisu. Näin on asianlaita mm. tavaraa ostettaessa ja myytäessä. Sen sijaan jatkojalosteiden tuotannossa tulee varmistaa, että tuotteeseen ei tule yhtäkään liian kuivaa tai kosteaa kappaletta, jos se voi pilata koko tuotteen.

Vaatimuksissa ei ole esitetty rajoja kappaleiden sisäiselle kosteusjakautumalle. Monessa tapauksessa suuri kosteusero saheen pinnan ja keskiosan välillä voi aiheuttaa jatkojalostuksessa tai lopputuotteessa muodonmuutosongelmia. Olisi näin ollen suotavaa, että tuotekohtaisiin raaka-ainetta koskeviin laatuvaatimuksiin lisättäisiin vaatimukset kosteusgradientin ja etenkin pintakovuuden (casehardeningin) osalta. Casehardening indikoi sahatavaraa työstettäessä, etenkin halkaistaessa syntyvän muodonmuutoksen (kupertumisen). Kosteusgradientti määritellään yleensä $1/6$ ja $1/2$ syvyydellä olevien kosteuksien erotuksena.

4. Kysely jatkojalosteiden raaka-aineen kuivauslaatuvaatimuksista

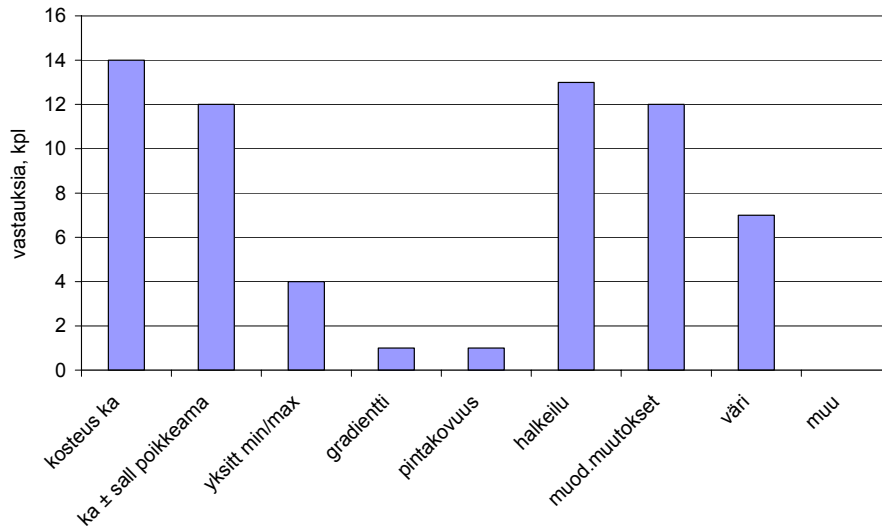
Yhteensä yli 100 liitteessä A esitettyä kyselylomaketta lähetettiin yrityksiin, jotka valmistavat erilaisia sahatavaran jatkojalostustuotteita. Vastauksia saatiin 33 kappaletta. Tulokset on esitetty kuvissa 1–5 ja taulukossa 1.

Suurimmassa osassa tapauksia kuivauslaatu perustuu ostajan ja myyjän väliseen sopimukseen tai tuotestandardeihin (kuva 1).



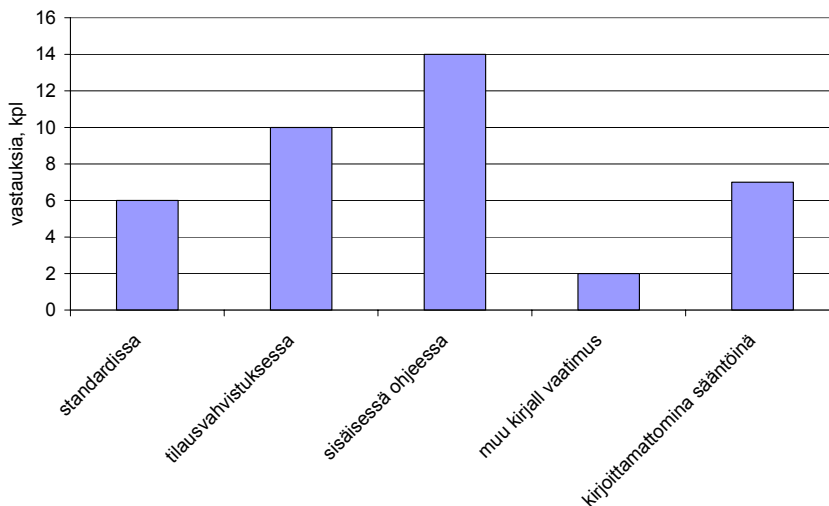
Kuva 1. Jatkojalostusraaka-aineen kuivauslaatuvaatimuksista sopiminen.

Kuivauslaatuvaatimukset kohdistuivat keskikosteuteen, kosteuden vaihteluväliin, halkeiluun ja muodonmuutoksiin. Joissakin tapauksissa (7 kpl) myös raaka-aineen värille asetettiin vaatimuksia. Sen sijaan kosteusgradienttiin eikä pintakovuuteen näytetä kiinnitettävän lähes ollenkaan huomiota (kuva 2).



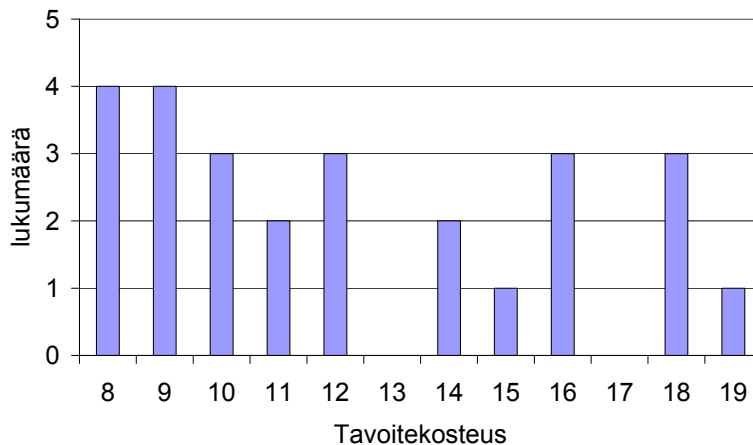
Kuva 2. Jatkojalosteraaka-aineen kuivauslaadun eri osatekijöihin kohdistettujen vaatimusten määrät.

Kuivauslaatuvaatimuksista sovitaan joko kirjaamalla se tilausvahvistukseen tai viittaamalla standardeihin tai firman sisäisiin ohjeisiin. Vähäisessä määrin toimitaan myös kirjoittamattomien sääntöjen mukaan (kuva 3).



Kuva 3. Kuivauslaatuvaatimuksista sopiminen sahatavaran kuivaajan ja jatkojalostajan välillä.

Kyselyyn vastanneiden tuotevalikoima oli varsin laaja, joten myöskin tavoite-
kosteudet vaihtelivat laajalla alueella (kuva 4). Taulukossa 9 on tuotekohtaisesti
eritelty ilmoitetut tavoitekosteudet.

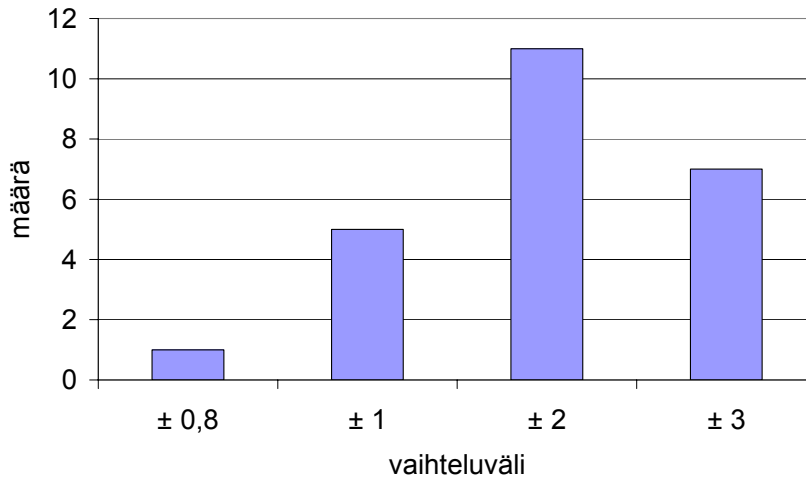


Kuva 4. Tavoitekosteuksien jakautuminen kyselyn jatkojalosteiden osalta.

Taulukko 9. Eri tuotteiden raaka-aineille ilmoitetut tavoitekosteudet.

Tuoteryhmä	Tuote nro	Kosteus, %		
		tavoite	min	max
Ovet ja ikkunat	5	--	10	12
	7	8 ± 2	6	10
	8	9 - 11	8	12
	9	10 ± 2	8	12
	10	16		
	31	8 ± 1	7	9
	32	9 ± 1	8	10
Liimalevyn raaka-aine	16	8 ± 2		11
	18	9 ± 1	8	10
	19	7 ± 2	5	9
Lattialaudat	14	8		9
flooring board / AUS	25	18 ± 3		
Paneelit	13		8	10
	23	14 ± 2		
	24	12 ± 3		20
	30	15 ± 3	12	18
Kalusteet	17	10 ± 2	8	14
	21	8 ± 0,8	7	9
	22		7	10
LP-palkit	15	11 ± 2	8	13
	28	12 ± 3		16
Rakennesahat. ristikot	11	18 ± 2		24
	12	-		
	27	16 ± 3		
Ulkovajan ovi pakk.laatikot, lavat	6	12 ± 2	10	14
	20	-		

Kyselyssä tiedusteltiin myös, kuinka paljon raaka-aineen kosteuden keskiarvo saa poiketa annetusta tavoitekosteudesta sekä, mikä on alin ja ylin sallittu yksittäisen kappaleen kosteus. Kuvassa 5 on esitetty keskiarvon sallittu vaihteluväli vastausten mukaan. Toisaalta osa vastaajista on saattanut tulkita kysymyksen niin, että kaikkien kappaleiden tulisi olla "sallittujen ±-rajojen sisällä".



Kuva 5. Sallittu keskiarvon vaihteluväli.

Kyselyn vastausten perusteella voidaan todeta asetettujen vaatimusten vaihtelevan varsin paljon samankin tuotenimikkeen sisällä. Tämä on useimmiten selitettävissä sillä, että lopputuotteen käyttökohteen olosuhteet voivat poiketa hyvinkin paljon toisistaan. Tuotteen pääasiallinen käyttökohde voi olla joko lämmitetyssä sisätilassa tai ulkona. Tavoitekosteusero syntyy myös siitä, käytetäänkö tuotetta kuivan tai kostean ilmanalan maassa.

Kullekin tuoteryhmälle voidaan näin ollen ilmoittaa keskimääräisiä vaatimuksia, mutta kussakin tapauksessa tulisi varmistaa, että raaka-aine on kosteudeltaan ja kosteuslaadultaan sopivaa. Raaka-ainetuottajan ja jatkojalostajan jatkuva tiivis yhteistyö mahdollistaa sopivan raaka-aineen kuhunkin tuotteeseen.

Ensiarvoisen tärkeää on ilmaista kosteuslaatuvaatimukset yksiselitteisesti siten, että kaikki asianosaiset ymmärtävät ne samalla tavoin. Tilastollisten käsitteiden käyttö johtaa usein siihen, etteivät ainakaan kaikki osapuolet tulkitse niitä samalla tavoin.

5. Kuivauslaadun vaikutus lopputuotteen laatuun

Valittujen jatkojalostustuotteiden ja -prosessien (liimalevy, ikkunaosien sähköstaattinen maalaus, lattialaudat ja seinäpaneelit sekä sormijatkettu sahatavara ja liimapuupalkit) osalta tarkasteltiin raaka-aineen kuivauslaatuvahteluiden vaikutusta lopputuotteen ominaisuuksiin. Varsinaisen kosteuslaadun lisäksi tarkasteltiin raaka-aineen muodonmuutosten (kierouden sekä syrjä- ja lapevääräyden) vaikutusta jatkojalosteen käyttäytymiseen.

Kosteuslaatu-tekijöitä ovat tuotteeseen tulevien eri puuosien keskimääräinen kosteus sekä niiden väliset että sisäiset kosteuserot. Raaka-aineen keskikosteuden poiketessa selvästi tuotteen kosteudesta käyttökohteessaan syntyy kutistumisesta tai turpoamisesta johtuvia muodonmuutoksia. Usein tuotteen eri osien suurten kosteuserojen tasaantuminen aiheuttaa myös hallitsemattomia muodonmuutoksia ja mm. liimasaumojen kuormittavia jännityksiä, mitkä myöhemmin saattavat johtaa liimasaumojen aukeamisiin.

Lisäksi osien erilaiset kutistumisominaisuudet aiheuttavat jännityksiä kosteuden muuttuessa, vaikka lamellien kosteudet tuotteen valmistusvaiheessa olisivatkin olleet samat.

Raaka-aineen kierous sekä lape- ja syrjävääräisyys aiheuttavat lopputuotteessa suoraksi pakotettuna jännityksiä, jotka voivat johtaa tuotteen ei-toivottuihin muodonmuutoksiin tai mm. liimasaumojen rasittaviin sisäisiin jännityksiin.

Ensimmäiseksi tarkastelun kohteeksi valittiin pienpuusta sahatusta sahatavarasta valmistettu liimalevy. Kokeet tehtiin Kohiwood Oy:n sahalla Soinissa ja liimalevy-tehtaalla Kukonkylässä.

Skaala ikkunat ja ovet Oy:ssa yrityksen henkilökunta valitsi kosteudeltaan erilaisia aihioita ja maalasi ne elektrostaattisesti. Tuotteista tutkittiin VTT:llä kosteuden vaikutus maalaustulokseen.

Muiden tuoteryhmien osalla kosteuslaatuvaatimuksia selvitettiin haastattelujen ja aiempien tutkimusten avulla. Liimapuupalkin osalta tutkittiin simulointimallin avulla, miten erisuuret kosteuserot lamellien välillä ja palkin kosteusmuutokset vaikuttavat palkin sisäisiin jännityksiin.

5.1 Liimalevy

Kohiwood Oy:n sahalla on kosteutta mittaava kapasitiivinen in-line mittari. Sillä on tarkoitus jakaa kuivattu tavara hyväksytyjen (kosteus 8–14 %) sekä liian kuivien ja liian kosteiden puiden lokeroihin. Liimalevyn valmistukseen käytetään hyväksytyllä kosteusvälillä oleva raaka-aine. Todellisuudessa kapasitiivinen mittari jaottelee raaka-aineen siinä olevan kokonaisvesimäärän mukaan. Näin ollen "kosteat" (yli 14 %) puut ovat joko tiheitä, kosteita tai molempia ja vastaavasti "kuivat" (alle 8 %) puut joko kuivia, kevyitä tai molempia.

Sahan mittarin mukaan kosteita ja kuivia sahatavaroita toimitettiin liimalevytehtaalle. Siellä niistä mitattiin kosteus myös vastusmittarilla. Kummastakin ryhmästä mitattiin yli 100 kappaletta. Ylikuivia ja ylikosteita löytyi kumpiakin vain alle 30 kappaletta, vaikka kuivien kappaleiden hylkäysraja nostettiin 8 %:sta 9 %:iin.

Levyjen valmistuksen ja VTT:lle toimituksen jälkeen otettiin kaikista lamelleista levyjen katkonnan yhteydessä kosteus ja tiheysnäytteet. Raaka-ainetiedot ovat taulukossa 10. On selvää, että kosteudet ovat osittain tasaantuneet ennen näytteiden ottoa. Kuitenkin tuloksista on nähtävissä, että alun perin kuivien ryhmään sahalla hylätyt puut ovat tiheydeltään pieniä ja vastaavasti märät keskimääräistä tiheämpiä.

Taulukko 10. Liimalevyjen raaka-aineen kosteudet ja tiheydet.

	Kosteus, %		Tilavuuspaino, kg/m ³	
	ka	haj.	ka	haj.
Lamelli:				
- norm.	11,5	0,6	402	28
- kuiva	11,0	0,5	351	49
- märkä	13,2	0,5	511	29
- hylätty	10,7	0,6	468	37
- kiero	11,3	0,7	341	47
Lauta:				
- norm.	11,3	0,8	396	29
- märkä	12,7	0,4	512	19

Liimalevytehtaalla ennen halkaisua ja höyläystä koneen hoitaja valitsi liian kierot kappaleet pois tuotannosta. Syynä oli se, että ylikierot tai -väävät puut eivät kulje höyläkoneen läpi. Kieroutta sallitaan enintään 20 % leveydestä, lape- ja syrjäväääryyttä enintään 7 mm 2 metrin matkalla sekä kupuruutta enintään 10 % leveydestä.

Koelevyjä tehtiin eri kosteus-tiheysryhmiin kuuluvista puista sekä niiden eri yhdistelmistä. Lisäksi valmistettiin yksi levy muodonmuutosten takia rajatapa-uksina (menevät juuri ja juuri höylän läpi) pidettävistä puista. Koelevyjen raaka-ainetiedot ja kokoonpanot on esitetty taulukossa 11. Lisäksi tehtiin levyjä lamelleista, jotka halkaisun jälkeen kaareutuivat voimakkaasti (lamellien syrjäväääryys).

Taulukko 11. Koeliimalevyjen kokoonpanot. Raaka-ainelamellien merkinnät: k = kuiva, m = märkä, x = kiero raaka-ainesahatavara, v = lamelli syrjäväääry. Ilman merkintää on normaali tavara. Lamellilevyissä oli 13 rimaa paitsi levyssä nro 9, jossa oli 19 rimaa. Lautalevyt koostuivat neljästä laudasta.

Levy nro	Lamellien järjestys												
1 (vertailu)													
2	k	k	k	k	k	k	k	k	k	k	k	k	k
3	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
4	k		k		k		k		k		k		k
5	m		m		m		m		m		m		m
6	k	m	k	m	k	m	k	m	k	m	k	m	k
7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
8	k	m	k	m			m	m	x	m	m	m	x
9*	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
lauta (vert.**)													
lauta 1**	m	m	m	m									
lauta 2**	m		m										
lauta 3**	m	m											

* levyssä 19 rimaa, ** neljän laudan levy

Levyt hiottiin ja toimitettiin VTT:lle. Noin neljän vuorokauden jälkeen valmistuksesta levyt jaettiin pituus suunnassa kolmeen osaan. Osien väliltä otettiin näytteet, joista määritettiin kunkin yksittäisen lamellin kosteus ja tiheys.

Levyistä määritettiin kieroutuminen mittaamalla kolmen kiinteän pisteen tuennalla neljännen kulman poikkeama tasosta. Alkumittauksen jälkeen levyt jaettiin kosteushuoneisiin: 35, 65, ja 85 % RH / 20 °C.

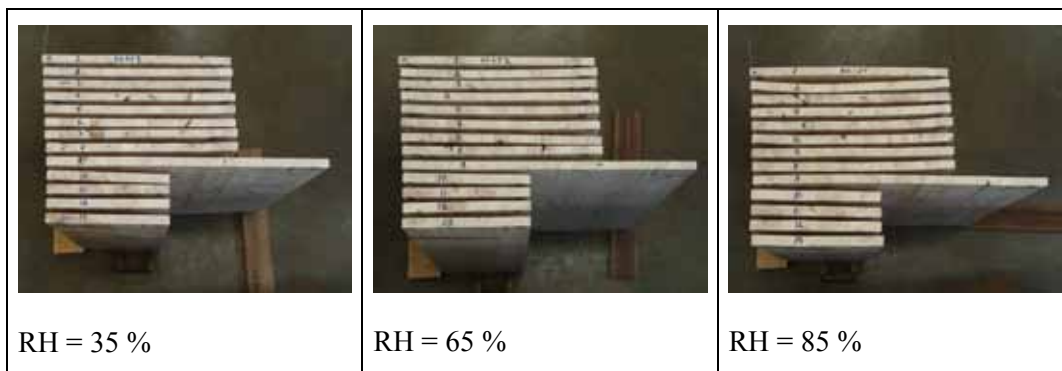
Normaalin liimalevyn valmistuksessa sahatavara höylättiin ja halkaistiin kolmeen osaan syrjän suuntaisesti. Levyt koottiin liimaamalla rimojen syrjät (saheen lapepinnat) vastakkain. Levyjä puristettiin tasopuristimessa 3 min. Lautalevyn raaka-aine höylättiin neljältä sivulta ja liimattiin syrjät vastakkain jatkuva-toimisella AT-Innovan puristimella.

Levyjen muodonmuutokset mitattiin kuuden viikon varastoinnin jälkeen. Pituussuunnassa mittauspisteiden väli oli kaikilla levyillä 900 mm. Leveys suunnassa lamellilevyillä mittausleveys oli 380 mm, paitsi levyllä numero 9, jossa mittauspisteiden väli oli 570 mm. Lautalevyjen mittausleveys oli 220 mm. Tulokset on esitetty taulukossa 12. Levyjen poikkileikkauksen muodonmuutokset näkyvät selvimmin valokuvissa (kuva 6).

Taulukko 12. Lamellilevyissä visuaalisesti havaittavissa olleet muodonmuutokset 6 viikon varastoinnin jälkeen. Varastointilämpötila oli 20 °C ja ilman suhteelliset kosteudet 35, 65 ja 85 %. Sallittuja muodonmuutoksia ovat alle 4 mm kierous ja alle 2 mm kuperuus.

Lamellilevy	RH 35 %	RH 65 %	RH 85 %
- 1, norm.	ei	ei	kup. ja kier.
- 2, kuiva	ei	ei	kup. ja kier.
- 3, märkä	kierous	ei	ei
- 4, kuiva ja norm.	ei	ei	kup.
- 5, märkä ja norm.	ei	ei	ei
- 6, kuiva ja märkä	ei	ei	ei
- 7, hylky	ei	ei	ei
- 8, kuiva, norm. ja märkä	ei	ei	kier.
- 9, kiero/kaareva	kier.	ei	kup. ja kier.

Haitallisia muodonmuutoksia syntyi varsin vähän. Tähän on yhtenä syynä, että tutkimus-materiaalissa kosteuserot levyjen valmistusvaiheessa eivät olleet kovin suuret, sillä raaka-aineen kuivauslaatu oli Kohiwood Oy:ssä hyvä. Muodonmuutoksia syntyi pääasiassa, kun kuivasta ja normaalista raaka-aineesta tehtyjä levyjä tasaannutettiin hyvin kosteassa olosuhteessa (RH = 85 %). Myöskin pelkääntään liian kosteasta tavarasta tehty levy kieroutui kuivassa tilassa (RH = 35 %). Kieroista ja kaarevista lamelleista tehtyyn levyyn syntyi haitallisia muodonmuutoksia sekä kuivassa että kosteassa tilassa. Ero muihin levyihin johtuu kuitenkin pääasiassa levyn 9 suuremmasta leveydestä (ks. kuva 6).



Kuva 6. Rinnakkaislevyt 6 viikon tasaannutuksen jälkeen.

Lautalevyissä ei lamellien kosteuserot johtaneet haitallisiin muodonmuutoksiin (taulukko 13). Huomattava on, että mittausleveys oli 220 mm eli vain noin puolet lamellilevyjen mittausleveydestä. Visuaalisesti tarkasteltuna eivät lautalevyt muodonmuutosten osalta poikkea muista levyistä.

Taulukko 13. Lautalevyjen kokoonpanot ja muodonmuutokset eri tasaannutustiloissa tapahtuneen 6 viikon varastoinnin jälkeen. Mittauspituus oli 900 mm ja -leveys 220 mm. Sallittu kierous oli 4 mm ja sallittu kuperuus 2 mm.

Lautalevy	RH 35 %	RH 65 %	RH 85 %
- norm.	ei	ei	ei
- märkä	ei	ei	ei
- norm. ja märkä	ei	ei	ei
- 2 norm. ja 2 märkää	ei	ei	ei

Oleellinen vaikutus muodonmuutoksiin on vierekkäisten lamellien vuosirenkaiden asennolla. Vuosirenkaisen ollessa levyn pintojen suuntaisesti ei kutistuminen ja turpoaminen vaikuta poikkileikkauksen kupertumiseen. Kieroutuminen on sen sijaan riippuvainen lamellien sisäisistä ja lamellien välisistä pituuskutistuman eroista.

5.2 Sähköstaattinen maalaus

Toinen esimerkki jatkojalostusprosessin vaatimuksista on ikkunakomponenttien maalaus elektrostaattisesti. Maali siirtyy puun pinnalle maaliruiskun ja maalattavan kappaleen välillä vallitsevan sähköisen kentän avulla. Puun kosteus vaikuttaa oleellisesti puun pinnalle siirtyvän maalin määrään. Myös ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa maalautuvuuteen. Liian kuivan puun pinnalle maalia tulee liian vähän ja liian kostean puun pinnalle taasen haluttua enemmän. Tasainen lopputulokset edellyttää varsin tasaista puun kosteutta. Markku Hoppania ja Lammin Ikkuna Oy edellyttävät, että puun kosteus on 10–12 %. Tätä suurempi kosteuden vaihtelu aiheuttaa liian suuret erot eri kappaleiden maalaustulokseen. Liian kosteiden kappaleiden maalikerroksen paksuus tulee liian suureksi ja liian kuivien taasen liian vähäiseksi.

Hägglundin ja von Tellin (1986) mukaan puun pintakosteuden tulisi elektrostaattisessa maalauksessa olla 8–10 %. Mikäli kosteus on alhaisempi, on käytettävä erityistoimia sähkönjohtokyvyn parantamiseksi. Usein puita joudutaan kostuttamaan ennen maalausta etenkin talvella tehdastilojen ollessa ilman erillisiä kostutuslaitteita hyvin kuivia. Maalaustilan ilman suhteellisen kosteuden tulisi olla vähintään 50 %, jotta ilman sähkönjohtavuus olisi riittävän korkea. VTT:n tutkimuksessa (Jämsä ja Muilu 1987) tutkittiin puun kosteuden, ilman suhteellisen kosteuden ja ilman kostutuksen vaikutusta lakkauksen hyötysuhteeseen eli siihen, kuinka paljon ruiskutetusta lakasta tarttui pintakäsitteltävään kappaleeseen. Puun kosteuden kasvaessa (kosteudet 6,5 %, 11 % ja 18 %) hyötysuhde parani. Puun kosteuden lisääntyminen paransi myös lakkakalvon tasaisuutta. Takapinnalle (ruiskutussuunnasta katsoen) menneen lakan määrä oli parhaimmillaan 2/3 etupinnan määrästä. Toisaalta korkea kosteus huononsi jonkin verran pinnansileyttä. Työskentelytilan kosteuden kasvu paransi selvästi lakkauksen hyötysuhdetta, kun puun (koivu) kosteus oli alhainen. Korkeassa puun kosteudessa ei tuota eroa ollut. Myös pinnan vesikostutus paransi hyötysuhdetta selvästi, kun

puun kosteus oli alhainen. Pinnan sileydskin säilyi hyvänä. Suolaliuoksellakin saatiin hyötysuhde paranemaan, mutta se heikensi pinnan sileyttä.

Näyttää siltä, että tuotteen kosteuden ollessa 8 % tai korkeampi ja ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 60 % saavutetaan hyvä tulos. Mikäli puu on kosteudeltaan alle 7 %, on sen pinnan kostuttaminen eduksi. Tasaisen lopputuloksen aikaansaamiseksi on oleellista, että maalattavien aihoiden kosteudet eivät poikkea paljon toisistaan. Kosteat puut saavat haluttua paksumman ja kuivat puut haluttua ohuemman lakkakerroksen. Lisäksi kuivien puiden maalikerrospaksuus on erilainen eri puolilla tuotetta.

Skaala ikkunat ja ovet Oy:ssä maalattiin koepuita, joista osa oli liian kuivia, osa liian märkiä ja loput kosteuden puolesta sallituissa rajoissa. Kaikkiaan maalattiin 15 koepuuta. Kuivin puu oli kosteudeltaan 7,4 % ja kostein 19 %.

Jokaisesta puusta määritettiin sen yläosasta ja alaosasta (maalauslinjalla katsottuna) keskikosteus, pintakosteus ja suurin kosteus, tilavuuspaino, maalikalvon paksuus neljällä sivulla, maalin kiilto- ja väriarvot sekä adheesioarvo ja murtumakohta (prosenttiosuudet: maali, adheesio, puu). Tulokset esitetään liitteessä B.

Tulosten mukaan maalin määrä oli riittävä kaikilla kosteuksilla. Sen sijaan kosteuden noustessa yli 12 %:n yläosan ja alaosan maalikalvon paksuudet alkoivat poiketa toisistaan. Kappaleen alaosassa maalikalvo oli selvästi paksumpi kuin yläosassa. Kosteustaso ei sen sijaan vaikuttanut pinnan kiiltoon eikä väriin. Adheesioarvot olivat kauttaaltaan hyviä.

Paitsi kosteustekniset näkökohdat, vaikuttavat lopputuloksen tasaisuuteen myös kappaleiden muoto, maalin ominaisuudet, maalauslaitteet ja kuljettimet. Hyvä lopputulos edellyttää kaikkien näiden tekijöiden hienosäätöä.

5.3 Verhouspaneeli

Paneelit valmistetaan normaalisti sydäntavarasta halkaisemalla kahteen tai kolmeen osaan ja höyläämällä haluttuun profiiliin.

Raaka-aineen kosteuden tulee olla sellainen, että paneelit eivät käyttökohteessaan oleellisesti kutistu eikä turpoa eli tuote säilyttää halutut mittansa ja mittatarkkuutensa. Toisin sanoen kosteuden tulisi vastata käyttökohteen keskimääräistä tasapainokosteutta. Mikäli näin ei ole, on paneelien annettava tasaantua käyttötilassaan ennen asennusta. Mikäli raaka-aineen kosteus jatkojalostusvaiheessa ei ole oikea eikä tasainen seuraa siitä epätoivottuja mittavaihteluita paneeleihin.

Jorma Vaara Veljekset Vaara Oy:stä ja Antti Perttilä Mäntsälän Saha Oy:stä pitävät molemmat puun ihannekosteutena höyläyksen kannalta männyllä 12–18 % ja kuusella 13–17 %. Kosteuden laskiessa puun repeily lisääntyy. Liian kosteaa sahatavaraa höylättäessä tulee pinnasta karhea. Yleensä kuusi on vaikeampi höylätä kuin mänty. Kuusen oksat halkeavat, irtoavat ja tylsyttävät teriä. Kierous ei yleensä aiheuta ongelmaa höyläyksessä.

Toinen kosteuslaatuvaatimus koskee pintakovuutta (case hardening). Paneelin poikkileikkaus ei saa kupertua valmistuksen jälkeen eikä käyttökohteessaan. Toisin sanoen CEN-rako ei saa pintakovuustestissä olla suuri. Pintakovuuden mittaamenetelmä on esitetty standardissa SFS-ENV 14464. Sen mukaan sahatavarasta sahataan poikkileikkausviipale, joka halkaistaan keskeltä pintalapteen suuntaisesti. Puoliskot laitetaan muovipussiin. Kappaleiden välinen rako 100 mm matkalla (CEN-rako) mitataan havupuilla 24 tunnin kuluttua aputelinettä käyttäen. Yleensä rako yhden vuorokauden jälkeen kuitenkin vielä kasvaa.

Raaka-aineen tulee olla hyvin maltillisesti kuivattu tai tasaannutettu riittävästi pintakovuuden poistamiseksi. Tämä vaatimus on tärkeämpi kuin tarkka keski-kosteus sillä rajusti kuivatusta raaka-aineesta valmistetun paneelin poikkileikkauksista ei voi enää asennusvaiheessa suoristaa.

VTT:llä on Suomen Puututkimus Oy:n (nykyinen Wood Focus Oy) toimeksiantona tutkittu vuonna 1998 erilaisten kuivaus- ja tasaannutusolosuhteiden vaikutusta paneelien ja lattialautojen muodonmuutoksiin niiden valmistuksessa ja käytössä. Vuoden 2002 alkupuolella päättyvässä Tekesin tavoitetutkimushankkeessa on kehitetty pintakovuuden laskentamalli ja tutkittu sekä kokeellisesti että laskennallisesti kuivauskaavojen ja tasaannutuksen vaikutusta pintakovuuden erilaisilla sahatavaroilla. Yhteenvetona näistä tutkimuksista voidaan todeta seuraavaa:

- Pintakovuus ja siitä seuraavat työstön jälkeiset muodonmuutokset voidaan minimoida tai välttää kokonaan maltillisella kuivauksella ja / tai hyvällä tasaannutusvaiheella kuivauksen jälkeen.
- Suuri kosteusgradientti kuivauksen jälkeen tarkoittaa yleensä suurta pintakovuutta, mutta gradientti ei yksin selitä pintakovuutta.
- Pintakovuus vähenee puun varastoinnissa huone- tai ulkoilman lämpötiloissa hyvin hitaasti, vaikka kosteusgradientti saadaankin poistettua.
- Samalla kuivauskaavalla kuivatuista sahatavaroista suurin pintakovuus on kauimpana ytimestä sahatuilla kappaleilla. Myöskin halkaisun jälkeen lähinnä ydintä oleva kappale kupertuu vähiten.
- Saheen paksuuden kasvaessa pintakovuus pienenee.

Raaka-aineen kosteudelle työstövaiheessa asettaa vaatimuksensa myös höylätyn pinnan laatu. Puun kosteuden ollessa yli 18 % jää höylätty pinta nukkaiseksi. Kosteuden ollessa alle 10 % kuivat oksat irtoavat helposti ja terät saavat lohjeta etenkin kuusipaneelia höylättäessä. Lisäksi liian kuiva sahatavara on paksuudeltaan alle nimellimitan, eikä siitä saa kaikkia höylättäviä aihioita riittävän paksuina. Tosin sanoen höyläysvara jää liian pieneksi ja höyläysjälki huonoksi.

5.4 Liimapuupalkki

Liimapuupalkkiin tulevien lamellien kosteuksien tulee standardin SFS-EN 386 mukaan olla 8–15 %. Lamellien kosteudet eivät saa poiketa toisistaan enempää kuin 4 prosenttiyksikköä. Eli sallitut kosteudet voisivat olla esimerkiksi 10–14 %. Kosteus mitataan 1/3:n syvyydeltä pintalapteen keskeltä.

Kosteusgradientille eli puun pinnan ja keskiosan väliselle kosteuserolle ei standardissa ole asetettu rajoituksia, vaan puun oletetaan olevan kosteudeltaan melko tasainen. Käytännössä, kun sahatavaroista höylätään 2,5 mm molemmilta lappeilta, kosteusgradientti vähenee selvästi.

Puut ladotaan palkkiin niin, että sydänpuoli on aina ylöspäin paitsi alimmassa lamellissa sen tulee olla alaspäin olosuhdeluokassa 3 (RH voi pitkään olla yli 85 % ja puun kosteus nousta korkeammaksi kuin 20 %).

Palkkien sivuille käytössä syntyviä halkeamia ei monessa käyttökohteessa juurikaan voi estää. Esimerkiksi lämmityskaudella palkin kosteus laskee hyvinkin alhaiseksi, jolloin syntyy pintahalkeilua. Se otetaan kuitenkin mitoituksessa huomioon. Pintakäsittelyllä voidaan puuta suojata vain tiheiden kosteussykliä vaikutuksilta.

Elementtimenetelmään perustuvan simulointimallin PEO avulla laskettiin, miten yhden lamellin selvä kosteusero muihin lamelleihin nähden vaikuttaa palkkiin syntyviin jännityksiin, kun kosteus lamellien välillä tasaantuu. Laskennassa käytetty elementtiverkko on kuvassa 8.

Simuloinnin lähtötiedot:

- palkin leveys 140 mm (simuloinnissa symmetrisyyden takia puolet tästä)
- korkeus $9 \times 45 \text{ mm} = 405 \text{ mm}$
- keskimmaisessa lamellissa alkukosteus 9 %, muissa 14 % tai 16 %, paitsi vertailusimuloinnit, joissa kaikissa sama alkukosteus (9, 14 tai 16 %)
- tiheys 470 kg/m^3
- lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- olosuhteet siten, että palkin kosteus tasaantui kohti keskimmaisen lamellin kosteutta (9 %, RH 49,5 %) tai muiden lamellien kosteutta (14 %, RH 73 % tai 16 %, RH 79,2 %).

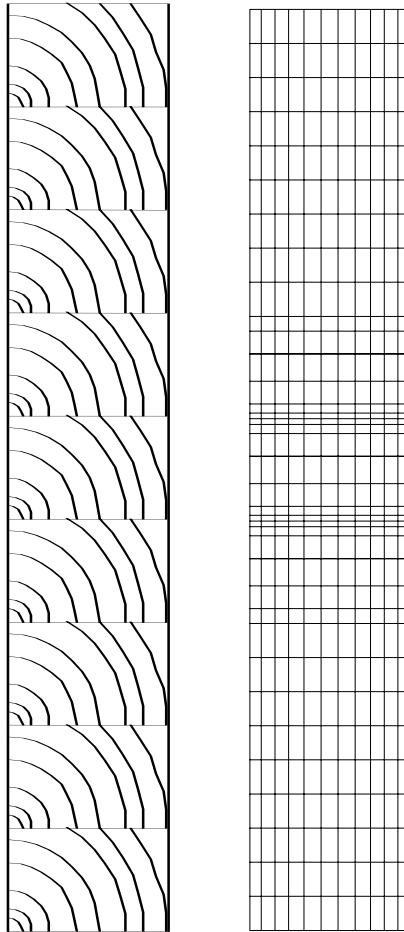
Simuloinnissa poikittaiset vetojännitykset laskettiin keskimmaisen lamellin kuvaan 8 merkityillä linjoilla, jotka sijaitsivat lamellien rajapinnoissa, 2,5 mm rajan ylä- tai alapuolella sekä lamellin keskikohdassa. Taulukossa 14 on esitetty suurimmat ko. kohdissa sijaitsevat vetojännitykset palkin leveys- ja korkeussuunnissa (x- tai y-suunnissa).

Keskimääräinen vetolujuus ko. tapauksissa on noin $3,6 \text{ N/mm}^2$.

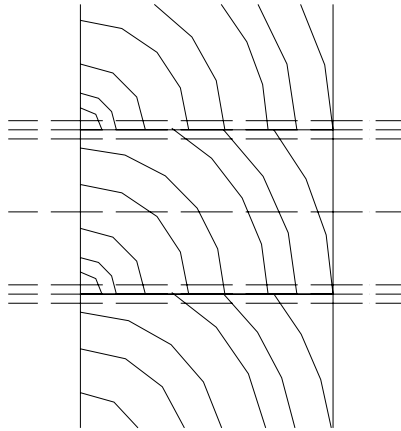
Taulukko 14. Simuloidut suurimmat poikittaiset vetojännitykset erilaisissa tapauksissa (ks. teksti).

Lasketatapaus		Max. vetojännitys	
Kosteusero	Kosteudenmuutos	x-suunta (vaaka) [N/mm ²]	y-suunta (pysty) [N/mm ²]
ei on	9 → 14 %	0,40	1,20
	9/14 → 14 %	1,10	1,20
	kasvu	175 %	0 %
ei on	14 → 9 %	0,50	1,20
	9/14 → 9 %	1,25	1,65
	kasvu	150 %	37,5 %
ei on	9 → 16 %	0,50	1,54
	9/16 → 16 %	1,35	1,43
	kasvu	170 %	-7 %
ei on	16 → 9 %	0,63	1,57
	9/16 → 9 %	1,62	2,15
	kasvu	157 %	37 %

Viimeisessä lasketussa tapauksessa, jossa palkin kokoonpanovaiheessa keskimäinen lamelli oli kuiva (9 %) muiden ollessa 16 %, tasaantuminen 9 % kosteuden aiheutti pystysuunnassa varsin korkean jännityksen. Se oli yli puolet keskimääräisestä vetolujuudesta. Palkin ollessa käyttökohteessa kuormituksen alaisena voi siihen jännitysten yhteisvaikutuksesta syntyä paikallista halkeilua. Näin ollen normeissa asetetut vaatimukset lamellien välisille kosteuseroille ovat perusteltuja.



Kuva 7. Simuloitava liimapuupalkin poikkileikkaus ja simuloinnissa käytetty elementtiverkko. Palkin koko on $140 \times 405 \text{ mm}^2$ ja palkissa oli 9 kappaletta 45 mm lamellia. Symmetrisyyden takia simuloinnissa käytettiin vain puolta palkin leveydestä (70 mm).



Kuva 8. Keskimmäisen lamellin rajapinnoissa ja keskellä olevat linjat, joissa poikittaiset vetojännitykset laskettiin x - ja y -suunnassa.

5.5 Sormijatkettu sahatavara

Sormijatkamista koskevat ohjeet on esitetty standardissa SFS-EN 385 E. Sen mukaan jatkettavan sahatavaran kosteuden täytyy normaalisti olla 8–18 %. Kuitenkin joitakin liimoja (esimerkiksi polyuretaaniliima) käytettäessä ylärajaa voidaan nostaa 23 %:iin. Liitettävien kappaleiden päiden kosteudet eivät saa poiketa toisistaan enempää kuin 5 %-yksikköä. Lisäksi tulee noudattaa liimanvalmistajan sahatavaran kosteudelle asettamia vaatimuksia. Kosteus tulee mitata säännöllisesti kalibroidulla kosteusmittarilla.

Mikäli liitettävien kappaleiden kosteusero on suuri on seurauksena kosteuden tasaantuessa sormen pohjan halkeaminen joskus pitkältäkin matkalta.

5.6 Ovien ja ikkunoiden valmistus

Ovi- ja ikkunateollisuudessa on tärkeää, että karmien ja puitteiden komponentit ovat riittävän suorina niin, ettei valmistuksessa eikä loppukäytössä synny ongelmia.

Kilsgaard Oy valmistaa Kuortaneella ovia ja ikkunoita. Kuivatussa tavarassa oli aikaisemmin osa tavarasta niin kieroja ja vääriä, että niistä ei saanut kaikkea

hyödynnettyä tuotannossa. Raja-arvoina hyväksyttävälle sahatavaralle ovat kierouden osalta on 2 mm / 2m. Tavoitekosteus on 8–9 %.

Hyvään kuivaustulokseen, joka tarkoittaa, että vain noin 10 % kuivatusta raaka-aineesta ylittää 2 mm:n rajan ja kaikki raaka-aine pystytään käyttämään hyväksi pilkkomalla kieroutuneet kappaleet mm. karmien lyhyelle sivulle.

Tulokseen on päästy käyttämällä kuivauksessa kuorman päällä painoja 250–300 kg/m². Välirimojen määrää on lisätty niin, että nyt käytetään 8–9 välirimaa 4 metriä leveässä kuivauskuormassa. Lisäksi kuivauskaava on rauhallinen (70°C, 10–11 vrk, mänty 50 x 100 mm).

6. Kuivauslaadun, -ajan ja -kapasiteetin tarkastelu simulointimalleilla

Tavoitteena oli selvittää simuloinnin avulla, millä nykyisin yleisesti käytössä olevilla kuivaamotyypeillä (kamari-, 1- ja 2-vaiheinen kanavakuivaamo) eri sahatavaraalaadut ja dimensiot tulisi kuivata, jotta tavoitekosteus ja haluttu kuivauslaatu saavutettaisiin taloudellisimmin. Simuloinnissa käytetään VTT:n tekemää kamarikuivauksen simulointimallia LAATUKAMARI sekä VTT:n ja Valutec Oy:n yhdessä tekemää kaksivaiheisen kanavakuivauksen simulointimallia, OTC-simulaattoria. Simuloinnin etuna kuivaamotyyppien tarkastelussa on kokeelliseen tutkimukseen verrattuna mahdollisuus eliminoida mm. kuivaamoiden teknisen kunnon ja puuraaka-aineen vaihtelun vaikutukset tulokseen.

6.1 Simulointimallit

Kuivauksen simulointiohjelmalla LAATUKAMARI voidaan määrittää sahatavaraalle tietyn kuivauskaavan antama kuivauslaatu. Ohjelma ottaa huomioon sekä kuivattavan puun alkutiedot että käytettävän kuivaamon ominaisuudet. Ohjelmassa tarkasteltavia kuivauslaadun osatekijöitä ovat

- loppukosteus
- kuivumisjännitykset ja sahatavaran pinnan halkeilu
- kosteusgradientti eli puun sisäinen kosteusjakauma
- kosteuden keskihajonta.

Simuloinnit tehtiin LAATUKAMARIn versiolla 1.4 optimointi. Tulosten tarkastelussa tulee ottaa huomioon, että mallin laskema kosteushajonta vastaa vanhoilla kuivaamoilla saavutettavaa tulosta. Uusilla nykyaikaisilla kuivaamoilla, joissa kuormaan menevän ilman nopeus- ja lämpötilajakaumat ovat hyvin tasaisia, hajonta on yleensä kolmanneksen laskettua arvoa pienempi.

OTC-simulointimalli perustuu LAATUKAMARissa käytettyyn matemaattiseen laskentamalliin. OTC-mallilla voidaan simuloida OTC-kanavakuivauksen lisäksi myös perinteistä 2-vaiheista kanavakuivausta sekä 1-vaiheisen kanavan kuivumistapahtumaa. Simuloinnissa otetaan huomioon kuivattavan sahatavaran lähtötiedot, käytettävän kuivaamon ominaisuudet sekä kanavan täyttö- ja purkutapa. Simulointituloksena saadaan numeerisesti yksittäisten kuormien kuivausaika,

keskimääräinen kosteus ja keskimääräinen halkeiluprosentti. Ajamalla yksittäisen kuivauskuorman kokema kuivauskaava LAATUKAMARILLA pystytään laskemaan myös kosteusgradientti ja kosteushajonta.

Eri kuivaamotyyppien simulointi perustuu samaan simulointiohjelmapihjaan, joten saadut laskentatulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

6.2 Simuloidut kuivaamot

Simulointiin valittiin yksi mitoitukseltaan edustava kuivaamo jokaisesta kuivaamotyyppistä. Valitun kamarikuivaamon puhallussyvyys oli 10 m eli 5 kuivauskuormaa á 2 m. Kuorma oli 5 m korkea ja 6 m leveä. Yksivaiheiseksi kanavakuivaamoksi valittiin 11 kuormainen kanavakuivaamo, joka on sangen yleinen Suomessa. Kaksivaiheisten kanavakuvaamoiden osalta tarkasteltiin sekä perinteistä 2-vaiheista kanavakuivaamoä että OTC-kuivaamoä. Perinteisessä 2-vaiheisessa kanavassa ilma kiertää ensimmäisessä vaiheessa kuormien kulkusuuntaa vastaan. Toisessa vaiheessa ilmankierto on kuormien kulkusuuntaan. Ensimmäisessä vaiheessa viimeksi sisään tullut kuorma lämmitetään varovasti edellä olevista kuormista haihtuvan kosteuden ansiosta. Toisessa vaiheessa tasataan jännitykset ja loppukosteus. Perinteisen 2-vaiheisen kanavan simulointitarkasteluun valittiin kuivaamo, jossa on 5 kuormaa ensimmäisessä vaiheessa ja 7 kuormaa toisessa vaiheessa.

OTC-kuivaamossa ilma kulkee vastakkaiseen suuntaan kuin perinteisessä 2-vaiheisessa kanavassa eli ensimmäisessä vaiheessa kuorman kulkusuuntaan ja toisessa vaiheessa kuorman kulkusuuntaa vastaan. OTC-kuivaamossa simuloitiin 5 kuormaa ensimmäisessä vaiheessa ja 11 kuormaa toisessa vaiheessa. Kuormien lukumäärä vaihtelee eri sahoilla riippuen kuivattavasta sahatavarasta ja loppukosteustavoitteesta.

6.3 Simuloinnin koesuunnitelma

Tehtävänä oli simuloinnin avulla tutkia eri kuivausmenetelmille soveltuvat loppukosteusalueet eri paksuisille mänty- ja kuusisahatavaroille. Tutkimuksen muuttujat olivat:

- puulaji: mänty ja kuusi
- sahatavara: kuusi 22 x 125, mänty 25 x 125, mänty (latva) 50 x 125, kuusi 50 x 125, mänty (tyvi) 75 x 150 ja kuusi 75 x 150
- loppukosteus: 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 ja 22 %.

Puuraaka-aineominaisuudet (tiheys, alkukosteus), kuivauskuormien mitat (leveys, korkeus, syvyys) sekä kuivauslaadun osatekijät (halkeilu, kosteuden hajonta ja kosteusgradientti) pyrittiin pitämään vertailukelpoisuuden takia eri simuloinneissa mahdollisimman samansuuruisina.

OTC-simulointimallilla ei ollut mahdollista laskea kaksivaiheisessa kanavakuivaamossa syntyvää kosteuden hajontaa eikä kosteusgradienttia. Tästä syystä laskettiin ensin OTC-mallilla kanavakuivaukselle sellaiset olosuhteet, joissa halkeilu on alle 5 %. Tämän ehdon täyttävän kaavan mukaiset puun kokemat kuivausolosuhteet siirrettiin LAATUKAMARIin ja laskettiin kosteuden hajonta ja kosteusgradientti. Kamarikuivauskaava valittiin Laatukamarin avulla sellaiseksi, että lopputulos on laadullisesti vertailukelpoinen kanavakuivauksen tuloksen kanssa. Tämän jälkeen oli mahdollista verrata eri kuivaamoiden kuivausajoja ja kuivauskustannuksia eri puulaji-dimensio-loppukosteusyhdistelmillä keskenään.

Simuloinnin tulosten perusteella laskettiin eri kuivaamoiden vuosikapasiteetti, energiankulutukset ja kuivauskustannukset. Kapasiteetilaskennassa oletettiin vuotuiseksi käyttöajaksi 330 vuorokautta. Kanavien täytöstä johtuva suhteellinen käyttöaste on 0,95. Kamarikuivaamojen osalta laskettiin kuorman purkamisen ja täyttämisen kestävän keskimäärin 6 tuntia.

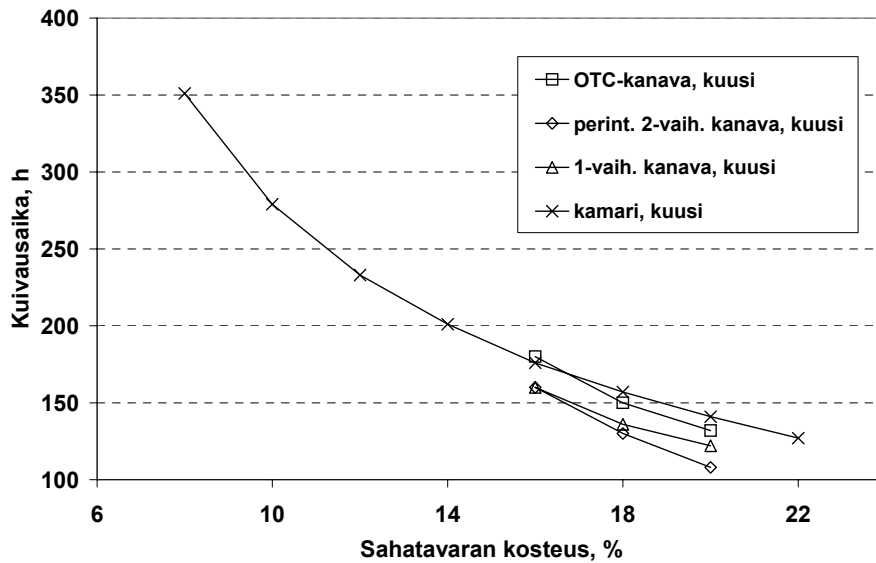
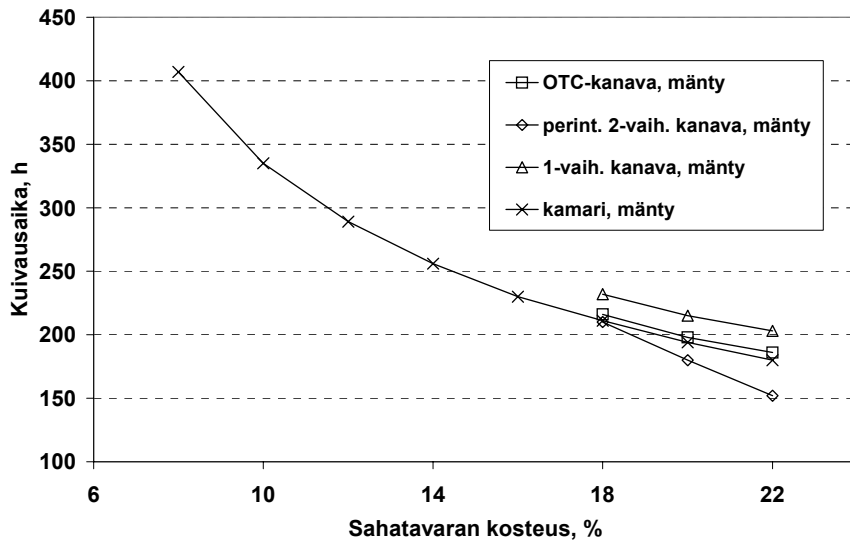
Yhteenveto kuivauksen simulointimallin lähtötiedoista ja laskentakriteereistä on liitteessä C. Simuloinnissa käytetyt kuivauskaavat eivät ole kaikissa suhteissa optimoituja, mutta vastaavat sängen hyvin teollisuudessa käytettyjä kuivauskaavoja. Simuloinneissa kanavakuivaamoiden kuormien vaihto tapahtui yksi kuorma kerrallaan tasaisin aikavälein.

Simuloinneissa suurin käytetty lämpötilaerotus oli 20 °C.

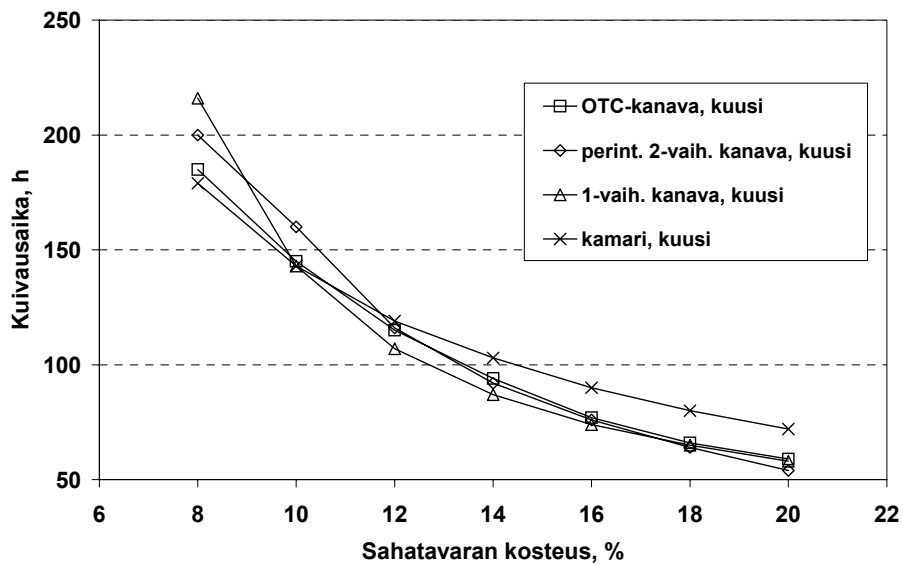
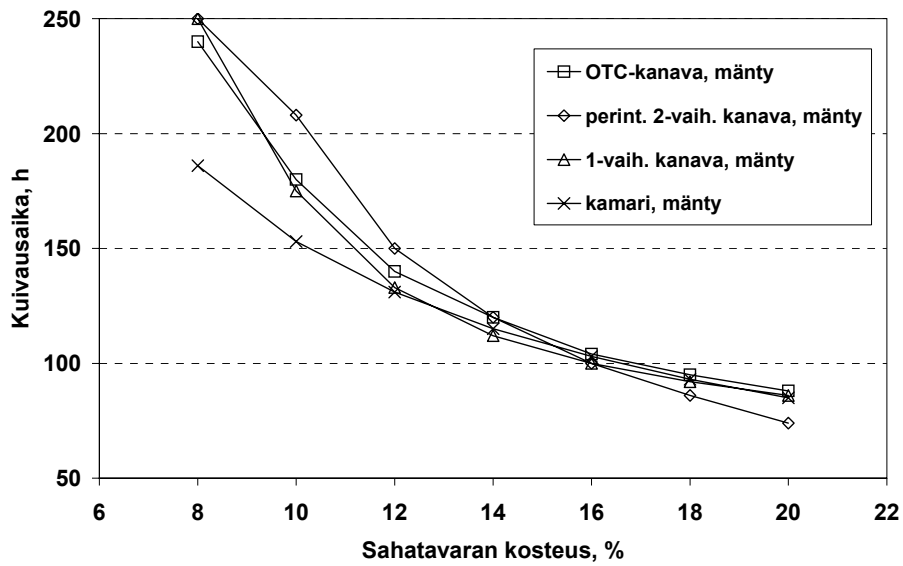
6.4 Tulokset

6.4.1 Kuivausajat

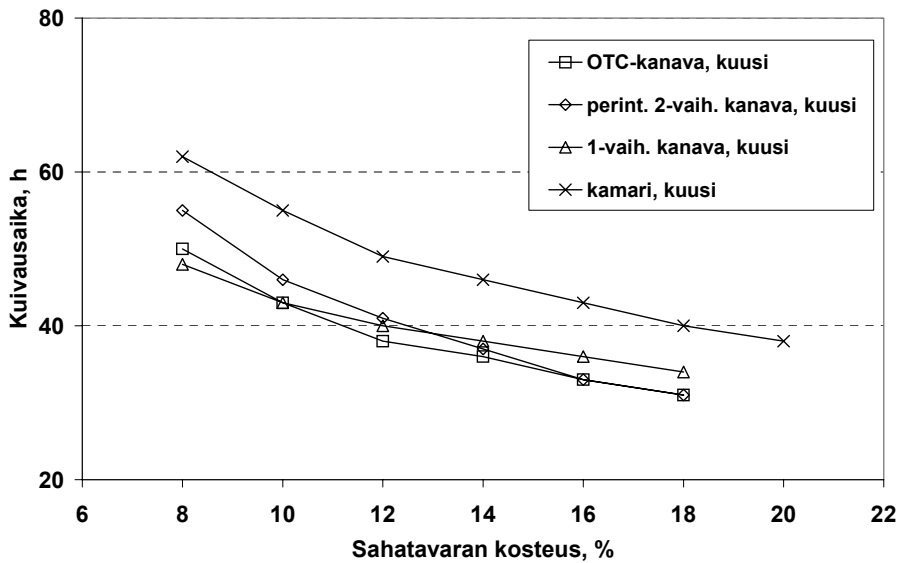
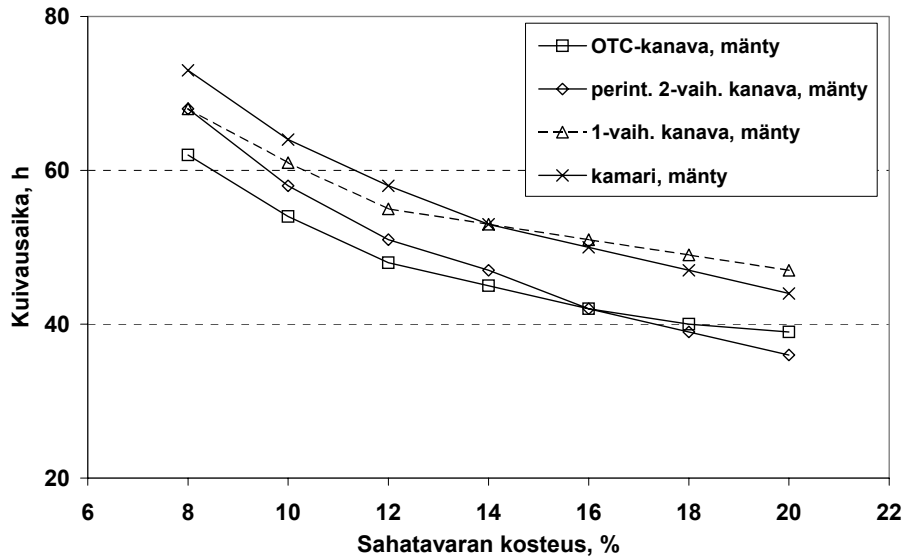
Jokaiselle kuivaamotyypeille valittiin mahdollisimman sopivat kuivauskaavat puulaji ja tavoiteltu kosteuslaatu huomioon ottaen. Kuivalämpötila oli kaikille kuivaamotyypeille simuloinneissa likimain sama, 70–75 °C. Kanavakuivaamoissa oli märkälämpötila vakio eli 62 °C sydäntavaroille ja 55 °C lautatavaroille. Kamarikuivaamoissa pidettiin kuivalämpötila vakiona eli 75 °C kaikille sahata-varoille. Simuloidut kuivausajat eri loppukosteuksiin eri kuivausmenetelmin on graafisesti esitetty kuvissa 9–11.



Kuva 9. Eri kuivaamoiden kuivausajat männylle 75 x 150 ja kuuselle 75 x 150.



Kuva 10. Eri kuivaamoiden kuivausajat männylle 50 x 125 ja kuuselle 50 x 125.



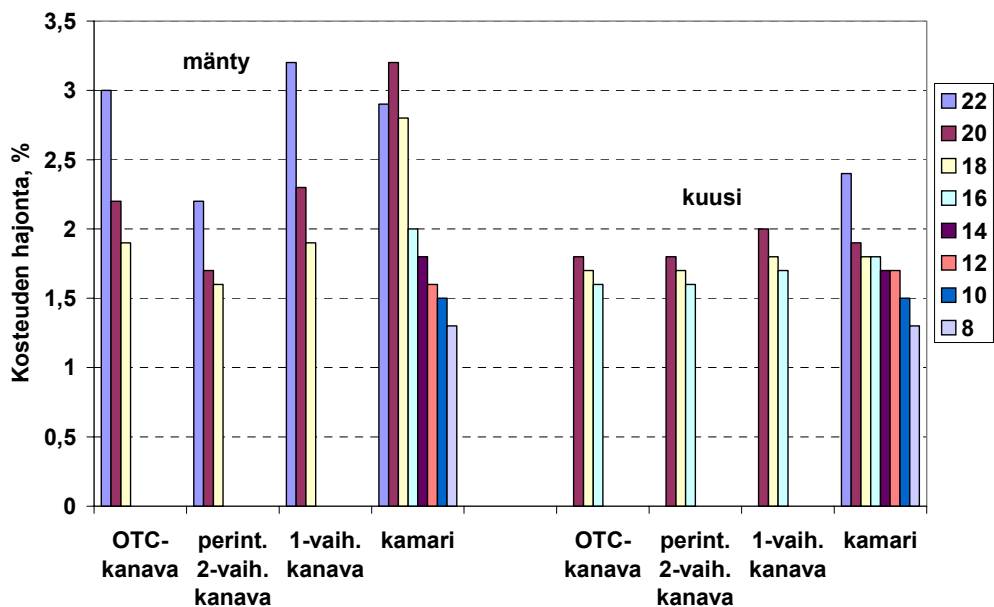
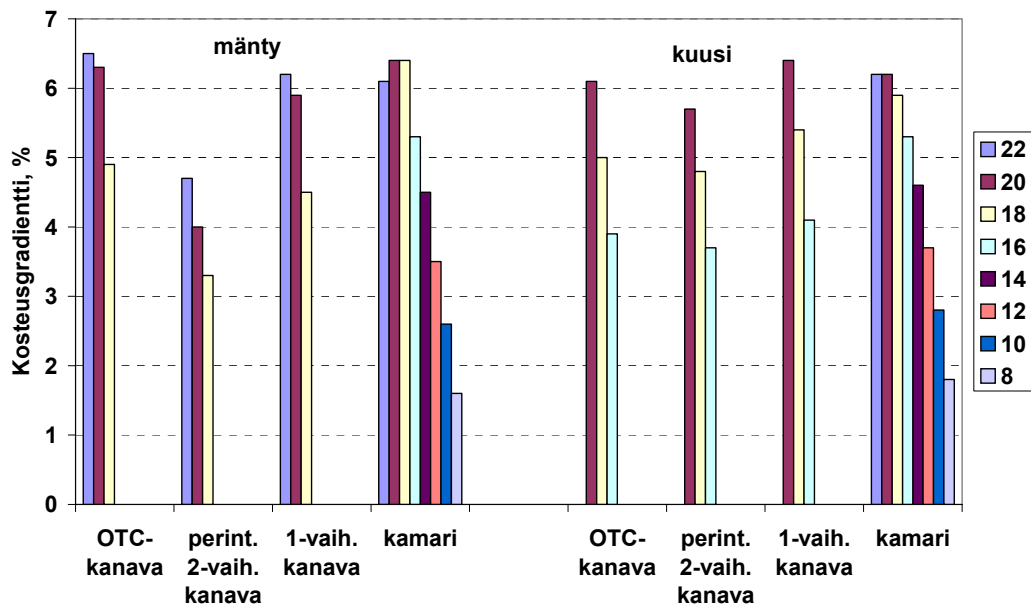
Kuva 11. Eri kuivausmenetelmien kuivausajat männylle 25 x 125 ja kuuselle 22 x 125.

Simulointien perusteella kuivaus 2-vaiheisessa kanavakuivaamossa on odotusten mukaisesti nopeampaa kuin kamarissa, joskin ero ei ole kovin suuri.

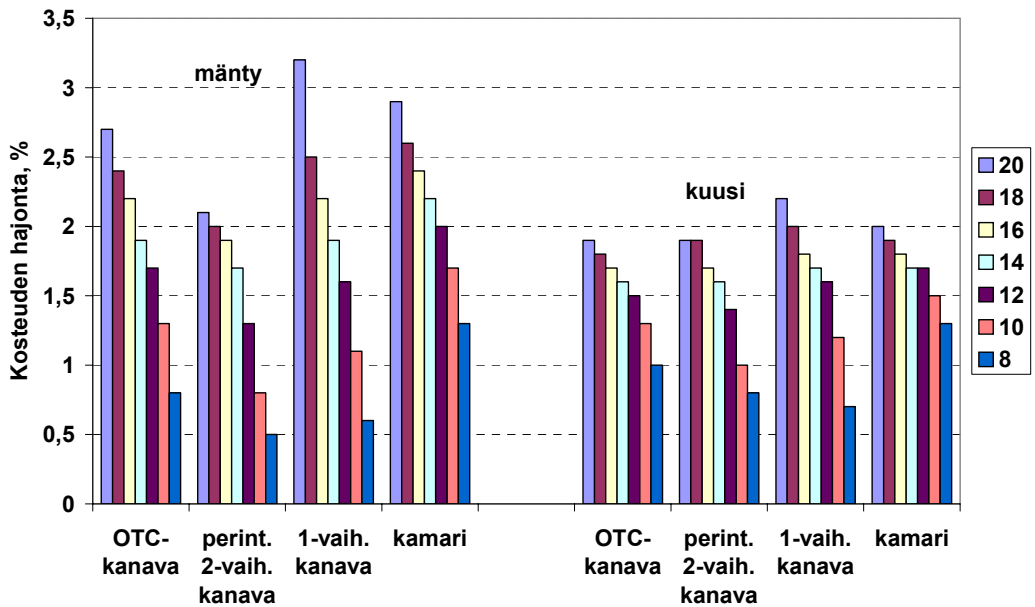
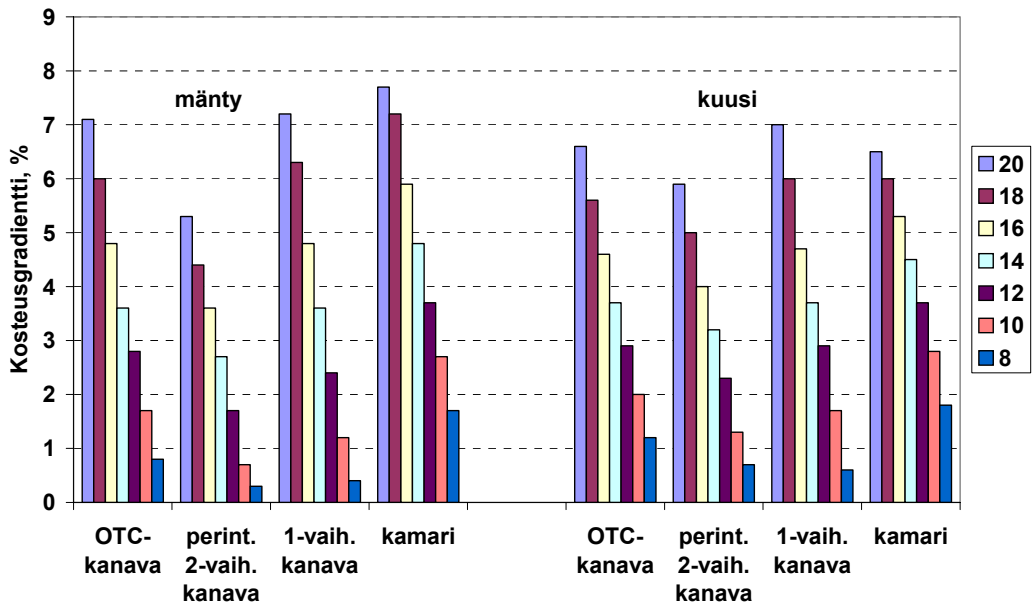
Kanavakuivaamot eivät sovellu 75 mm paksulle lankkusahatavaralle, koska halkeiluprosentti on niissä yli 10 %. Kuivausajan ja halkeiluprosentin perusteella kanavakuivaamoilla voidaan hyvin kuivata max 50 mm:n paksuiset sahatavarat jopa 8 %:n loppukosteuteen. 1-vaiheinen kanavakuivaamoratkaisu voi olla monessa tapauksessa kilpailukykyinen, jos ilmankierto on mitoitettu oikein. Kamarikuivaamo soveltuu kuivauslaadun puolesta hyvin kaikille sahatavaradimensioille ja loppukosteuksille.

6.4.2 Kosteusgradientti ja kosteuden hajonta

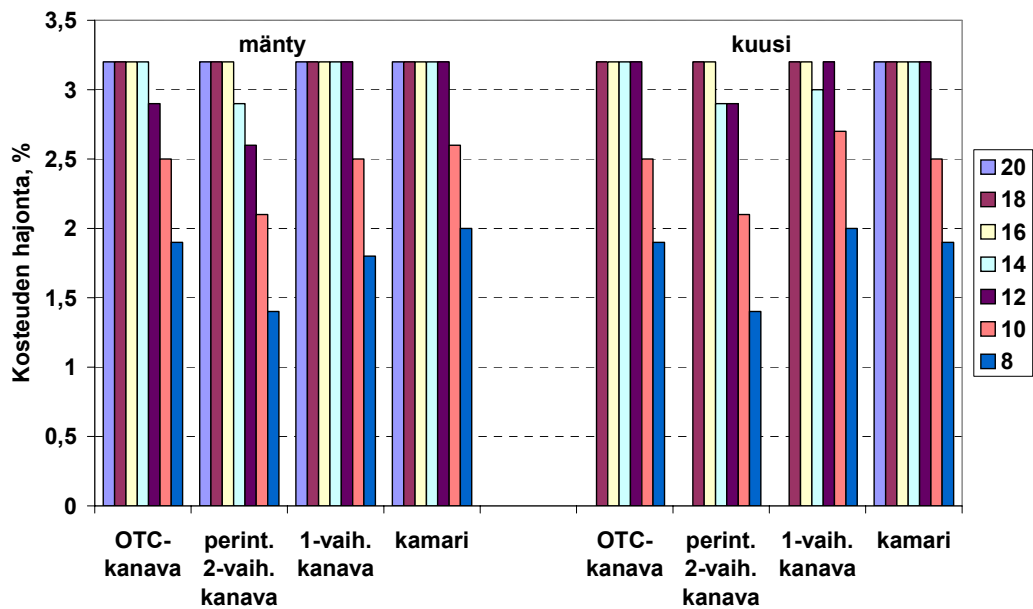
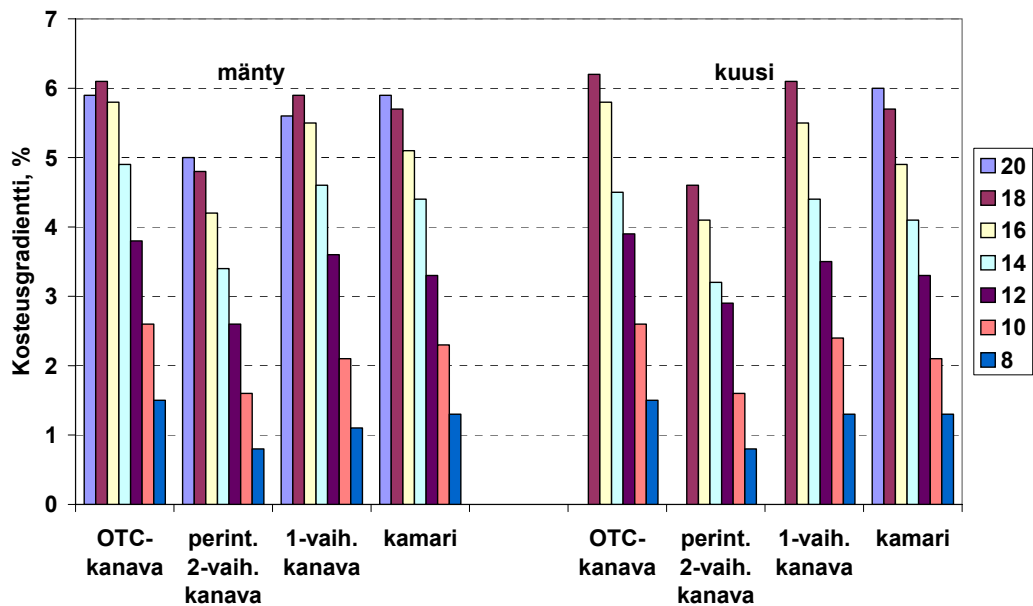
Kosteusgradientti eli puun sisäinen kosteusjakauma määritellään $1/6:n$ ja $1/2:n$ syvyydellä olevien kosteuksien erotuksena. Kosteusgradientti ja kosteuden hajonta pyrittiin pitämään mahdollisimman vakioina tietyn sahatavaran simuloinneissa. Jonkin verran poikkeamia kuitenkin syntyi, mutta ei niin paljoa, että kuivaamotyyppien välinen kapasiteettivertailu olisi kärsinyt. Kuvissa 12–14 on esitetty pylväsdiagrammeina eri simuloinneista saadut kosteusgradientit ja kosteuden hajonnat.



Kuva 12. Kosteusgradientti ja kosteuden hajonta eri kosteustasoilla 75 x 150 männyllä ja kuusella simuloituissa kuivaamoissa.



Kuva 13. Kosteusgradientti ja kosteuden hajonta eri kosteustasoilla 50 x 125 männyllä ja kuusella simuloituissa kuvaamoissa.



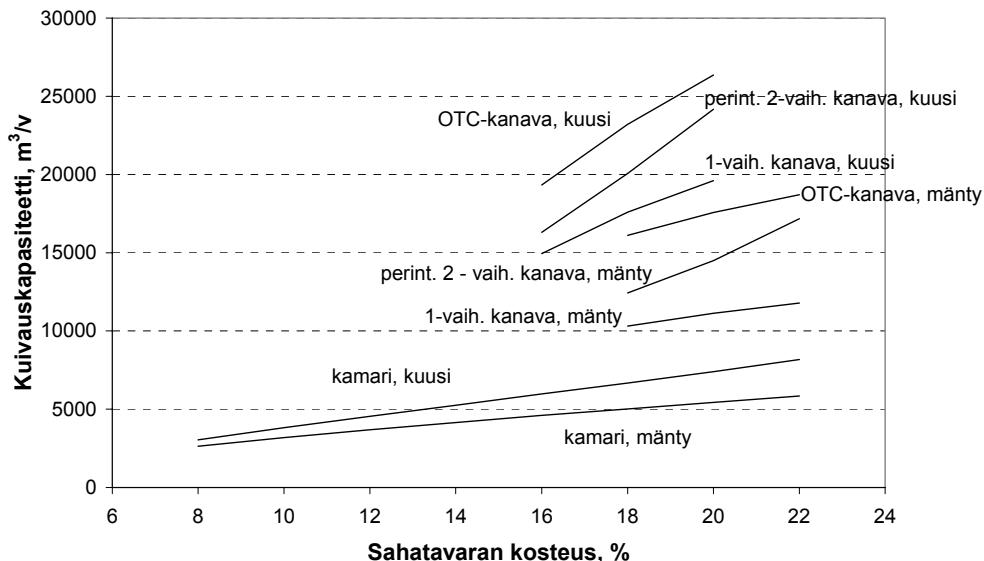
Kuva 14. Kosteusgradientti ja kosteuden hajonta eri kosteustasoilla 25 x 125 mäännillä ja 22 x 125 kuusella simuloituissa kuivaamoissa. Laatu-kamari ei ilmoita yli 3 prosenttiyksikköä suurempia hajonta-arvoja.

Mitä alhaisempi loppukosteus on sitä pienempi on kosteusgradientti ja kosteuden keskihajonta. Puun kosteuden ollessa yli 18 % kosteusgradientti on noin 6 % ja keskihajonta n. 2 %. Kosteusgradientti laskee sahatavaran dimensiosta riippuen 4–1 %:iin ja keskihajonta 1,5–0,5 %:iin puun kuivuessa alhaisempaan kosteuteen. Lautojen kosteuden hajonta oli usein yli 3 prosenttiyksikköä lyhyestä kuivausajasta johtuen.

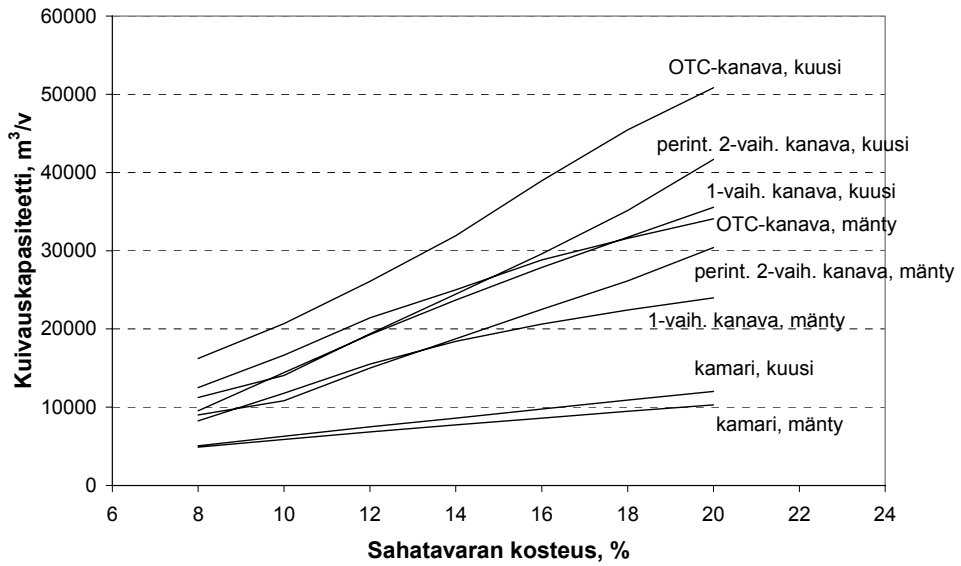
OTC-kuivaamon ja kamarikuivaamon simuloidut kosteusgradientit olivat lähes samat. Sen sijaan perinteisellä 2-vaiheisella kanavakuivaamolla gradientti oli kaikilla kosteustasoilla jonkin verran pienempi. Sama koskee myös kosteuden hajontaa. Perinteisellä 2-vaiheisella kanavakuivaamolla on ilman kiertosuunnan ansiosta selvä kosteutta tasaava vaikutus.

6.4.3 Kuivauskapasiteetti

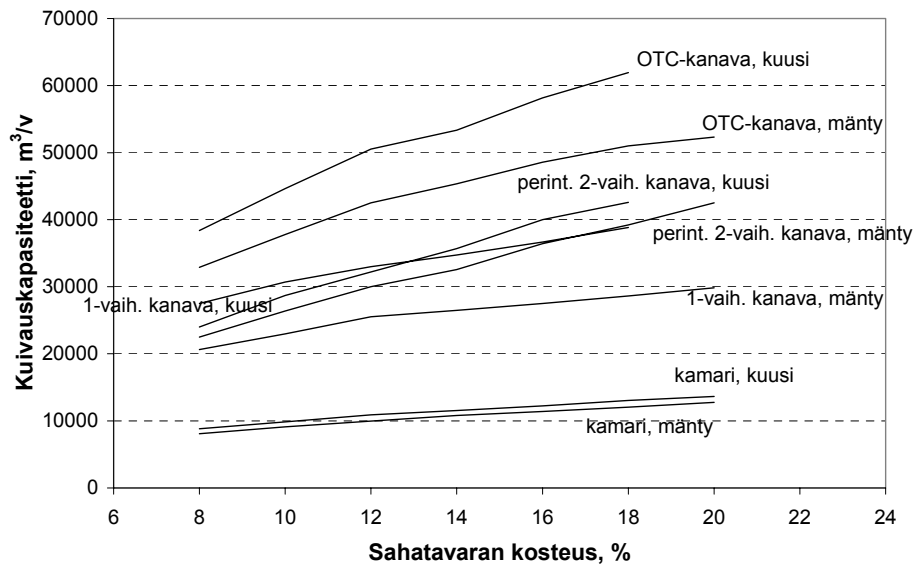
Kuivausajan perusteella laskettiin vuosikapasiteetti eri kosteustasoilla. Tulokset on esitetty kuvissa 15–17.



Kuva 15. Eri kuivaamoiden kuivauskapasiteetti männylle 75 x 150 ja kuuselle 75 x 150.



Kuva 16. Eri kuivaamoiden kuivauskapasiteetti männylle 50 x 125 ja kuuselle 50 x 125.



Kuva 17. Eri kuivaamoiden kuivauskapasiteetti männylle 25 x 125 ja kuuselle 22 x 125.

Kuivauskapasiteetti on suurin 2-vaiheisessa kanavakuivaamoissa. Kamarissa tapahtuvan lautojen kuivauksen kapasiteettia heikentää kuivausaikaan nähden pitkä täyttö- ja purku aika. Kuvista 15–17 nähdään myös, että kuivaaminen tavoitetta alempaan kosteuteen vähentää kuivauskapasiteettia merkittävästi.

6.4.4 Energiankulutus

Eri kuivausmenetelmien energiankulutus laskettiin teoreettisesti. Energianlaskenta perustuu VTT:n energiamalliin, joka ottaa huomioon käytetyn kuivauskaavan, puusta haihdutettavan vesimäärän sekä kuivaamoiden rakenteen ja toimilaitteet. Malli laskee sekä lämpö- että sähköenergia. Energian laskentaan käytetyt lähtötiedot käyvät ilmi taulukoista 15 ja 16.

Taulukko 15. Kuivattavan sahatavaran lähtötiedot.

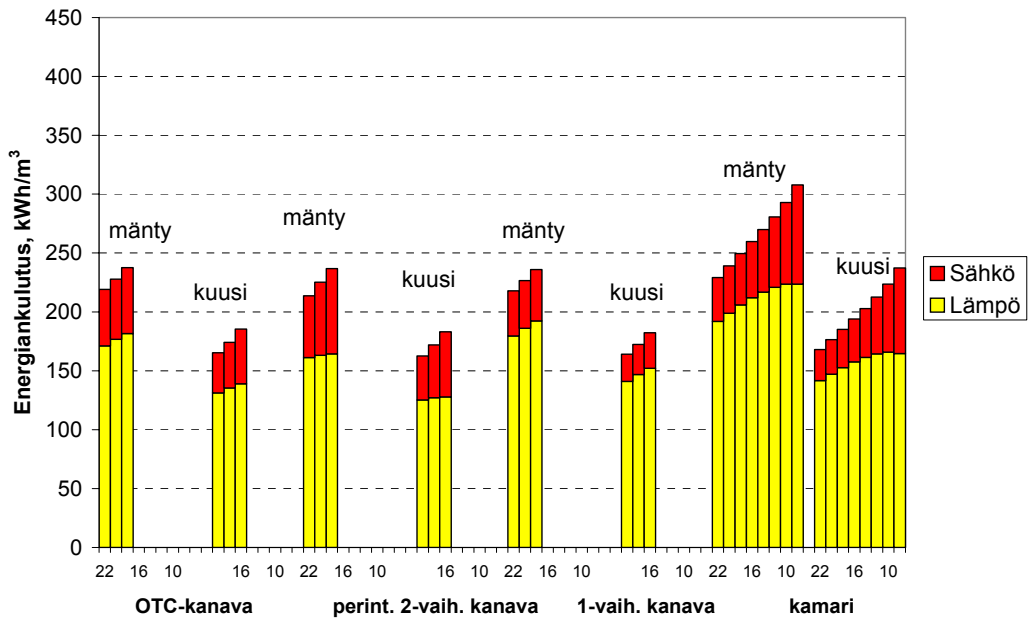
Sahatavara		Alkukosteus, %	Tiheys, kg/m ³
Mänty	75 x 150	69	450
	50 x 125	71	410
	25 x 125	110	410
Kuusi	75 x 150	62	380
	50 x 125	62	380
	22 x 125	103	380

Taulukko 16. Simuloinneissa käytetyt kuivaamoiden puhaltimien lukumäärät ja tehot (kW) eri sahatavarapaksuuksilla sekä kuormien lukumäärät vaiheittain.

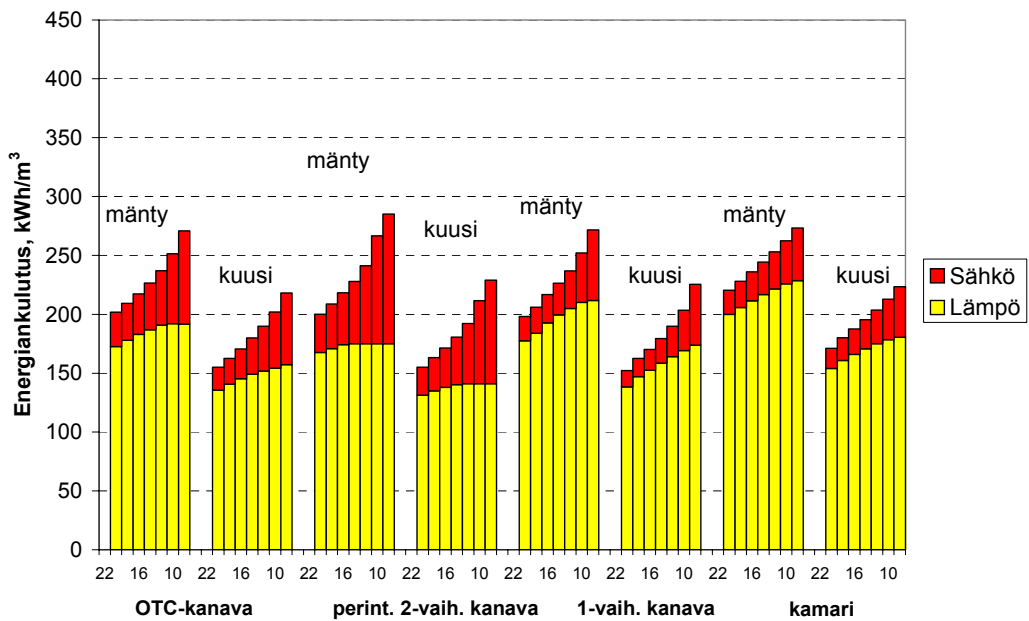
Paksuus mm	OTC-kanava	perint. 2-vaih. kanava	1-vaih. kanava	kamari
75–63	2 x 30 + 2 x 30	2 x 30 + 2 x 30	2 x 30	2 x 15
50–32	3 x 22 + 3 x 22	3 x 22 + 3 x 22	3 x 22	2 x 15
25–19	3 x 30 + 3 x 30	3 x 30 + 3 x 30	3 x 30	3 x 15
Kuormien lkm	5 + 11	5 + 7	11	5

Energialaskentamallin tulostus eri kuivaamotyypeille on esitetty liitteessä D. Siinä on esitety kaikki mallin tarvitsemat lähtötiedot ja lasketut energiankulutusluvut.

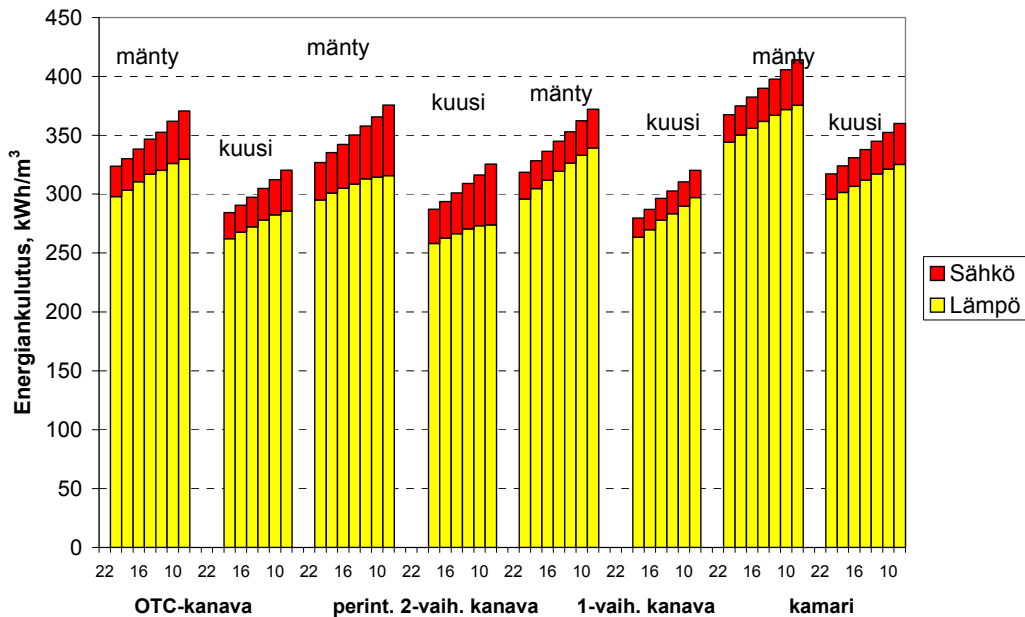
Energiankulutus sekä lämmön että sähkön osalta on graafisesti esitetty kuvissa 18–20.



Kuva 18. Eri kuivausmenetelmien energiakulutus männylle 75 x 150 ja kuuselle 75 x 150.



Kuva 19. Eri kuivausmenetelmien energiakulutus männylle 50 x 125 ja kuuselle 50 x 125.



Kuva 20. Eri kuivausmenetelmien energiakulutus männylle 25 x 125 ja kuuselle 22 x 125.

Kamarikuivaamon energiakulutukset ovat korkeimmat. Niissä ei yleensä ole lämmönvaihtimia. Ilmanvaihto kuluttaa suuren osan kuivaamossa käytetystä energiasta. Sähkönkulutus riippuu suoraan puhaltimien tehosta ja kuivausajasta.

6.4.5 Kuivauskustannukset

Kuivauskustannuksista otetaan vertailulaskelmissa huomioon pelkästään pääoma-kustannukset, sahatavaran korkomenot kuivauksen aikana ja energiakustannukset. Työ- ja kunnossapitokustannukset ja kuivausvirheistä johtuvat myyntitulojen menetykset jätetään huomioimatta.

Kuivaamon investointikustannukset perustuvat kolmen laitevalmistajan ilmoittamiin tietoihin. Investointilaskelmassa arvioitiin 125 m³ kamarikuivaamon hinnaksi 200 000 € ja 1-vaiheisen kanavakuivaamon 390 000 €, perinteisen 2-vaiheisen kanavakuivaamon 580 000 € ja OTC-kuivaamon 680 000 €. Hintaan sisältyvät pelkkä kuivaamorakennus ja tarvittavat toimilaitteet. Investointilaskelmissa ei ole otettu huomioon mm. perustus- ja pihatöitä, lämpö- ja sähkökes-

kusta eikä kuljettimia. Tarkastelussa on analysoitu vain yhden kuivaamoyksikön kustannuksia. Hankittaessa kerralla useampia kuivaamoita kuivauskustannukset laskevat.

Kuivaamon vuotuiset pääomakustannukset tuoteyksikköä kohden annuiteetti-periaatteella laskien saadaan kaavasta

$$PK_{kmo} = \frac{H \times k^v \times (k-1)}{(k^v - 1) \times T} \text{ mk/m}^3, \quad (1)$$

jossa H on hankintahinta,
k on korkokerroin (esim. 1,08, kun vuotuinen korko on 8 %),
v on kuoletusaika (a) ja
T on vuosituotanto (m³).

Tuotteen pääomakustannukset kuivauksen aikana ovat

$$PK_{kt} = t_k \times p \times kp \text{ (mk/m}^3\text{)}, \quad (2)$$

jossa t_k on kuivausaika (a),
p on tuotteen hinta (mk/m³) ja
kp on vuotuinen korko.

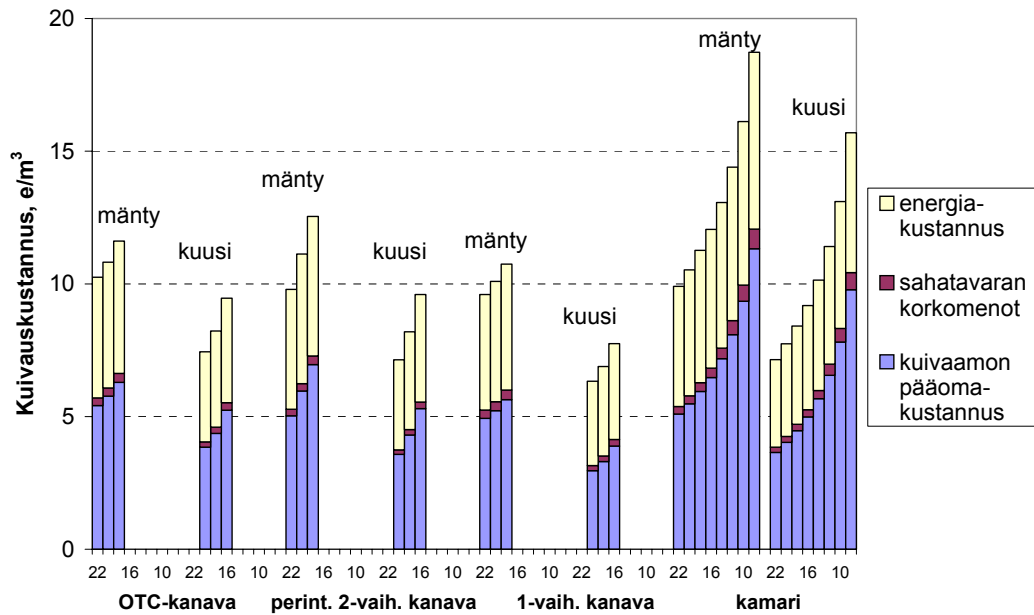
Pääomakustannukset yhteensä ovat em. tekijöiden summa

$$PK = PK_{kmo} + PK_{kt}.$$

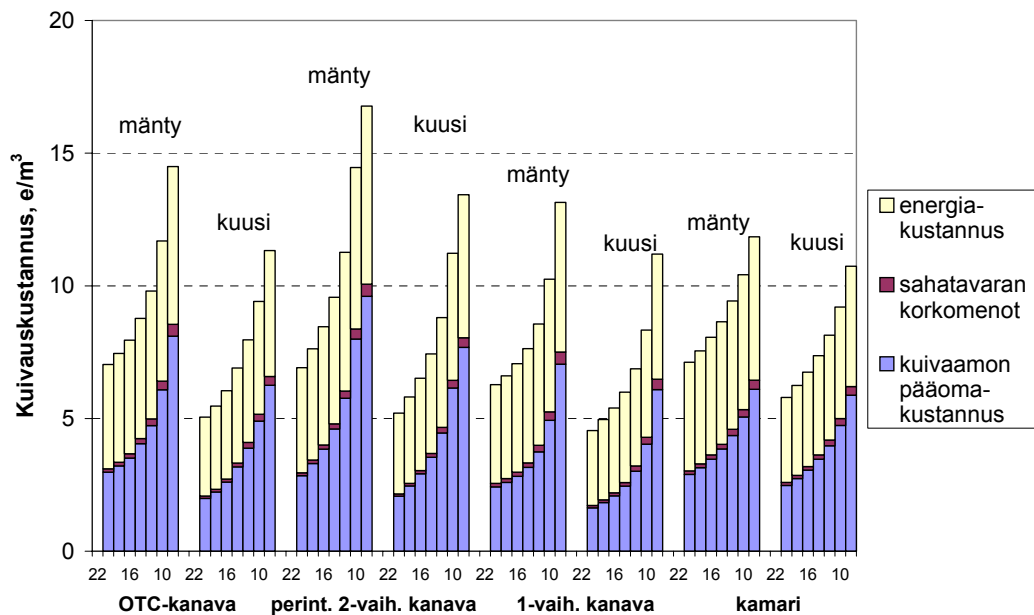
Laskelman pohjana olivat kuivaamovalmistajien ilmoittamat hankintahinnat ja simuloinnin avulla lasketut vuosikapasiteetit ja kuivausajat. Vuotuinen korko on 8 % ja takaisinmaksuaika 10 vuotta. Sahatavaran keskimääräinen hinta on arvioitu sekä männylle että kuuselle 170 €/m³ ja sen lisäksi 30 €/m³ kuivattaessa puusepänkuivaksi.

Energiakustannuslaskelmissa on käytetty energiamallin avulla saadut energiakulutusluvut. Lämpö- ja sähköenergian hintojen vaihtelu eri tehtaiden välillä on hyvin suuri. Keskimääräinen lämpöenergian hinta on 1,7 snt/kWh ja sähkön hinta 3,4 snt/kWh.

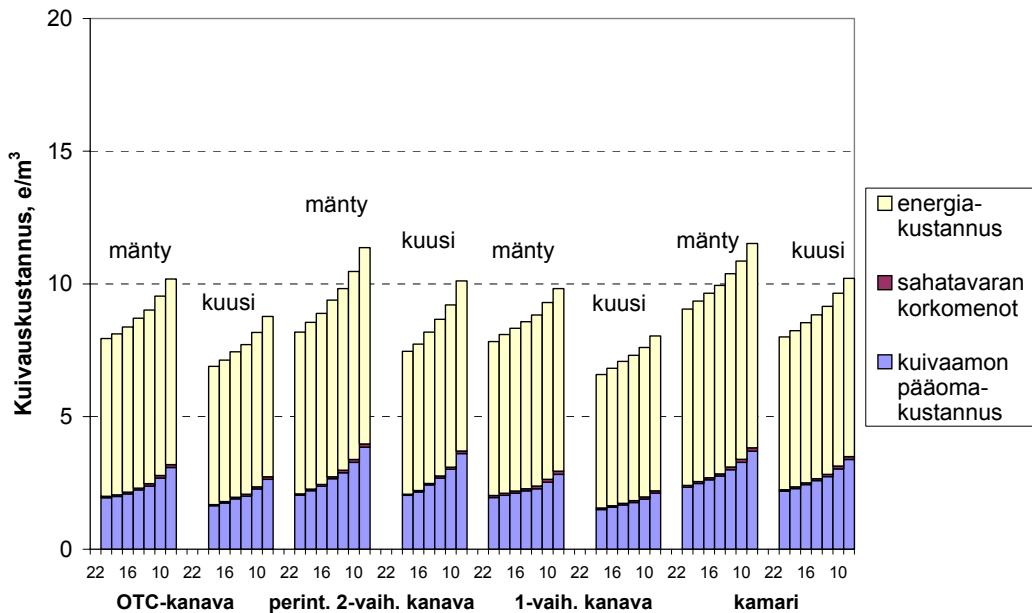
Kuivauskustannukset sisältäen pääomakustannukset, sahatavaran korkomenot kuivauksen jälkeen ja energiakustannukset on esitetty graafisesti kuvissa 21–23.



Kuva 21. Eri kuivausmenetelmien kuivauskustannukset männylle 75 x 150 ja kuuselle 75 x 150.



Kuva 22. Eri kuivausmenetelmien kuivauskustannukset männylle 50 x 125 ja kuuselle 50 x 125.

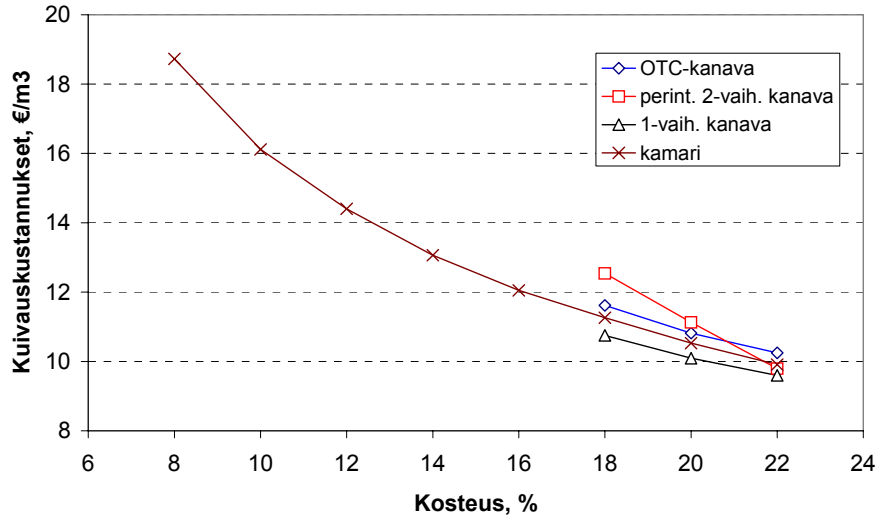


Kuva 23. Eri kuivausmenetelmien kuivauskustannukset männylle 25 x 125 ja kuuselle 22 x 125.

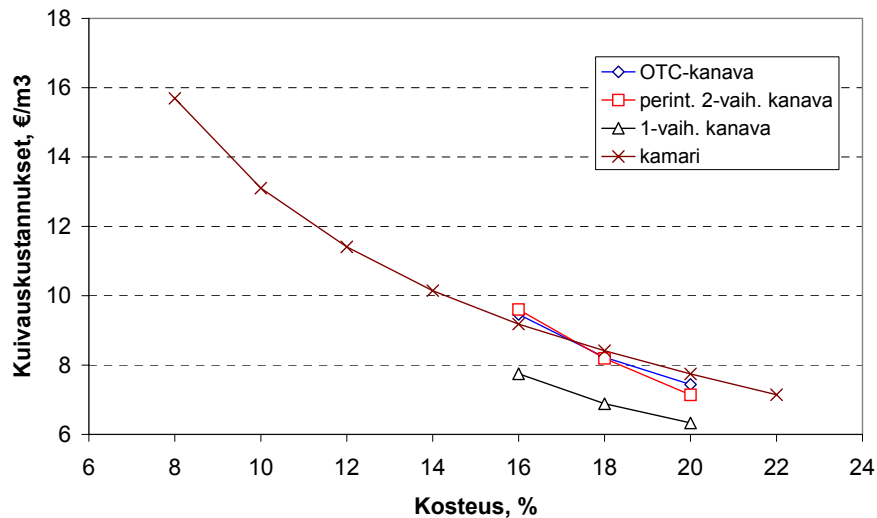
Kuivauskustannukset ovat alhaisimmat 1-vaiheisissa kanavakuivaamoissa johtuen pääosin menetelmän suuresta kapasiteetista verrattuna investointikustannuksiin. Haihdutettavan vesimäärän ja sahatavaran paksuuden kasvaessa kuivauskustannukset nousevat. Haihdutettavat vesimäärät nostavat pääosin pintapuuta olevien lautatavaroiden kuivauskustannuksia sydäntavaroihin verrattuna.

Suurimmat kustannuserät kuivauksessa ovat kuivaamon pääomakustannukset ja energiakustannukset. Sydäntavaran kuivauksessa ne ovat dimensiosta riippuen suuruudeltaan lähellä toisiaan. Lautatavaralla energiakustannus on selvästi suurempi kustannuserä. Laadunalenemisen ja työn kustannuksia ei otettu tarkasteluun mukaan.

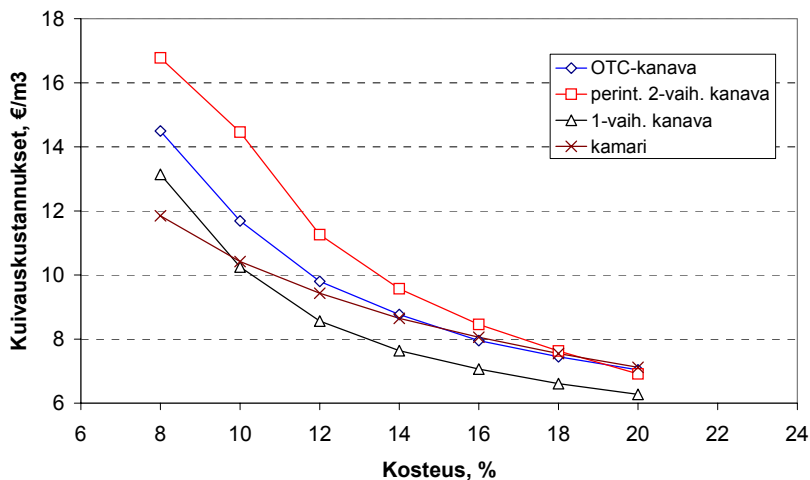
Kuvissa 24–29 on esitetty eri kuivaamotyyppien kokonaiskuivauskustannukset eri loppukosteuksiin kuivattaessa.



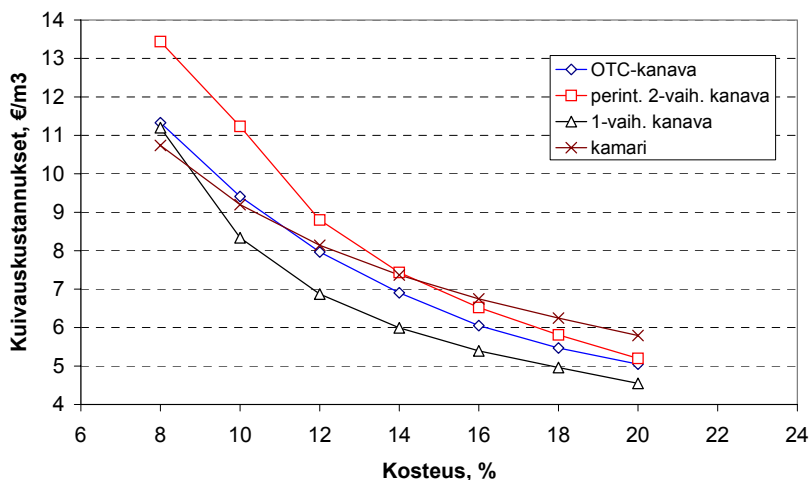
Kuva 24. Eri kuivausmenetelmien kokonaiskuivauskustannukset (kuivaamon päämakustannukset + sahatavaran korkomenot + energiakustannukset) männylle 75 x 150.



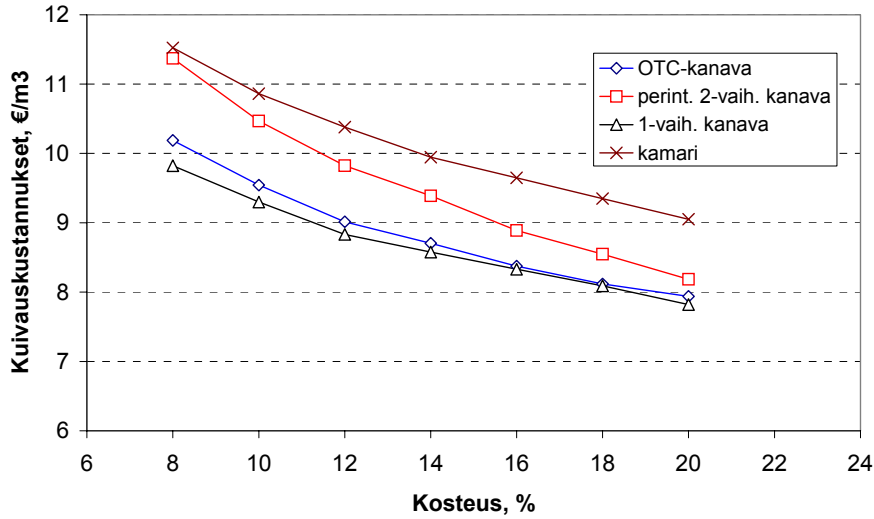
Kuva 25. Eri kuivausmenetelmien kokonaiskuivauskustannukset (kuivaamon päämakustannukset + sahatavaran korkomenot + energiakustannukset) kuuselle 75 x 150.



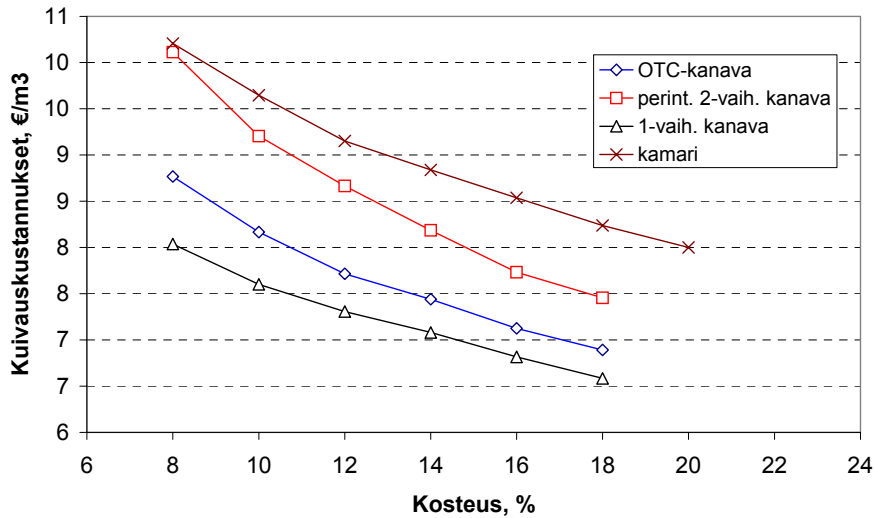
Kuva 26. Eri kuivausmenetelmien kokonaiskuivauskustannukset (kuivaamon pääomakustannukset + sahatavaran korkomenot + energiakustannukset) männylle 50 x 125.



Kuva 27. Eri kuivausmenetelmien kokonaiskuivauskustannukset (kuivaamon pääomakustannukset + sahatavaran korkomenot + energiakustannukset) kuuselle 50 x 125.



Kuva 28. Eri kuivausmenetelmien kokonaiskuivauskustannukset (kuivaamon päämakustannukset + sahatavaran korkomenot + energiakustannukset) männyllä 25 x 125.



Kuva 29. Eri kuivausmenetelmien kokonaiskuivauskustannukset (kuivaamon päämakustannukset + sahatavaran korkomenot + energiakustannukset) kuuselle 22 x 125.

Tarkisteltaessa kokonaiskuivauskustannuksia voidaan todeta, että useimmissa tapauksissa 1-vaiheisen kanavakuivaamon kustannukset olivat alhaisimmat suuren kuivaus-kapasiteetin ansiosta. 1-vaiheinen kanavakuivaamo on varteenotettava kuivaamotyyppi, jos sahauskapasiteetti on riittävän suuri. OTC-kuivaamo ja perinteinen 2-vaiheinen kanavakuivaamo edellyttävät myöskin suurta sahatavaratuotantoa, koska niiden kuivauskapasiteetti ja investointikustannukset ovat huomattavasti korkeampia kuin muiden kuivaamotyyppien.

Kamarikuivaamo soveltuu kaikkiin sahan kuivauksiin ja täyttää korkeatkin kuivauslaatu-vaatimukset. Kamarikuivaamoiden koko voidaan valita sahan tuotantomäärän mukaan.

Kustannuslaskennassa on tarkasteltu ainoastaan yhtä tyyppillistä kuivauskapasiteettitasoa jokaista kuivaamotyyppiä kohden. Investointikustannukset eivät kasva samassa suhteessa kuin kapasiteetti. Näin ollen eri kuivaamoiden pääoma- ja siten kokonaiskustannukset eivät ole vertailukelpoisia keskenään. Perinteisen 2-vaiheisen kanavakuivaamon kuivauskustannukset ovat tässä tutkimuksessa korkeat verrattuna muiden kanavakuivaamoiden kustannuksiin johtuen sen kohdalla valitusta kokoluokasta. Tavoitteena oli tarkistella etenkin eri kuivausmenetelmien soveltuvuusaluetta sahatavaran paksuuden ja tavoitekosteuden suhteen.

Kuivauskustannukset kasvavat voimakkaasti alhaisiin kosteuksiin kuivattaessa. Jokaista kosteusprosenttiyksikköä kohti kuivauskustannukset nousevat yli 5 %. Pienin loppukosteus, jossa kuivauskustannukset ovat vielä alle 6 % sahatavaran hinnoista käy ilmi taulukosta 17.

Taulukko 17. Alhaisimmat loppukosteudet, joihin eri menetelmillä kuivattaessa kuivauskustannukset ovat vielä alle 6 % sahatavaran hinnoista.

Kuivaamo	Sahatavara	Kosteus
OTC-kuivaamo	mä 75 x 150	-
	mä 50 x 125	10 %
	mä 25 x 125	8 %
	ku 75 x 150	
	ku 50 x 125	8 %
	ku 22 x 125	8 %
perint. 2-vaih. kanava	mä 75 x 150	
	mä 50 x 125	12 %
	mä 25 x 125	10 %
	ku 75 x 150	
	ku 50 x 125	10 %
	ku 22 x 125	8 %
1-vaiheinen kanava	mä 75 x 150	
	mä 50 x 125	10 %
	mä 25 x 125	8 %
	ku 75 x 150	
	ku 50 x 125	8 %
	ku 22 x 125	8 %
kamari	mä 75 x 150	16 %
	mä 50 x 125	8 %
	mä 25 x 125	8 %
	ku 75 x 150	12 %
	ku 50 x 125	8 %
	ku 22 x 125	8 %

6.5 Yhteenveto

Tarkisteltaessa eri kuivaamotyyppien soveltuvuutta sahatavaran eri loppukosteusalueille voidaan todeta, että kaikille menetelmille löytyy optimialueensa. Kamarikuivaamot soveltuvat kuivauslaadun puolesta kaikille lopputuotteille. Lau-dan kamarikuivaus ei sen sijaan ole yleensä taloudellisesti kannattavaa verrattu-na kanavakuivaamoihin. Kamarikuivaamossa voi ottaa helposti huomioon kui-vattavan puun ominaisuudet ja loppukäyttäjän tarpeet.

Edullisin tapa on kuivata sahatavara kanavakuivaamoissa. Kanavakuivaamoissa paksun tavaran kuivaaminen niin, että halkeilu on vähäistä on vaikeaa. Nykyai-kaiset kanavakuivaamot sopivat hyvin myös puusepänkuivaukseen. 1-vaiheisella kanavakuivaamoilla voidaan päästä hyvään tulokseen, jos vain ilmankierto on riittävä ja kuivaamo muutenkin oikein mitoitettu. Perinteisessä 2-vaiheisessa kanavakuivaamossa kriittiset ajankohdat halkeilun kannalta ovat kuivauksen puolivälissä. Kuivausajan pidentyessä laatu paranee. Kuivauksen lopussa tapah-tuu pientä kosteuden tasaantumista. OTC-kuivaamolla saavutetaan suuri kuiva-uskapasiteetti. Kriittisin kuivausvaihe on kuivauksen alussa. Jos kuorman vaih-toväli on liian pitkä, on riski että sahatavaroihin syntyy hiushalkeilua, joka voi aiheuttaa jatkojalostuksessa ongelmia.

Kaikilla kuivaamotyypeille on omat mitoitusratkaisunsa, jotka riippuvat myös tavoitellusta kuivauslaadusta. Usein kuivaamot räätälöidään kunkin sahan tar-peiden mukaisesti. Kuivaamo ei voida rakentaa sellaiseksi, että se toimisi laa-dullisesti ja kapasiteetin kannalta optimaalisesti kaikilla sahan tuotannossa ole-villa tavaroilla.

Kanavakuivaamoiden käytössä on tärkeää noudattaa suunniteltuja kuormanvaih-tovälejä. Mikäli vaihtoväli venyy liian pitkäksi kuivuu tavara liikaa ja sen ollessa liian lyhyt jää tavara kosteaksi. Tällöin ei sahatavaran kokema kuivauskaava muutenkaan toteudu suunnitellusti, mikä heikentää kuivauksen laadullista tulos-ta.

Kanavakuivaamoilla tulee pyrkiä mahdollisimman suureen eräkokoon. Jos saha-tavaradimensiota joudutaan usein vaihtamaan kostautuu se huonona kuivauslaa-tuna, minkä kustannukset ovat korkeat. Haluttu kuivauskapasiteettikaan ei toteu-du.

7. Yhteenvedo keskeisistä tuloksista

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää esimerkkitapauksin, miten sahatavara tulee kuivata, jotta jatkojalostus sujuu ongelmitta, ja lopputuotteet ovat virheettömiä. Tutkimuksessa selvitettiin viiden tuoteryhmän (liimalevyt, seinäpaneelit, liimapuupalkit, ovet/ikkunat ja lattialaudat) raaka-ainesahatavaralle asetettavat kuivauslaatuvaatimukset, sekä miten poikkeaminen niistä vaikuttaa lopputuotteeseen.

Jatkojalosteiden raaka-aineelle asetettavat vaatimukset selvitettiin kirjallisuuden (standardit, RT-kortit, tuotelaatuvaatimukset) ja asiantuntija-haastattelujen avulla. Esitetyt kosteusvaatimukset ovat kappalekohtaisia. Toisin sanoen jokaisen kappaleen tulee olla kosteudeltaan annettujen rajojen sisällä. Vaatimuksissa ei ole esitetty rajoja kappaleiden sisäiselle kosteusjakautumalle. Kyselyn vastausten perusteella voidaan todeta asetettujen vaatimusten vaihtelevan varsin paljon samankin tuotenimikkeen sisällä. Tämä on useimmiten selitettävissä sillä, että lopputuotteen käyttökohteen olosuhteet voivat poiketa hyvinkin paljon toisistaan.

Liimalevyn valmistuksessa tarkasteltiin raaka-aineen kosteusvaihteluiden ja muodonmuutosten vaikutusta lopputuotteen muodonmuutoksiin. Muodonmuutoksia syntyi pääasiassa, kun ylikuivasta ja normaalista raaka-aineesta tehtyjä levyjä tasaannutettiin hyvin kosteassa olosuhteessa (RH = 85 %). Myöskin pelkästään liian kosteasta tavarasta tehty levy kieroutui kuivassa tilassa (RH = 35 %). Tulokset tukevat näkemystä, että valmistuskosteuden tulisi vastata loppukäytön mukaista kosteutta ja suuria kosteuseroja tulee välttää. Kieroista ja kaarevista lamelleista tehtyyn levyyn syntyi haitallisia muodonmuutoksia sekä kuivassa että kosteassa tilassa. Oleellinen vaikutus muodonmuutoksiin on vierekkäisten lamellien vuosirenkaiden asennolla. Vuosirenkaisen ollessa levyn pintojen suuntaisesti ei kutistuminen ja turpoaminen vaikuta poikkileikkauksen kupertumiseen. Kieroutuminen on sen sijaan riippuvainen lamellien sisäisistä ja lamellien välisistä pituuskutistuman eroista.

Ikkunaosien sähköstaattinen maalauskokeissa maalattiin koepuita, joista osa oli liian kuivia, osa liian märkiä ja loput kosteuden puolesta sallituissa rajoissa. Tulosten mukaan maalin määrä oli riittävä kaikilla kosteuksilla. Sen sijaan kosteuden noustessa yli 12 %:n yläosan ja alaosan maalikalvon paksuudet alkoivat poiketa toisistaan. Kosteustaso ei sen sijaan vaikuttanut pinnan kiiltoon eikä väriin. Adheesioarvot olivat kauttaaltaan hyviä. Paitsi kosteustekniset näkökoh-

dat, vaikuttavat lopputuloksen tasaisuuteen myös kappaleiden muoto, maalin ominaisuudet, maalauslaitteet ja kuljettimet. Hyvä lopputulos edellyttää kaikkien näiden tekijöiden hienosäätöä.

Höyläyksessä liian korkeasta ja myös liian alhaisesta kosteudesta on haittaa. Puun kosteuden ollessa yli 18 % jää höylätty pinta nukkaiseksi. Kosteuden ollessa alle 10 % kuivat oksat irtoavat helposti ja terät saavat lohjeta etenkin kuusi-paneelin valmistuksessa.

Liimapuupalkkitarkastelussa laskettiin elementtimenetelmään perustuvan simulointimallin PEO avulla, miten yhden lamellin selvä kosteusero muihin lamelleihin nähden vaikuttaa palkkiin syntyviin jännityksiin, kun kosteus lamellien välillä käytössä tasaantuu. Yhdessä lasketussa tapauksessa, jossa palkin kokoonpanovaiheessa keskimääräinen lamelli oli kuiva (9 %) muiden ollessa 16 %, tasaantumisen 9 % kosteuteen aiheutti pystysuunnassa varsin korkean jännityksen. Se oli yli puolet keskimääräisestä poikittaisvetolujuudesta. Laskelmat osoittivat, että selvät poikkeamat standardissa sallituista raja-arvoista ovat haitallisia.

Ovi- ja ikkunateollisuudessa on tärkeää, että karmien ja puitteiden komponentit ovat riittävän suoria niin, ettei valmistuksessa eikä loppukäytössä synny ongelmia. Hyvään kuivaustulokseen on päästy Kilsgaard Oy:ssä käyttämällä kuivauksessa kuorman päällä painoja 250–300 kg/m². Välirimojen määrää on lisätty niin, että nyt käytetään 8–9 välirimaa 4 metriä leveässä kuivauskuormassa. Lisäksi kuivausaika on pitkä (70°C, 10–11 vrk, mänty 50 x 100 mm).

Toisena tavoitteena tässä tutkimuksessa oli selvittää simulointimallien avulla, millä nykyisin yleisesti käytössä olevilla kuivausmenetelmillä (kamari sekä yksi- ja kaksivaiheinen kanavakuivaamo) mikäkin sahatavaraalaatu ja -dimensio tulisi kuivata, jotta tavoitekosteus ja haluttu kuivauslaatu saavutettaisiin taloudellisesti. Valintaan vaikuttaa kuivauskustannusten lisäksi, kuinka suuria määriä eri tavaroita (sahatavaradimensio-kosteusluokka) tuotetaan.

Simulointien perusteella kuivaus 2-vaiheisessa kanavakuivaamossa on odotusten mukaisesti nopeampaa kuin kamarissa, joskin ero ei ole kovin suuri. Kuivauskapasiteetti on suurin 2-vaiheisessa kanavakuivaamoissa. Kamarissa tapahtuvan lautojen kuivauksen kapasiteettia heikentää kuivausaikaan nähden pitkä täyttö- ja purkuaika.

Kanavakuivaamot eivät sovellu 75 mm paksulle lankkusahatavaralle, koska halkeilu-% on niissä yli 10 %. Kuivausajan ja halkeiluprosentin perusteella kanavakuivaamoilla voidaan hyvin kuivata max 50 mm:n paksuiset sahatavarat jopa 8 %:n loppukosteuteen. 1-vaiheinen kanavakuivaamoratkaisu voi olla monessa tapauksessa kilpailukykyinen, jos ilmankierto on mitoitettu oikein. Kamarikuivaamo soveltuu kuivauslaadun puolesta hyvin kaikille sahatavaradimensioille ja loppukosteuksille.

Mitä alhaisempi loppukosteus on sitä pienempi on kosteusgradientti ja kosteuden keskihajonta. Puun kosteuden ollessa yli 18 % kosteusgradientti on noin 6 % ja keskihajonta n. 2 %. Kosteusgradientti laskee sahatavaran dimensiosta riippuen 4–1 %:iin ja keskihajonta 1,5–0,5 %:iin kuivattaessa puusepäнкуivaksi. Lautojen kosteuden hajonta oli usein yli 3 prosenttiyksikköä lyhyestä kuivausajasta johtuen.

Kamarikuivaamon energiankulutukset olivat simulointien mukaan korkeimmat. Niissä ei yleensä ole lämmönvaihtimia. Ilmanvaihto kuluttaa suuren osan kuivaamossa käytetystä energiasta. Sähkönkulutus riippuu suoraan puhaltimien tehosta ja kuivausajasta.

Kuivauskustannukset ovat alhaisimmat 1-vaiheisissa kanavakuivaamoissa johtuen pääosin menetelmän suuresta kapasiteetista verrattuna investointikustannuksiin. Haihdutettavan vesimäärän ja sahatavaran paksuuden kasvaessa kuivauskustannukset nousevat. Suuret haihdutettavat vesimäärät nostavat pääosin pintapuuta olevien lautatavaroiden kuivauskustannuksia sydäntavaroihin verrattuna.

Suurimmat kustannuserät kuivauksessa ovat kuivaamon pääomakustannukset ja energiakustannukset. Sydäntavaran kuivauksessa ne ovat dimensiosta riippuen suuruudeltaan lähellä toisiaan. Lautatavaralla energiakustannus on selvästi suurempi kustannuserä. Laadunalenemisen ja työn kustannuksia ei otettu tarkasteluun mukaan.

Loppusanat

Tutkimuksen tavoitteena oli kerätä tietoa eri jatkojalosteiden valmistusprosessin ja loppukäytön asettamista vaatimuksista raaka-ainesahatavaralle. Kuivauslaatuvaatimukset ja niihin vaikuttavat tekijät selvitettiin etenkin tutkimuksen case-tapausten osalta, joita olivat liimalevy, lattialaudat ja seinäpaneelit, liimapuupalkki, sormijatkaminen ja ikkunakomponenttien sähköstaattinen maalaus. Näitä tuloksia, jotka tukevat standardeissa ja jatkojalostusteollisuudessa esitettyjä vaatimuksia, voidaan hyödyntää jatkojalostusraaka-aineen kuivauksessa. Tuloksista käy ilmi selvästi, että kuivauslaatuvaatimukset ovat etenkin jatkojalostuksen lisääntymisen myötä kasvamassa. Edistykselliset sahat ja omalta osaltaan myöskin kuivaamovalmistajat ottavat tuotteissaan huomioon.

Kuivausmenetelmien soveltuvuusalueiden selvittäminen oli yksi tutkimuksen keskeisistä tuloksista. Toisin sanoen saatiin selville, millä kuivausmenetelmällä tietyn dimensioinen sahatavara kannattaa kuivata tiettyyn kosteuteen ja kosteuslaatuun. Tulokset ovat suuntaa-antavia, sillä kuivaamoiden ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti ja niitä räätälöidään kullekin sahatavaralle parhaiten sopiviksi. Tulokset ovat kuitenkin hyödynnettävissä mm. uusien kuivaamoinvestointeja tehtäessä.

Tutkimukselle asetetut tavoitteet saavutettiin kohtuullisen hyvin. Aluksi hankaluutta aiheutti se, ettei tutkimukseen osallistunut niin monta jatkojalostusyriystä kuin alunperin oli suunniteltu. Tästä syystä osa jatkojalosteiden asettamista kuivauslaatuvaatimuksista hankittiin haastattelututkimuksella. Tästä oli kuitenkin se hyöty, haastattelussa saatiin kartoitettua yrittäjien pitkäaikaiset kokemukset. Case-tutkimuksessa tulokset rajoittuvat aina yhteen tiettyyn tilanteeseen.

Tutkimusta ei voitu tehdä kaiken kattavasti, joten tulevaisuudessa olisi tarpeellista selvittää joidenkin jatkojalosteiden raaka-aineen kuivaukselle asettamat erityislaatuvaatimukset. Toisaalta myös kuivaamotyyppien soveltuvuusalueen täsmentäminen jonkin tietyn sahan kuivaustarpeiden mukaan on perusteltua.

Tutkimus ei aina anna tarkkaa vastausta siihen, missä kuivaamossa mikäkin sahatavara kannattaa kuivata, jos sahalta on useita kuivaamoita. Yleensä syntyy nimittäin tilanteita, että tietyille sahatavaralle optimaalinen kuivaamo ei ole vapaana. Yhtenä tulevaisuuden tutkimusaiheena voisi olla sahan kuivaamoiden käytön optimointiohjelma, mahdollisesti LP-malli.

Kuivauksen ja myös jatkojalostustoiminnan kehittämisen kannalta oli hyödyllistä toteuttaa nykyistä laajempi tutkimus, jossa selvitettäisiin eri tekijöiden asettamia vaatimuksia sahatavaran kosteudelle ja kosteuslaadulle, esimerkiksi, miten puun työstössä eri teriä ja työstötapoja käytettäessä kosteus vaikuttaa lopputulokseen.

Tärkeää olisi myös tutkia eri laatutekijöiden kuivausolosuhteille ja kuivaamoille asettamia rajoituksia. esimerkiksi mainittakoon pihkan valuminen, värin muutokset, mikrohalkeilu ja sisähalkeilu. Taulukkomuodossa esitettävät tulokset olisivat erittäin hyödyllisiä kuivaamonhoitajalle, kun hän suunnittelee kuivauskaavan tiettyyn kohteeseen menevälle sahatavaralle.

Lähdeluettelo

EDG-recommendation. 1994. Assessment of drying quality of timber. Pilot edition. 26 s.

Hägglund, G. & von Tell, B. 1986. Elektrostatisk lackering av trä. Stockholm, Träteknikcentrum, Rapport 7 8602016. 74 s.

Jämsä, S. & Muilu, J. 1987. Puun ja puulevyjen elektrostaattinen pintakäsittely. VTT Tutkimuksia 459. 91 s. + liitt. 12 s.

RT 21-10492 1992. Teollisesti pohjamaalatut ulkoverhouslaudat. 4 s.

RT 21-10539 1994. Teollisesti maalatut sisäverhouslaudat ja puulistat. 4 s.

RT21-10626. Höylätyt laudat ja listat.

RT 21-10750 2001. Sahattu ja höylätty puutavara. 32 s.

RT 47-10681 1998. Puukalusteet. Laatuvaatimukset. 4 s.

RT 82-10582 1995. Puiset sisäverhoukset. 116 s.

SFS 4433 RT 41-10431 1990. Wooden windows and louvred panels. Quality requirements, Puiset ikkunat ja tuuletusluukut. Laatuvaatimukset. 4 s.

SFS 4434 Ehd. 1997. Wooden doors, quality requirements, Puuovien laatuvaatimukset. 8 s.

SFS 4895 RT 14-10436 1990. Log building. Quality requirements, Hirsitalon laatuvaatimukset. 4 s.

SFS-EN 385 2001. Finger jointed structural timber. Performance requirements and minimum production requirements. 17 s.

SFS-EN 386 2001. Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements. 16 s.

SFS-EN 942 1996. Timber in joinery. General classification of timber quality.
12 s.

SFS-ENV 14464 2002. Sawn timber. Method for assessment of case-hardening.
7 s.

Liite A: Kysely jatkojalostuksen vaatimuk- sista sahatavaran kuivauslaadulle

VTT RAKENNUS- JA
YHDYSKUNTATEKNIikka

Sahatavaran kuivauslaatu

14.2.2001

1 (2)

Kysely jatkojalostuksen vaatimuksista sahatavaran kuivauslaadulle

Arvoisa Vastaanottaja

Tekesin tavoitetutkimushankkeessa "Sahatavaran kuivauslaadun minimivaatimukset ja optimi kuivausmenetelmät" selvitetään eri jatkojalostustuotteiden sahatavara-aineelle asetettavat kuivauslaatuvaatimukset. Projektissa keskitytään kosteutta koskeviin vaatimuksiin.

Toivon, että teillä on aikaa vastata seuraaviin kysymyksiin omien jatkojalostustuotteidenne osalta. Olkaa ystävällinen ja palauttaa täytetty lomake joko faxilla tai postitse alla olevaan osoitteeseen. Vastaan mielelläni projektia ja lomaketta koskeviin kysymyksiin.

Holger Forsén
VTT Rakennustekniikka, PL 1806, 02044 VTT
Holger.Forsen@vtt.fi
puh 90-456 5557, fax 90-456 7027

Yritys: _____

Pvm.: _____ Kyselyyn vastasi: _____

Keskimääräinen raaka-ainetarve vuodessa:

Havupuuta _____ m³, lehtipuuta _____ m³.

Paljonko tästä määrästä kuivatte itse:

Havupuun osalta: _____ %

Lehtipuun osalta: _____ %

Jatkojalostuksen raaka-aineen kuivauslaatua koskevat vaatimukset perustuvat:

sopimukseen raaka-aineen myyjän kanssa tuotestandardeihin /-sääädöksiin

muihin kirjallisiin ohjeisiin, mihin: _____

muuhun, mihin: _____

Raaka-aineen kuivauslaatua koskeviin vaatimuksiin sisältyy yleensä:

kosteuden keskiarvo (mittausarvojen keskiarvo) keskiarvo ±sallittu poikkeama (keskiarvon sallittu vaihteluväli)

yksittäisen mittausarvon min/max (kaikkien kappaleiden kosteusvaihtelu) kosteusero pinnan ja keskiosan välillä (kosteusgradientti)

pintakovuus (kuivausjännitykset) halkeilu

muodonmuutokset väri

muu, mikä _____

VTT RAKENNUS- JA
YHDYSKUNTATEKNIikka

Puumiehenkuja 2 A, Espoo
PL 1806
02044 VTT

Puh. (09) 456 5557
Faksi (09) 456 7027
Http://www.vtt.fi/rte

Tuote _____ Puulaji _____

Tuotteen normaali käyttötarkoitus _____

Prosessivaihe _____

Seuraavat eriteltyt vaatimukset ovat voimassa:

 ostettaessa jatkojalostuksen alkaessa

Vaatimukset ovat:

 standardissa (mikä): _____

 tilausvahvistuksessa

 sisäisessä ohjeessa (mikä)

 muissa kirjallisissa vaatimuksissa (mikä)

 kirjoittamattomina sääntöinä

 Kosteus: tavoitekeskiarvo _____% sallittu keskiarvon poikkeama \pm _____%

suurin sallittu arvo _____% pienin sallittu arvo _____%

sallittu gradientti (pinnan ja keskiosan välinen kosteusero) _____%

Pintakovuus (casehardening), kirjoita lukuarvo, tai kuvaa vaatimusta sanallisesti

Haarukkapala _____

Halkaisukoe _____

Muu määritelmä _____

Sallitut halkeamat pituus _____ mm (max)

leveys _____ mm (max)

syvyys _____ mm (max)

lukumäärä _____ kpl (max)

Muodonmuutokset kierous _____ mm (max)

lape-/syrjävääräisyys _____ mm (max)

kuperaus/koveruus _____ mm (max)

Väri (sanallisesti) _____

Muut vaatimukset _____

Puun kosteus tarkistetaan:

 sähköisellä kosteusmittarilla mittaus­syvyyydet (% paksuudesta): _____

 muilla menetelmillä, millä: _____

Näyte-erän koko: _____

Hukka-% _____

Liite B: Maalattujen puiden mittaustulokset

Tunnus	Kosteus			Tilipaino (0,28)	Maalikalvon paksuus				Kiilto	Värimittaus			Adheesio- arvo MN/m ²		Murtuma %		
	Mittari %	Punn. kuiv. men. %	Kosteusgradientti		Pintap. mm	Sivu 1 mm	Sivu 2 mm	Syväp. mm		L	a	b	Maali	Adheesio	Puu		
1 ylä ala	7,6	7,4	8,33	8,72	625	0,097	0,099	0,106	0,110	29,6	95,33	-1,69	5,65	13,2	0	70	30
2 ylä ala	7,7	7,7	8,10	8,28	573	0,084	0,124	0,113	0,104	29,4	95,35	-1,69	5,65	15,5	0	71	29
3 ylä ala	7,9	7,9	7,95	8,15	432	0,084			0,089	27,9	95,30	-1,71	5,52	15,1	1	56	42
4 ylä ala	8,7	7,9	8,17	8,25	423	0,102			0,110	25,4	95,27	-1,70	5,48	14,4	0	42	58
5 ylä ala	9,0	7,8	8,03	8,21	417	0,072			0,079	24,1	95,15	-1,67	5,54	11,7	3	14	81
6 ylä ala	9,2	7,8	8,15	8,25	415	0,094			0,106	23,2	95,27	-1,68	5,66	12,8	6	17	76
7 ylä ala	11,9	11,3	11,42	12,39	481	0,101	0,116	0,101	0,077	26,3	95,28	-1,69	5,60	13,0	1	11	88
8 ylä ala	12,1	11,5	11,76	12,42	446	0,078			0,135	26,6	95,29	-1,67	5,68	9,7	43	13	44
9 ylä ala	12,3	10,0	9,92	10,95	404	0,104			0,087	29,1	95,36	-1,68	5,65	13,5	2	15	82
10 ylä ala	12,5	11,0	11,35	11,87	445	0,150			0,123	32,0	95,18	-1,67	5,40	13,1	0	29	71
11 ylä ala	13,3	11,0	10,85	11,74	445	0,124			0,098	27,5	95,36	-1,67	5,64	13,0	8	22	71
12 ylä ala	14,7	11,1	10,95	11,67	486	0,158			0,155	27,2	95,39	-1,66	5,79	12,9	7	16	78
13 ylä ala	17,8	17,1	16,96	17,99	361	0,124	0,146	0,119	0,134	30,9	95,36	-1,69	5,62	12,7	0	28	72
14 ylä ala	18,0	14,6	14,57	15,38	433	0,139	0,148	0,172	0,149	29,5	95,41	-1,68	5,70	14,3	2	33	64
15 ylä ala	19,8	19,0	18,80	19,55	405	0,186	0,221	0,160	0,122	24,9	95,35	-1,69	5,75	14,6	23	3	73
						0,186	0,199	0,136	0,139	26,1	95,30	-1,67	5,72	11,9	48	3	49
						0,170			0,135	26,1	95,33	-1,71	5,75	12,1	75	2	23
									0,186	25,1	95,39	-1,69	5,83	12,9	70	5	25
									0,149	29,5	95,36	-1,69	5,76	10,4	44	16	40
									0,159	28,8	95,42	-1,69	5,80	11,0	38	12	50
									0,139	29,6	95,40	-1,70	5,74	8,5	84	4	13
									0,186	31,3	95,41	-1,67	5,77	13,3	32	23	43
									0,186	23,6	95,28	-1,71	5,72	11,1	6	25	69
									0,096	24,5	95,37	-1,69	5,82	13,6	12	20	67

Liite C: Simuloinnin lähtöarvot ja laskentakriteerit

Kuivaamotyyppi

- kamari
- 1-vaih. kanava
- perint. 2-vaih. kanava
- OTC-kanava

Simulointi

- kuivausajat
- kosteuslaatu
- kuivauskapasiteetti
- energiankulutus
- kuivauskustannukset

Sahatavara:

- puulaji mänty/kuusi
 - sydäntavara
 - järeä 75 x 150 (mänty tyvi)
 - " 75 x 150 (kuusi)
 - normaali 50 x 125 (mänty latva)
 - " 50 x 125 (kuusi)
 - lautatavara
 - mänty 25 x 125
 - kuusi 22 x 125
- kosteusluokka 8 %-22 % (2 %-yksikön välein)

Laatukriteerit:

Kuivauslaadun osatekijät oli vakioitu kaikissa simuloinneissa mahdollisimman samansuuruisiksi:

- halkeilu alle 5 %
- kosteus tavoitekosteus $\pm 0,5$ %
- gradientti alle 0,3 x tavoitekosteus
- hajonta variaatiokerroin (haj./tav.kosteus) alle 0,15

Kuivaamon koko

- OTC-kanava 5 + 11 kpl
- perint. 2-vaih. kanava 5 + 7 kpl
- 1-vaih. kanava 11 kpl
- kamari 5 kpl

Kuivauskuorma

- korkeus 5 m
- leveys 6 m
- syvyys 5 m

Kuivauskaava

- kanavakuivaamo
 - sydäntavara Tm 62 °C (vakio)
 - lautatavara Tm 55 °C (vakio)
- kamarikuivaamo Tk 75 °C (vakio)

Ilmannopeus (kanava- ja kamarikuivaamoissa)

- sydäntavara 5 m/s
- lautatavara 4,5 m/s

- lämminvaihtimen hyötysuhde
 - kanava 80 %
 - kamari 0 %

energiakustannukset

- lämpö 1,7 cent/kWh
- sähkö 3,4 cent/kWh

Investointikustannukset

- OTC-kanava 680 000 euroa
- perint. 2-vaih. kanava 580 000 “
- 1-vaih. kanava 390 000 “
- kamari 200 000 “

Sahatavaran hinta

- kosteus > 12 % 170 euroa/ m³
- kosteus <= 12 % 200 euroa/ m³

Liite D: Energialaskennan lähtöarvot ja tulokset

2-vaih. perinteisen kanavakuivaamon energialaskenta

paksuus	mm	75	50	25	75	50	22	
		2-vaih. Mä 18 %	2-vaih. Mä 12 %	2-vaih. Mä 10 %	2-vaih. Ku 16 %	2-vaih. Ku 10 %	2-vaih. Ku 10 %	
Sahatavaratilavuus	m3/kuorma	29	25	17	29	25	16	
Puun tilavuuspaino	kg/m3	450	410	410	380	380	380	
Alkukosteus		69 %	71 %	110 %	62 %	62 %	103 %	
Loppukosteus		18 %	12 %	10 %	16 %	10 %	10 %	
Ulkolämpötila	°C	5	5	5	5	5	5	
UlkoRH	%	80	80	80	80	80	80	
Vaihe 1:								
Kuivausvaiheen kestoaika	h	88	63	24	67	67	19	
Kuivauslämpötila	°C	69	72	73	72	74	73	
Lämpötilaerotus alussa	°C	7	10	18	10	12	18	
Lämpötilaerotus lopussa	°C	1	3	4	3	6	5	
Kuivaamon kylmä pinta-ala	m2/kuorma	50	50	50	50	50	50	
Kuormien määrä	kpl	5	5	5	5	5	5	
Kuivaamon k-arvo	W/m2/K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Vuotokerroin		5	5	5	5	5	5	
Lämmönvaihtimen hyötysuhde		80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	
Puhaltimien teho	kW	60	66	90	60	66	90	
Kiertoilmamäärä	m3/s	47	62	85	47	62	90	
Ilman nopeus rimavälissä	m/s	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5	
Kosteus vaiheen 1 lopussa		0,34	0,2	0,3	0,24	0,16	0,27	
Vaihe 2:								
Kuivausvaiheen kestoaika	h	122	87	34	93	93	27	
Kuivauslämpötila	°C	69	72	73	72	74	73	
Lämpötilaerotus alussa	°C	7	10	18	10	12	18	
Lämpötilaerotus lopussa	°C	5	9	14	9	11	14	
Kuivaamon kylmä pinta-ala	m2/kuorma	50	50	50	50	50	50	
Kuormien määrä	kpl	7	7	7	7	7	7	
Kuivaamon k-arvo	W/m2/K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Vuotokerroin		5	5	5	5	5	5	
Lämmönvaihtimen hyötysuhde		80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	
Puhaltimien teho	kW	60	66	90	60	66	90	
Kiertoilmamäärä	m3/s	47	100	100	47	100	90	
Ilman nopeus rimavälissä	m/s	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5	
TULOS								
Lämpöpatterin nimellisteho	Vaihe 1	kW	228	386	1141	297	314	1203
		kW/m3	1,6	3,1	13,4	2,1	2,5	15,0
	Vaihe 2	kW	70	23	211	31	4	193
		kW/m3	0,3	0,1	1,8	0,2	0,0	1,7
Lämpöenergian kulutus	kWh/kuorma	4768	4356	5346	3710	3411	4370	
	kWh/m3	164	175	314	128	141	273	
	GJ/m3	0,59	0,63	1,13	0,46	0,51	0,98	
Sähköenergian kulutus	kWh/kuorma	2102	1652	869	1601	1761	689	
	kWh/m3	72,5	66,1	51,1	55,2	70,5	43,1	
	GJ/m3	0,26	0,24	0,18	0,20	0,25	0,16	
Energian kulutus yhteensä	GJ/m3	0,85	0,87	1,32	0,66	0,76	1,14	

OTC-kanavan energialaskenta

paksuus	mm	75	50	25	75	50	22	
		OTC	OTC	OTC	OTC	OTC	OTC	
		Mä 18 %	Mä 12 %	Mä 10 %	Ku 16 %	Ku 12 %	Ku 8 %	
Sahatavaratilavuus	m3/kuorma	29	25	17	29	25	16	
Puun tilavuuspaino	kg/m3	450	410	410	380	380	380	
Alkukosteus		69 %	71 %	110 %	62 %	62 %	103 %	
Loppukosteus		18 %	12 %	10 %	16 %	12 %	8 %	
Ulkolämpötila	°C	5	5	5	5	5	5	
UlkoRH	%	80	80	80	80	80	80	
Vaihe 1:								
Kuivausvaiheen kestoaika	h	68	44	17	56	36	15	
Kuivauslämpötila	°C	67	68	73	69	70	73	
Lämpötilaerotus alussa	°C	5	6	18	7	8	18	
Lämpötilaerotus lopussa	°C	1	1	4	2	2	4	
Kuivaamon kylmä pinta-ala	m2/kuorma	50	50	50	50	50	50	
Kuormien määrä	kpl	5	5	5	5	5	5	
Kuivaamon k-arvo	W/m2/K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Vuotokerroin		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
Lämmönvaihtimen hyötysuhde		80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	
Puhaltimien teho	kW	60	66	90	60	66	90	
Kiertoilmamäärä	m3/s	47	62	85	47	62	90	
Ilman nopeus rimavälissä	m/s	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5	
Kosteus vaiheen 1 lopussa		52 %	46 %	61 %	38 %	29 %	47 %	
Vaihe 2:								
Kuivausvaiheen kestoaika	h	148	96	37	124	79	35	
Kuivauslämpötila	°C	71	75	75	72	76	75	
Lämpötilaerotus alussa	°C	9	13	20	10	14	20	
Lämpötilaerotus lopussa	°C	1	1	4	2	2	4	
Kuivaamon kylmä pinta-ala	m2/kuorma	50	50	50	50	50	50	
Kuormien määrä	kpl	11	11	11	11	11	11	
Kuivaamon k-arvo	W/m2/K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Vuotokerroin		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
Lämmönvaihtimen hyötysuhde		80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	
Puhaltimien teho	kW	60	66	90	60	66	90	
Kiertoilmamäärä	m3/s	62	62	62	47	62	90	
Ilman nopeus rimavälissä	m/s	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5	
TULOS								
Lämpöpatterin nimellisteho	Vaihe 1	kW	156	273	1056	222	413	1164
		kW/m3	1,1	2,2	12,4	1,5	3,3	14,6
	Vaihe 2	kW	277	372	991	185	213	686
		kW/m3	0,9	1,4	5,3	0,6	0,8	3,9
Lämpöenergian kulutus	kWh/kuorm	5268	4769	5544	4027	3796	4570	
	kWh/m3	182	191	326	139	152	286	
	GJ/m3	0,65	0,69	1,17	0,50	0,55	1,03	
Sähköenergian kulutus	kWh/kuorm	1623	1157	609	1348	949	556	
	kWh/m3	56,0	46,3	35,8	46,5	38,0	34,8	
	GJ/m3	0,20	0,17	0,13	0,17	0,14	0,13	
Energian kulutus yhteensä	GJ/m3	0,86	0,85	1,30	0,67	0,68	1,15	

1-vaih. kanavakuivaamon energialaskenta

paksuus	mm	75	50	25	75	50	22
		1-vaihe Mä 18 %	1-vaihe Mä 12 %	1-vaihe Mä 10 %	1-vaihe Ku 16 %	1-vaihe Ku 12 %	1-vaihe Ku 10 %
Sahatavaratilavuus	m3/kuorma	29	25	17	29	25	17
Puun tilavuuspaino	kg/m3	450	410	410	380	380	380
Alkukosteus		69 %	71 %	110 %	62 %	62 %	103 %
Loppukosteus		18 %	12 %	10 %	16 %	12 %	10 %
Ulkolämpötila	°C	5	5	5	5	5	5
UlkoRH	%	80	80	80	80	80	80
Vaihe 1:							
Kuivausvaiheen kestoaika	h	232	133	61	160	107	43
Kuivauslämpötila	°C	69	73	73	72	75	75
Lämpötilaerotus alussa	°C	7	11	18	10	13	20
Lämpötilaerotus lopussa	°C	0	3	3	2	5	3
Kuivaamon kylmä pinta-ala	m2/kuorma	50	50	50	50	50	50
Kuormien määrä	kpl	11	11	11	11	11	11
Kuivaamon k-arvo	W/m2/K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Vuotokerroin		5	5	5	5	5	5
Lämmönvaihtimen hyötysuhde		80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Puhaltimien teho	kW	60	66	90	60	66	90
Kiertoilmamäärä	m3/s	47	62	85	47	62	90
Ilman nopeus rimavälissä	m/s	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5
Kosteus vaiheen 1 lopussa		18 %	12 %	10 %	16 %	12 %	10 %
Vaihe 2:							
Kuivausvaiheen kestoaika	h	0	0	0	0	0	0
Kuivauslämpötila	°C	69	69	69	69	69	69
Lämpötilaerotus alussa	°C	14	14	14	14	14	14
Lämpötilaerotus lopussa	°C	1	1	1	1	1	1
Kuivaamon kylmä pinta-ala	m2/kuorma	50	50	50	50	50	50
Kuormien määrä	kpl	0	0	0	0	0	0
Kuivaamon k-arvo	W/m2/K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Vuotokerroin		1	1	1	1	1	1
Lämmönvaihtimen hyötysuhde		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Puhaltimien teho	kW	60	70	100	60	70	100
Kiertoilmamäärä	m3/s	35	35	35	35	35	35
Ilman nopeus rimavälissä	m/s	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5
TULOS							
Lämpöpatterin nimellisteho	Vaihe 1	kW	290,3	515,3	1241,4	359,4	542,2
		kW/m3	0,9	1,9	6,6	1,1	2,0
	Vaihe 2	kW	0	0	0	0	0
		kW/m3	0	0	0	0	0
Lämpöenergian kulutus	kWh/kuorm	5579	5123	5661	4415	4102	4926
	kWh/m3	192	205	333	152	164	290
	GJ/m3	0,69	0,74	1,20	0,55	0,59	1,04
Sähköenergian kulutus	kWh/kuorm	1265	798	499	873	642	352
	kWh/m3	43,6	31,9	29,4	30,1	25,7	20,7
	GJ/m3	0,16	0,11	0,11	0,11	0,09	0,07
Energian kulutus yhteensä	GJ/m3	0,85	0,85	1,30	0,66	0,68	1,12

Kamarikuivaamon energialaskenta

paksuus	mm	75	50	25	75	50	22
		Kamari Mä 14 %	Kamari Mä 12 %	Kamari Mä 10 %	Kamari Ku 12 %	Kamari Ku 8 %	Kamari Ku 12 %
Sahatavaratilavuus	m3	145	125	85	145	125	80
Puun tilavuuspaino	kg/m3	450	410	410	380	380	380
Alkukosteus		69 %	71 %	110 %	62 %	62 %	103 %
Loppukosteus		14 %	12 %	10 %	12 %	8 %	12 %
Kuivauslämpötila	°C	75	75	75	75	75	75
Lämpötilaerotus alussa	°C	3	4	7	3	4	7
Lämpötilaerotus lopussa	°C	20	20	20	20	20	20
Lämpötilapudotus alussa	°C	1	1	1	1	1	1
Ulkolämpötila	°C	5	5	5	5	5	5
UlkoRH	%	80	80	80	80	80	80
Kuivaamon kylmä pinta-ala	m2	360	360	360	360	360	360
Kuivaamon k-arvo	W/m2/K	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Vuotokerroin		2	2	2	2	2	2
Lämmönvaihtimen hyötysuhde		0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Puhaltimien teho	kW	30	30	45	30	30	45
Kiertoilmamäärä	m3/s	47	62	85	47	62	90
Ylösajoaika, t_1	h	10	10	10	10	10	10
Kuivausvaiheen kestoaja, t_2	h	246	121	54	223	169	39
Tasaannutusaika, t_3	h	0	0	0	0	0	0
Ilman nopeus rimavälissä	m/s	5,0	5,0	4,5	5,0	5,0	4,5
TULOS							
Lämpöpatterin nimellisteho	kW	212	379	1008	177	223	1112
	kW/m3	1,5	3,0	11,9	1,2	1,8	13,9
Keskim. lämpöteho ylösajossa	kW	330	590	1568	275	347	1729
Tarvittava höyryteho	kW	228	0	0	173	40	0
	kW/m3	1,6	0,0	0,0	1,2	0,3	0,0
Lämpöenergian kulutus	MWh	31	28	32	24	23	25
	kWh/m3	216,9	221,6	371,7	164,3	180,5	317,3
	GJ/m3	0,78	0,80	1,34	0,59	0,65	1,14
Sähköenergian kulutus	kWh	7680	3930	2880	6990	5370	2205
	kWh/m3	53,0	31,4	33,9	48,2	43,0	27,6
	GJ/m3	0,19	0,11	0,12	0,17	0,15	0,10
Energian kulutus yhteensä	GJ/m3	0,97	0,91	1,46	0,77	0,80	1,24

Tekijä(t) Forsén, Holger & Tarvainen, Veikko			
Nimeke Sahatavaran jatkojalostuksen asettamat vaatimukset kuivauslaadulle ja eri tuotteille sopivat kuivausmenetelmät			
Tiivistelmä Sahatavaran jatkojalostuksessa on ensiarvoisen tärkeää, että raaka-aine on kuivattu niin, että tuotteeseen ei synny haitallisia muodonmuutoksia sen valmistusprosessissa eikä loppukäyttökohteessa, kuten esimerkiksi rakoja lautalattiaan, liimalevyn kupertumista tai osien yhteensopimattomuutta kokoonpanovaiheessa. Tutkimuksessa selvitettiin viidessä case-tapauksessa jatkojalosteen raaka-aineelle asetettavat kuivauslaatuvaatimukset, jotka täyttämällä jatkojalostuksen ja loppukäytön ongelmat voidaan välttää. Jatkojalostusprosessit ja -tuotteet olivat ikkunoiden ja ovien karmien valmistus, elektrostaattinen maalaus, liimapuupalkit, paneelit ja lattialaudat sekä sormijatkaminen. Kaikille on yhteistä, että keskikosteuden tulisi olla mahdollisimman lähellä loppukäyttökohteen tasapainokosteutta muodonmuutosten ja rakenteisiin syntyvien jännitysten ehkäisemiseksi. Toisaalta maalaukselle, höylyäykselle ja liimaukselle on kullekin omat optimaaliset puunkosteudet, joten jossain määrin tulee tehdä kompromisseja parhaan lopputuloksen aikaansaamiseksi. Esimerkiksi huonekaluraaka-ainetta joudutaan höyläämään ja maalaamaan alemmassa kosteudessa kuin prosessin kannalta olisi edullisinta. Nopeasta kuivauksesta johtuva pintakovuus (case hardening) aiheuttaa puuta työstettäessä haitallisia muodonmuutoksia, kuten esim. sahatavarasta halkaisemalla ja höyläämällä tehtyjen paneelien kupertumista. Maltillisella kuivauksella ja tasaannutuksella on haluttu case hardening -taso saavutettavissa. Tehdyn kyselytutkimuksen mukaan pintakovuudelle ei osata asettaa vaatimuksia. Tämän laatuksiteerin tunnetuksi tekeminen ja käyttöönotto vähentäisi ongelmia jatkojalostuksessa ja loppukäytössä ja parantaisi osaltaan puun imagoa. Kamarikuivauksen sekä yksi- ja kaksivaiheisen kanavakuivauksen soveltuvuusalueet sahatavaran paksuuden ja tavoitekosteuden suhteen selvitettiin kamarikuivauksen ja kaksivaiheisen kanavakuivauksen simulointimallien avulla. Kuivauskustannuksista otettiin huomioon pääoma- ja energiakustannukset. Tarkastelussa vakioitiin loppukosteus ja sen hajonta sekä halkeilun määrä. Tulokset tukevat vallitsevaa käsitystä, jonka mukaan kaksivaiheinen kanavakuivaamo on kustannustehokas 50 mm:n ja sitä ohuemman tavaran kuivaamiseksi jopa puusepäнкуivauksi. Paksumpaa tavaraa voidaan vientikuivata kanavissa, mutta laadullisesti parhaaseen tulokseen jonkin verran korkeammin kustannuksin päästään kamarikuivaamalla. Tulokset osoittivat, että 1-vaiheinen kanavakuivaamo on oikein mitoitettuna edelleenkin paras vaihtoehto 50 mm paksun ja sitä ohuemman tavaran vientikuivaukseen ja joissakin tapauksissa jopa puusepäнкуivaukseen.			
Avainsanat sawn timber, sawn lumber, sawmills, raw materials, upgrade, refining, deformation, kiln, drying, drying methods			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6263-1 (nid.) 951-38-6264-X (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinnumero R3SU00562	
Julkaisuaika Joulukuu 2003	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 69 s. + app. 9 s.	Hinta B
Projektin nimi		Toimeksiantaja(t)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Publications 1235-0621 (nid.) 1455-0849 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Author(s) Forsén, Holger & Tarvainen, Veikko			
Title Drying quality requirements in sawn timber refining and suitable drying methods for different products			
Abstract <p>In sawn timber refining it is important that raw-material has been dried in a way that there are no deformations in a product. This is important in product's production process as well as in its target of usage. Deformations may cause for instance cracks in wooden plank floor, convexity in edge glued panels or non compatible wooden components in assembly line.</p> <p>In this research we have found out drying quality requirements for raw material in five case studies. With these drying quality requirements it is possible to avoid problems in sawn timber refining and in end use. The wood refining processes were production of wooden windows and doors, electrostatic painting and fingerjointing. The refined products were windows, doors, glulam beams, panels and floorboards.</p> <p>All products and processes had a requirement in common: average moisture content should be as close as possible to equilibrium end moisture content to prevent wood products from deformations and structural tensions. On the other hand there are optimal wood moisture contents for painting, planing and glueing. In there moisture contents there is a need to compromise to achieve the best results. For instance they need to plane and paint raw material for furniture in a lower moisture content than it would be favourable for the process.</p> <p>Case hardening which results from fast drying causes those not desired deformations like for instance convexity when sawn timber has been split and planed for panels. With moderate drying and seasoning we can reach a desired case hardening level. We did a case hardening survey which tells that they find it difficult to set requirements for case hardening. However, there is a possibility to promote this quality requirement in a way where they would take the requirement into use. This would cut down problems in refining and end use and simultaneously improve image for wood raw material.</p> <p>We explained suitability for chamber kiln drying as well as both one and two stage channel kiln drying to be used to achieve targets in sawn timber thickness and target moisture content by simulation models. Capital and energy costs were taken into account as a part of drying costs. In this study we standardized end moisture content and its distribution as well as amount of cracking.</p> <p>The results support the dominant assumption, which says that two stage channel drying kiln has high cost efficiency for drying thicknesses of 50 mm and less for moisture contents of joinery products. Thicknesses more than 50 mm can be dried in channel kilns but to some extent better quality can be achieved by chamber kilns. The results show that one staged channel kiln with proper dimensions is still the best opportunity for sawn timber with thicknesses of 50 mm and less for moisture contents of export products and, in some cases, for moisture contents of joinery products, too.</p>			
Keywords sawn timber, sawn lumber, sawmills, raw materials, upgrade, refining, deformation, kiln, drying, drying methods			
Activity unit VTT Building and Transport, Puumiehenkuja 2 A, P.O. Box 1806, FIN-02044 VTT			
ISBN 951-38-6263-1 (soft back ed.) 951-38-6264-X (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number R3SU00562	
Date December 2003	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 69 p. + app. 9 p.	Price B
Name of project		Commissioned by	
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0613 (soft back ed.) 1455-0857 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Sahatavaran jatkojalostuksessa on ensiarvoisen tärkeää, että raaka-aine on kuivattu niin, että tuotteeseen ei synny haitallisia muodonmuutoksia sen valmistusprosessissa eikä loppukäyttökohteessa, kuten esimerkiksi rakoja laualattiaan, liimalevyn kupertumista tai osien yhteensopimattomuutta kokoonpanovaiheessa. Tärkeä on myös koko kuivausprosessissa valita oikea kuivausmenetelmä, jolla on suuri merkitys mm. sahatavaran loppulaatuun, energiankulutukseen ja kustannuksiin.

Tämän tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää esimerkitapauksin, miten sahatavara tulee kuivata, jotta jatkojalostus sujuu ongelmitta ja lopputuotteet ovat virheettömiä. Tutkimuksessa selvitettiin viiden tuoteryhmän (ovien ja ikkunoiden, liimalevyjen, seinäpaneelien, liimapuupalkkien sekä lattialautojen) raaka-ainesahatavarakkeelle asetettavat kuivauslaatuvaatimukset sekä se, miten poikkeaminen niistä vaikuttaa lopputuotteeseen. Kaikille tuotteille on yhteistä, että keskikosteuden tulisi olla mahdollisimman lähellä loppukäyttökohteen tasapainokosteutta muodonmuutosten ja rakenteisiin syntyvien jännitysten ehkäisemiseksi.

Toisena tavoitteena tässä tutkimuksessa oli selvittää simulointimallien avulla, millä nykyisin yleisesti käytössä olevilla kuivausmenetelmillä (kamarikuivaus sekä yksi- tai kaksivaiheinen kanavakuivaus) mikäkin sahatavarakkeelaatu ja -dimensio tulisi kuivata, jotta tavoitekosteus ja haluttu kuivauslaatu saavutettaisiin taloudellisesti. Valintaan vaikuttaa kuivauskustannusten lisäksi se, kuinka suuria määriä eri tavaroita (sahatavarakkeelaatu-dimensio-kosteusluokka) tuotetaan. Kaikilla kuivausmenetelmillä on omat mitoitusratkaisunsa riippuen kuivauslaadusta. Kuivaamaa ei voida rakentaa sellaiseksi, että se toimisi laadullisesti ja kapasiteetin kannalta optimaalisesti kaikilla sahan tuotannossa olevilla tavaroilla.

Tätä julkaisua myy	Denna publikation säljs av	This publication is available from
VTT TIETOPALVELU	VTT INFORMATIONSTJÄNST	VTT INFORMATION SERVICE
PL 2000	PB 2000	P.O.Box 2000
02044 VTT	02044 VTT	FIN-02044 VTT, Finland
Puh. (09) 456 4404	Tel. (09) 456 4404	Phone internat. +358 9 456 4404
Faksi (09) 456 4374	Fax (09) 456 4374	Fax +358 9 456 4374