



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

LÄMPÖPUUN PROSESSIPARAMETRIEN VAIKUTUS HAVUPUUSAHATAVARAN VÄRIIN JA ISKULUJUUTEEN

Lämpöpuuyhdistys ry.

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Puutekniikan koulutusohjelma
Puutekniikan suuntautumisvaihtoehto
Opinnäytetyö
Syksy 2012
Olli Kervinen

Lahden ammattikorkeakoulu
Puutekniikan koulutusohjelma

KERVINEN, OLLI:

Lämpöpuun prosessiparametrien vaikutus
havupuusahatavaran väriin ja
iskulujuuteen
Lämpöpuuyhdistys ry.

Puutekniikan opinnäytetyö, 97 sivua, 3 liitesivua

Syksy 2012

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö on osa lämpöpuuyhdistyksen laajaa tieteellistä tutkimusprojektia, jonka tarkoituksena on tuottaa uutta tietoa havupuiden eri laatuisten ja lämpökäsittelyprosessin eri parametrien vaikutuksesta ThermoWood-tuotteisiin. Tämän opinnäytetyön aiheena on eri havupuulaatuisten lämpökäsittelyprosessit eri parametreilla ja 32 mm:n dimension eri laatuisten värinmittaus CIELab-värinmittausmenetelmällä pinta- ja sydänlapeelta sekä näiden värinmittaustulosten ja vastaavien kappaleiden Sharpy iskulujuustestien tulosten korreloinnin tutkiminen.

Tutkimuksessa käytetty materiaali sahattiin, lajiteltiin ja esikuivattiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa, josta materiaali tasaannutusten jälkeen kuljetettiin Lahden ammattikorkeakoululle lämpökäsitteltäväksi. Materiaali lämpökäsiteltiin Tekmawood-lämpökäsittelylaitoksessa dimensioittain lämpöpuuyhdistykseltä saaduilla eri prosessikaavoilla. Lämpökäsittelyjä tehtiin aikapohjaisella WinTek 2000 -ohjelmalla yhteensä 12 kappaletta ja jokaisessa käsittelyssä käytettiin eri parametreja lämpökäsittelylämpötilan ja eri aikojen ja vaiheiden suhteen. Värinmittaukset suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulussa Chroma Meter CR-210 -värianalyysilaitteella CIELab -värinmittausmenetelmällä. Iskulujuustestit suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun Sharpy Roell Amsler Rkp 300 -iskuvasaralla standardin EN ISO 179-1 mukaisesti.

Tutkimuksessa tehdyistä mittauksista voidaan yleisesti todeta, että puun lämpökäsittely tummentaa puuta eli pienentää L*-värikomponenttia. Sydänlapeen väri on vaaleampaa kuin pintalapeen väri kaikissa käsittelylämpötiloissa ja pitoajoilla. Kummankin puulajin hyvälaatuiset optimilaadut olivat tummempia kuin huonompilaatuiset lankeavat laadut. Iskulujuustuloksia vertailtaessa vastaaviin L*-värikomponentteihin käy ilmi, että tummempi puu on iskulujuudeltaan heikompaa. Tuloksista saatiin hyödyllistä tietoa havupuiden eri laatuisten värien käyttäytymisestä lämpökäsittelyprosessin eri parametreilla. Näitä käsittelyitä ja mittaustuloksia voidaan hyödyntää teollisuudessa, laadunvalvonnassa sekä jatkotutkimuksissa.

Asiasanat: thermowood, lämpöpuu, puun lämpökäsittely, värinmittaus, iskulujuus

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Wood Technology

KERVINEN, OLLI: Effect of the process parameters of
ThermoWood on the color and impact
strength of softwood
ThermoWood Association

Bachelor's Thesis in Wood Technology, 97 pages, 3 pages of appendices

Autumn 2012

ABSTRACT

This thesis is part of an extensive scientific research project of the ThermoWood Association. The purpose of the thesis was to create new information about how thermo wood products are affected by the use of different softwood qualities and various parameters of the heat treatment process. The topic of this thesis is heat treatment processes of different softwood qualities with various parameters and color measurements of 32-millimeter-dimensioned pieces of surface and heart profiles of various qualities of wood, using the CIELab color measurement method. The correlation of the color measurement results with the results of Sharpy impact strength tests of equal pieces were also examined.

Materials used in the survey were sawed, sorted and pre-dried at Kymenlaakso University of Applied Sciences. After the materials were equalized, they were transported to Lahti University of Applied Sciences for heat treatment. Materials were heat treated in the Tekmawood plant according to dimensions with various process formulas provided by the ThermoWood Association. Twelve heat treatments were carried out with WinTek 2000, which is a time-based program. In every process different parameters were used depending on the ratio of heat-treatment temperature, different periods and different phases. The color measurements were carried out at Mikkeli University of Applied Sciences with the Chroma Meter CR-210 color analysis device and CIELab color measurement method. Impact strength tests were carried out using the Sharpy Roell Amsler Rkp 300 impact hammer according to standard EN ISO 179-1.

From the measurements of the survey it can be generally stated that heat treatment darkens the wood, therefore reducing the L*-color component of wood. The color of the heart profile is lighter than the surface with every treatment temperature and time. Optimum grade pieces got darker than fall grade pieces of inferior qualities in both softwood species. Impact strength results in comparison to the corresponding L* color components show that the darker wood has weaker impact strength. The results provided useful information about color behavior of various qualities of softwood with various parameters of the heat treatment process. The results can be used in industry, quality control and follow-up studies.

Key words: thermowood, heat treatment, color measurement, impact strength

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Mikkelin ammattikorkeakoulun toimeksiannosta Lahdessa, Mikkelissä ja Kotkassa vuosien 2011-2012 aikana.

Suuret kiitokset tämän opinnäytetyön osalta kuuluvat tutkimuspäällikkö Timo Aavakalliolle, joka antoi henkilökohtaisia tiedonantoja sekä tärkeää ohjausta ja neuvoja käytännön tutkimusten suorittamisessa ja opinnäytetyön suunnittelussa ja toteutuksessa.

Laboratoriomestari Markku Lipponen oli korvaamaton henkilö apuna käytännön lämpökäsittelyjen suorittamisessa sekä henkilökohtaisena tiedonantajana ja opastajana.

Suuret kiitokset kuuluvat myös ohjaavalle opettajalle Ilkka Tarvaiselle, joka toiminnallaan järjesti tämän opinnäytetyön, sekä huolehti projektiin liittyvistä käytännön asioista ja työn ohjaamisesta oikeaan suuntaan.

Kiitokset kuuluvat myös kaikille muille tämän projektin parissa työskennelleille henkilöille.

Lahdessa 12.12.2012

Olli Kervinen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	LÄMPÖPUUN VALMISTUS JA KÄYTTÖ	3
2.1	ThermoWood historia	3
2.2	ThermoWood-prosessi	4
2.2.1	Laitteet	4
2.2.2	Kuivausvaihe	6
2.2.3	Lämpökäsittelyvaihe	7
2.2.4	Tasaannutusvaihe	8
2.3	ThermoWood-tuoteluokitus	9
2.3.1	Thermo S	10
2.3.2	Thermo D	10
2.4	Käyttökohteet	11
2.4.1	Sisäkäyttö	12
2.4.2	Ulkokäyttö	14
2.4.3	Rakennusmateriaalina	15
2.4.4	Lämpöpuu, painekyllästetty puu ja lahonsuojaus	16
3	LÄMPÖPUUN MUUTOKSET JA OMINAISUUDET	17
3.1	Termokemialliset muutokset	17
3.1.1	Selluloosa ja hemiselluloosa	17
3.1.2	Ligniini ja uuteaineet	18
3.2	Tiheyden ja lujuuden muutokset	19
3.2.1	Taivutuslujuus	19
3.2.2	Puristuslujuus	20
3.2.3	Halkaisulujuus	20
3.2.4	Muut lujuudet	21
3.3	Värimuutokset	21
3.4	Tasapainokosteus ja kosteuseläminen	23
3.5	Lämmönjohtavuus ja paloturvallisuus	24
3.6	Biologinen kestävyys ja sään kesto	25
3.7	Jännitykset	26
3.7.1	Pintahalkeilu	26
3.7.2	Sisähalkeilu	26
3.7.3	Muodonmuutokset	27

4	LÄMPÖPUUN TYÖSTÄMINEN JA LAADUNVALVONTA	28
4.1	Työstöominaisuudet	28
4.1.1	Höylääminen	28
4.1.2	Sahaaminen	29
4.1.3	Hiominen	30
4.1.4	Jyrsiminen	30
4.1.5	Liimaaminen	30
4.1.6	Kiinnittäminen	31
4.2	Lämpökäsitellyn puun laatu	32
4.2.1	Sahatavaran laatu	32
5	KOKEELLINEN OSA	34
5.1	Tukkien sahaus	34
5.2	Koekappaleiden merkinnät	36
5.3	Koekappaleiden kuivaus	37
5.4	Koekappaleiden pätkiminen ja kosteuskappaleet	38
5.5	Koekappaleiden kuvaaminen ja oksien tarkastelu	40
5.6	Lämpökäsittelyt	41
5.6.1	TekmaWood lämpökäsittelylaitos	41
5.6.2	WinTek 2000 Chamber 5 – Heat Treatment-ohjelma	44
5.6.3	Koekäsittelyt	48
5.6.4	Lämpökäsittelykuorman teko	48
5.6.5	Lämpökäsittelyt ja lämpökäsittelykaavat	50
5.7	Tutkimuskoekappaleiden valmistus	54
5.8	Värimittaus	55
5.9	Värimittausmenetelmä (CIELab)	57
5.10	Iskulujuusmittaus	58
6	TULOKSET	60
6.1	Värimittaus	60
6.1.1	L*a*b* -värikomponentit lämpötilassa 212 °C	63
6.1.2	L*a*b* -värikomponentit pitoajassa 3 h	67
6.1.3	Kokonaisvärinmuutokset (ΔE)	71
6.2	Iskulujuus	74
7	TULOSTEN ANALYSOINTI	77
7.1	L*a*b* -värikomponentit lämpötilassa 212 °C	77

7.2	L*a*b* -värikomponentit pitoajassa 3 h	78
7.3	Kokonaisvärinmuutokset (ΔE) lämpötilassa 212 °C	79
7.4	Kokonaisvärinmuutokset (ΔE) pitoajassa 3 h	79
7.5	Iskulujuus	79
7.6	Vertailua muihin tutkimustuloksiin	80
8	YHTEENVETO	82
8.1	Värimittaus	82
8.2	Iskulujuus	83
8.3	Tavoitteet ja niiden toteutuminen	84
8.4	Kehitysehdotukset	85
	LÄHTEET	88
	LIITTEET	91

1 JOHDANTO

ThermoWood on Lämpöpuuyhdistys ry:n omistama tavaramerkki, jolla tunnistaa Suomessa kehitetyllä menetelmällä valmistetut lämpöpuutuotteet. Lämpöpuu eli lämpökäsittely puu valmistetaan modifioimalla puuta yli 160 C:n lämpötilassa käyttäen vain korkeaa lämpötilaa ja vesihöyryä. Tuloksena ovat mm. puun parantuneet lahonkesto-, säänkesto- ja lämmöneristävyysominaisuudet, jalopuumainen väri sekä puun pienentynyt kosteuseläminen ja pihkan poistuminen puusta. Lämpöpuuyhdistys on perustettu vuonna 2000 ja sen tavoitteena on lämpöpuun käytön yleinen edistäminen. ThermoWood-tavaramerkin käyttäjät tekevät yhteistyötä mm. lämpöpuun tuoteluokituksessa, laadunvalvonnassa ja tutkimuksessa.

Tämä opinnäytetyö on osa Lämpöpuuyhdistys ry:n laajaa tutkimusprojektia ITWA, 2nd-Generation TMT ja sen työpakettia WP2: Raw Material Based Process Optimisation, jossa Lahden ammattikorkeakoulun lisäksi mukana on myös Mikkelin ammattikorkeakoulu. Tutkimuksen tarkoitus on tuottaa tieteellistä tutkimusta puumateriaalin eri laatuja ja lämpökäsittelyprosessin eri parametrien vaikutuksesta ThermoWood-tuotteisiin. Tämä opinnäytetyö käsittelee Lämpöpuuyhdistys ry:n tutkimusprojektia lähes projektin alkuvaiheista lähtien. Tarkemmin tässä opinnäytetyössä perehdyttiin lämpökäsittelyprosessien suorittamiseen ja myöhemmin värinmittauksiin ja iskutaivutuslujuuksiin.

Varsinaisen työn ensimmäisenä tarkoituksena oli lämpökäsittellä männyn ja kuusen eri dimensioita eri lämpötiloissa ja eri ajoissa. Sahatut dimensiot olivat 50, 32 ja 25 mm. Lämpökäsittelyjä tehtiin yhteensä 12 erää lämpötiloissa 190 - 220° C ja ajoilla 1 - 6 h. Ohjelmassa käytettiin aikapohjaisuuteen perustuvaa menetelmää, joka on nykyään yleistymässä lämpökäsittelyprosesseissa. Työn toisena tarkoituksena oli tutkia käsiteltyjen 32 mm:n dimension kappaleiden värinmuutoksia pinta -ja sydänlapeelta CIELab-värinmittausmetelmän avulla sekä värin ja iskutaivutuslujuuden suhdetta toisiinsa.

Tutkimusprojekti käynnistyi tämän opinnäytetyön osalta marraskuussa 2011. Lämpökäsitteltävät koekappaleet sahattiin ja esikuivattiin Kymenlaakson

ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa talven ja alkukevään 2012 aikana. Kaikki 12 lämpökäsittelyerää käsiteltiin Lahden ammattikorkeakoulun tiloissa kevään 2012 aikana. Kesän 2012 aikana suoritettiin testit Mikkelin ammattikorkeakoulun tiloissa, minkä jälkeen saadut tulokset analysoitiin syksyllä 2012.

Työn teoriaosuudessa käydään läpi melko laajasti oleelliset asiat lämpökäsittelyprosessista, käyttökohteista, eri muutoksista ja ominaisuuksista, työstettävyydestä sekä laadusta. Kokeellinen osa käsittelee tutkimuksen alkuvaiheet tukkien sahausta lämpökäsittelyihin ja värinmittauksiin. Tulokset osassa esitellään työn tulokset taulukkoina ja diagrammeina. Tulosten analysoinnissa analysoidaan tuloksia, joista tehdään johtopäätöksiä ja pohdintoja yhteenvedossa. Kehitysehdotuksiin on koottu mahdollisia jatkotutkimustoimenpiteitä sekä tutkimuksessa esiintyneitä ongelmakohtia.

2 LÄMPÖPUUN VALMISTUS JA KÄYTTÖ

2.1 ThermoWood historia

ThermoWood on lämpökäsiteltyä puuta (lämpöpuu) ja se on Lämpöpuuyhdistys ry:n tavaramerkki. Lämpöpuu itsessään on muinainen keksintö. Vuosisatojen ajan on tiedetty, että puun pinnan polttaminen avotulella tekee puusta kestävämpää ulkokäytössä. Jo ihmisen esi-isät hiilsivät maahan upotettavien seipäiden päät pidentääkseen niiden lahonkestävyyttä. Viikingit käyttivät tätä menetelmää ulkorakennelmissaan, kuten aidoissa. Satoja vuosia sitten myös intiaanit käsittelivät tiipiin tukikepit nuotiossa, jotta tiipii kestäisi vuosia vaihtelevissa sääolosuhteissa. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-1; Suomen Lämpöpuu 2011.)

Tieteellistä tutkimusta puun lämpökäsittelystä ovat tehneet Stamm ja Hansen Saksassa 1930-luvulla sekä White Yhdysvalloissa 1940-luvulla. Saksalaiset Bavendam, Runkel ja Buro jatkoivat aiheen tutkimista 1950-luvulla. Kollman ja Schneider julkaisivat tuloksensa 1960-luvulla ja Rusche ja Burmester 1970-luvulla. Tutkimustyötä on jatkettu Suomessa, Ranskassa ja Alankomaissa 1990-luvulla. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-1.)

Tarkimmat ja kattavimmat tutkimukset aiheesta on tehnyt VTT Suomessa ja ThermoWoodia valmistetaan VTT:n kehittämällä menetelmällä. Merkittävää käytännön tutkimustyötä on tehty myös YTI:ssä. Lämpöpuun teollinen valmistus alkoi Suomessa 1990-luvun lopussa ja vuoteen 2010 mennessä lämpöpuuta valmistettiin jo lähes 94 000 kuutiometriä. Lämpöpuuyhdistys ry:hyn kuuluu tällä hetkellä 11 yritystä ja kaksi yritystä, jotka toimittavat lämpöpuulaitteistoja. (Metsäteollisuuden tietopalvelu 2006.)

2.2 ThermoWood-prosessi

VTT on kehittänyt teollisuusmittaisen puun lämpökäsittelyprosessin yhdessä suomalaisen puutuoteteollisuuden kanssa. ThermoWood-prosessi on lisensoitu Lämpöpuuyhdistys ry:n jäsenille. ThermoWood-prosessi voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen: kuivausvaihe (lämpötilan kohottaminen ja kuumakuivaus), lämpökäsittelyvaihe ja tasaannutusvaihe (jäähdytys ja kostutus). (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-1, 2-1.)

Lämpötilaa nostettaessa tai laskettaessa käytetään erityistä säätöjärjestelmää, jotta voidaan estää puun pinnan ja sisäosan halkeileminen. Eri puulajeille ja eridimensioille käytetään omia säätöarvoja. Raaka-aineena voidaan käyttää tuoretta tai uunikuivattua puuta. Jos prosessi käynnistetään tuoreella puulla, puu voidaan kuivata nopeaa kuumakuivausprosessia hyödyntämällä. Nopea kuivuminen on mahdollista, koska värimuutoksista ei tarvitse huolehtia ja pihka poistuu puusta joka tapauksessa lämpökäsittelyprosessin aikana. Menetelmä soveltuu sekä havu- että lehtipuun käsittelyyn. Prosessi kuitenkin optimoidaan jokaista puulajia varten erikseen. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-1, 2-1.)

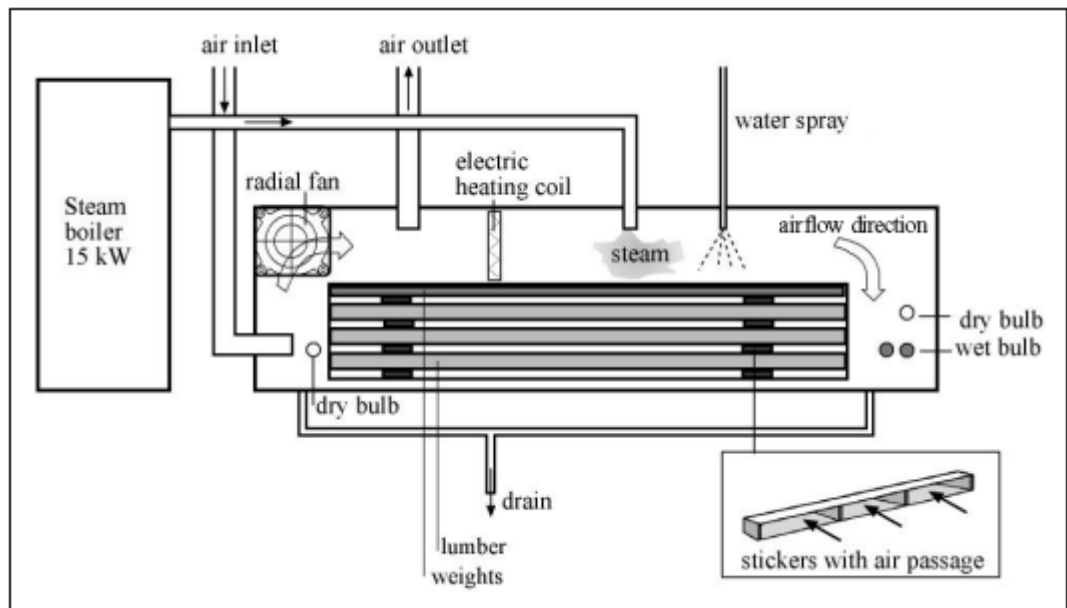
2.2.1 Laitteet

Lämpökäsittelyprosessissa käytetään vettä, höyryä ja korkeita lämpötiloja. Yhdessä puusta haihtuvien ainesosien kanssa prosessin olosuhteet aiheuttavat korroosiota. Näin ollen lämpökäsittelylaitteet valmistetaan ruostumattomasta teräksestä. Korkea lämpötila edellyttää lisäksi tavanomaisista puhallin- ja patteriratkaisuista poikkeavia rakenteita sekä turvavarusteita. Prosessissa tarvittavan korkean lämpötilan tuottamiseen on kuumaöljyteknikka parhaiten soveltuva. Kuumaöljykattilan lämmönlähteenä voi olla biopolttoaine, polttoöljy tai kaasu. Myös muita lämmitysratkaisuja, kuten suora sähkölämmitys, on käytössä. Prosessilaitteiston tulee sisältää myös höyrynkehitin, jolla tuotetaan prosessissa tarvittava höyry. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-3.)

Prosessin aikana puusta vapautuvat prosessikaasut käsitellään esimerkiksi polttamalla. Käsittelyn ensisijainen tarkoitus on ehkäistä prosessissa puusta

irtoavista yhdisteistä ympäristölle aiheutuvia hajuhaittoja. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-3.)

Suomalainen yritys Jartek on lämpökäsittelylaitteiden johtava toimittaja maailmassa. Toimiala on melko nuori, mutta yrityksellä on jo pitkä kokemus erilaisista teknisistä ratkaisuista. Kokemuksen perustana on noin 40 toimitettua kuumakuivaamoja ja vahva tuntemus lämpökäsittelylaitosten toimittamisesta. Jartekin lämpökäsittely-yksikkö suunnittelee energiataloudelliset lämpökäsittelylaitteet asiakkaan resurssien, toimintojen ja vaatimusten mukaan pieniin sekä suuriin tuotantolaitoksiin. (Jartek 2011.) Tässä työssä käytettiin Jartekin TekmaWood-lämpökäsittelylaitosta ja WinTek 2000-ohjelmaa. Lämpökäsittelylaitoksesta kerrotaan lisää luvussa 5.6.1 TekmaWood lämpökäsittelylaitos. Kuviossa 1 on graafinen kuvaus lämpökäsittelylaitteistosta.



KUVIO 1. Graafinen kuvaus lämpökäsittelylaitteistosta (Johansson 2008, 15)

2.2.2 Kuivausvaihe

Kuivaus on lämpökäsittelyprosessin vaiheista pitkäkestoisin. Vaihetta kutsutaan myös kuumakuivaukseksi, jossa puu kuivataan kuivaksi ennen lämpökäsittelyvaihetta. Kuumakuivauksella tarkoitetaan kuivausta yli 100 °C:n lämpötilassa, tavallisesti korkeimmillaan n. 120 - 130 °C:n lämpötilassa. Kuumakuivauksessa ei ole ilmanvaihtoa, vaan veden kiehumisesta syntynyt vesihöyry poistuu lievän ylipaineen avulla poistoläpän kautta. Kuivaus on nopea, kestoajan ollessa 4 - 15 tuntia. Kuumakuivaus aloitetaan nostamalla kuivausilman lämpötila aluksi nopeasti n. 100 °C:seen alkulämmityksen ajaksi. Tästä lämpötilaa nostetaan vähitellen ja vasta myöhemmin sisäosien kuivuttua alle puun syiden kyllästymispisteen (PSKP) lämpötilaa nostetaan 120 - 130 °C:seen asti. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-3; Salmi M. LAMK kuivausmenetelmät-luentomateriaali 2011.)

Kuumakuivauksessa käytetään alkuhöyrytystä alkulämmityksen aikana. Höyrytys saa olla mieluummin liian voimakas kuin liian heikko. Alkuhöyrytyksellä estetään puun kuivuminen lämmitysvaiheessa ja sillä tasataan alkukosteuseroja. Kokonaiskosteuden on hyvä nousta ilma-kuivalla puulla jonkin verran. Alkulämmityksessä puun sisäosien lämpötilan annetaan nousta n.100 °C:seen ja vasta sitten aloitetaan kuivaus. Aikaa alkulämmitykseen kuluu noin yksi tunti puutavaran paksuussenttimetriä kohti. (Salmi M. LAMK kuivausmenetelmät-luentomateriaali 2011.)

Kuumakuivaamon kuivauslämpötila saa olla korkeintaan 15–18 °C korkeampi kuin puun sisäosan lämpötila. Suurempi pintaosan ja sisäosan lämpötilaero aiheuttaa suuren kosteuseron (=gradientin) sisäosan ja pintaosan välille. Pintaan syntyy tällöin kuumakuivauksessa voimakas pintakovuus ja myöhemmin sisähälkeamia. Puun sisäosan lämpötila on 100 °C ainakin niin kauan kuin siinä on vapaata vettä. Siksi kuivauslämpötila nostetaan alkulämmityksen jälkeen esim. 110°C:seen ja pidetään näissä lukemissa kunnes sisäosat ovat alle PSKP:n. Kuivauksen kriittisin vaihe on PSKP:n vaiheilla, koska puun sisäosa voi olla vielä selvästi yli PSKP:n, pintaosien ollessa jo melkoisesti sen alle, eli sisäiset jännitykset ovat voimakkaita. Kun tämä vaihe on varmuudella ohitettu ja sisä- ja

pintaosa kuivuvat (=kutistuvat) tasaiseen tahtiin, nostetaan lämpötilaa korkeammaksi. (Salmi M. LAMK kuivausmenetelmät-luentomateriaali 2011.)

Kuivatusvaiheen pituus riippuu puun alkukosteudesta, puulajista ja sahatavaran paksuudesta. Raaka-aine voi olla tuoretta tai valmiiksi kuivattua. Kuivauksen onnistuminen on tärkeää sisähälkeämien välttämiseksi. Virheellinen kuivaus aiheuttaa herkästi kuivausvikoja. Kuivaus kuumassa vähentää halkeiluriskiä ja tasaa puun sisäisiä kasvujännityksiä, jolloin muotovikoja syntyy vähemmän. Halkeiluriski vähenee ja muodonmuutosten sietokyky paranee, koska kostean puun elastisuus kasvaa lämpötilan noustessa. (Pro puu ry 2011.)

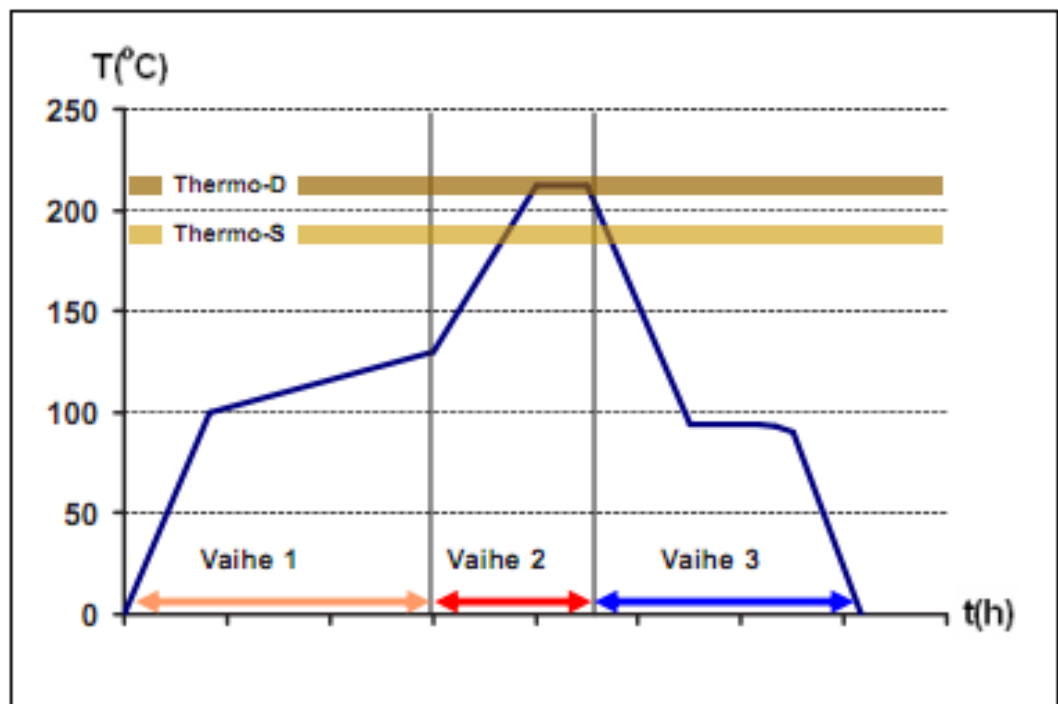
2.2.3 Lämpökäsittelyvaihe

Lämpökäsittely tehdään suljetussa kammiossa, jonka lämpötila nostetaan käsittelyasteesta riippuen 185 - 215 °C:een. Lämpökäsittelyvaihe alkaa välittömästi kuumakuivatusvaiheen jälkeen. Kuivauksen ja lämpökäsittelyn aikana käytetään vesihöyryä suojakaasuna. Suojakaasu estää puun syttymisen ja vaikuttaa puussa tapahtuviin kemiallisiin muutoksiin. Lämpökäsittelyvaiheen pitoaika on 2 - 3 tuntia. (Kärkkäinen 2003, 333.)

Lämpöpuun tuotannossa käytetyissä lämpötiloissa muodostuu runsaasti uusia yhdisteitä puun ainesosien hajotessa. Syntyviä yhdisteitä ovat mm. etikka- ja muurahaishappo. Korkeissa lämpötiloissa hajoaminen on huomattavaa myös ilman happea. Kuusta koskevassa tutkimuksessa näytteen massa väheni 5 % käsittelylämpötilan ollessa 210 °C, 10 % lämpötilan ollessa 230 °C ja 20 % lämpötilan ollessa 250 °C. (Kärkkäinen 2003, 333.)

2.2.4 Tasaannutusvaihe

Tasaannutus suoritetaan lämpökäsittelyn jälkeen. Puuta jäähdytetään hallitusti prosessin jälkeen, koska suuri lämpötilaero puun ja ulkoilman välillä aiheuttaa halkeilua. Puuhun täytyy myös imeyttää kosteutta vesisuihkutusjärjestelmien avulla, jotta se saadaan sopivaan toimituskosteuteen. Puun loppukosteudella on myös tärkeä merkitys sen työstöominaisuuksiin, liian kuivaa puuta on vaikea työstää. Kun lämpötila on 80–90 °C, tehdään uudelleenkostutus, jossa puun kosteuspitoisuus saadaan käytettävälle 4–7 %:n tasolle. Tasaannutusvaihe kestää käsittelylämpötilasta ja sahatavarasta riippuen noin 5 – 15 tuntia. Kuviossa 2 havainnollistetaan ThermoWood-prosessin vaiheet. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-3.)



KUVIO 2. ThermoWood-prosessin vaiheet (Hyvä tietää lämpöpuusta-esitys 2005)

2.3 ThermoWood-tuoteluokitus

Yleinen ThermoWood®-tuoteluokitus perustuu Lahontorjuntayhdistys ry:n ja alan teollisuuden toimesta vuosina 2000 - 2001 toteutettuun Lämpökäsitellyn puun luokitus -projektiin. Teollisuuden lisäksi Tekes osallistui hankkeen rahoitukseen. Projektiin liittyvä tutkimusosuus ostettiin VTT:ltä, joka on suorittanut puun lämpökäsittelyyn liittyvää tutkimusta jo 1990-luvun alkuvuosista lähtien.

Havu- ja lehtipuille on oma luokituksensa, koska niiden ominaisuudet poikkeavat selvästi toisistaan. ThermoWoodilla on kaksi yleistä tuoteluokkaa, joiden nimet ovat Thermo-S ja Thermo-D. Yleisessä ThermoWood-tuoteluokituksessa korostetaan keskeisinä ominaisuuksina kosteuselämistä, värinmuutosta ja biologista kestävyyttä. Taulukossa 1 esitetään yhteenveto ThermoWood - prosessin vaikutuksista puun ominaisuuksiin tuoteluokittain. (Lämpöpuuyhdistys ry 2011.)

Useamman luokan käyttö ei ole järkevää, koska puun ominaisuudet muuttuvat aluksi hitaasti lämpötilan noustessa. Käsitteilylämpötilan kohotessa yli 200 °C:seen on ominaisuuksien muuttuminen nopeaa. Useamman kuin kahden luokan käytössä olisi vaarana ominaisuuksien sekoittuminen eri luokkien välillä.

Maksimilämpötilana 215 °C on riittävä, mutta ei kuitenkaan niin vielä niin korkea, että lämpökäsittelystä johtuvat vaikutukset puun rakenteellisiin ominaisuuksiin olisivat merkittäviä. (Lämpöpuuyhdistys ry 2011.)

Teolliselle asiakkaalle toimitettava lämpöpuutuotteet lämpökäsitellään ostajan ja valmistajan välisen sopimuksen mukaisesti, jolloin käsitteleyaste voidaan optimoida tarkasti loppukäyttökohteen mukaan. Tällöin on kyse ThermoWoodista, jota ei luokitella yleisen tuoteluokituksen mukaisesti. (Lämpöpuuyhdistys ry 2011.)

2.3.1 Thermo S

Thermo-S-nimen S-kirjain tulee englanninkielisestä sanasta stability (suomeksi vakaus, pysyvyys). Ulkonäkö ja vakaus ovat merkittäviä ominaisuuksia tämän tuoteluokan tuotteiden käyttökohteissa. Puun keskimääräinen kosteuseläminen thermo-S-luokassa on tangentin suunnassa 6 - 8 %. Thermo-S-luokan tuotteet on luokiteltu standardin EN 113 mukaisesti melko kestäväksi eli ne kuuluvat luontaiselta lahonkestävyydeltään luokkaan 3. (ThermoWood-käsikirja 2003, 4-1)

2.3.2 Thermo D

Thermo-D-nimen D-kirjain tulee englanninkielisestä sanasta durability (suomeksi kestävyys, kulutuskestävyys). Ulkonäkö ja biologinen kestävyys ovat merkittäviä ominaisuuksia tämän tuoteluokan tuotteiden käyttökohteissa. Puun keskimääräinen kosteuseläminen thermo-D-luokassa on tangentin suunnassa 5 - 6 %. Thermo-D-luokan tuotteet on luokiteltu standardin EN 113 mukaisesti kestäväksi eli ne kuuluvat luontaiselta lahonkestävyydeltään luokkaan 2. (ThermoWood-käsikirja 2003, 4-1, 5-1.)

TAULUKKO 1. Yhteenveto ThermoWood -prosessin vaikutuksista puun ominaisuuksiin tuoteluokittain. (ThermoWood-käsikirja 2003, 5-1)

Havupuut (mänty ja kuusi)		
	Thermo-S	Thermo- D
Käsittelylämpötila	190 °C	212 °C
Säänkestävyys	+	++
Dimensiostabiiisuus	+	++
Taivutuslujuus	ei muutosta	-
Värin tummuus	+	++

Lehtipuut (koivu ja haapa)		
	Thermo- S	Thermo- D
Käsittelylämpötila	185 °C	200 °C
Säänkestävyys	ei muutosta	+
Dimensiostabiiisuus	+	+
Taivutuslujuus	ei muutosta	-
Värin tummuus	+	++

2.4 Käyttökohteet

Pääsääntöisesti Thermo-S-luokan tuotteet soveltuvat paremmin sisäkäyttöön ja Thermo-D- luokan tuotteet paremmin ulkokäyttöön. Thermo-D-luokan tuotteet sopivat sisäkäyttöön, jos halutaan käyttää tummia sävyjä. S-luokan terassituotteita voidaan käyttää ulkona katetuissa tiloissa. Työstöominaisuudet ovat S-luokassa hyvät, mutta D-luokan työstäminen on hieman vaativampaa. Lämpökäsitellystä puusta saadaan kotoisia, mittapysyviä, hyvin säilyviä ja jalopuulta näyttäviä rakenteita sisustamiseen ja ulkorakentamiseen. Lämpöpuu sopii myös keinotekoisesti vanhan patinoidun puutavavaran jäljittelyyn. (Lunawood 2011.)

Värisävyn lisäksi parhaimpia lämpökäsitellyn puun ominaisuuksia on kosteuselämisen väheneminen. Lievemmillä käsittelyillä puun lujuusominaisuudet eivät merkittävästi muutu, joten sitä suositellaan käytettäväksi käsittelemättömän puun tavoin. Tärkeää onkin ennen lämpökäsittelyä selvittää, millaisia ominaisuuksia puulta vaaditaan käyttökohteessaan. Liian voimakkaalla käsittelyllä haurastutetaan puun solukkorakennetta, jolloin samalla olennaisesti heikennetään puun työstettävyyttä ja käyttöä. (Möller & Otranen 1999, 100.)

2.4.1 Sisäkäyttö


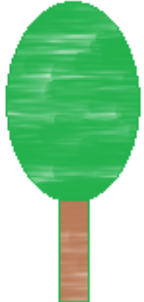
Lämpökäsitellyn puun värimuutoksien ansiosta tuontipuita voidaan korvata kotimaisilla vaaleilla puulajeilla. Tämä vähentää uhanalaisten trooppisten puulajien käyttöä, jolloin puusepänteollisuus voi hyödyntää ekologisen edun markkinoinnissa. Lämpökäsittely edistää myös metsien monimuotoisuutta ja toisarvoisten kotimaisten puulajien käytön lisääntymistä. (Möller & Otranen 1999, 35 - 36.)

Lämpökäsitelty koivu ja haapa soveltuvat parhaiten sisustus- ja huonekalukäyttöön. Lämpökäsitellyn kuusen soveltuvuus sisäkäyttöön ei ole paras mahdollinen, sillä sen lämpökäsittelyissä tapahtuu voimakasta oksien halkeilua ja vuosilustojen irtoilemista toisistaan. Myöskään väri ei välttämättä sovi sisustukseen. Männyllä oksat pysyvät helpommin ehjinä miedoimmilla lämpökäsittelyillä, mutta myös silloin saattaa tapahtua oksien halkeilua ja irtoilua. Tällöin sisäkäyttöön tarkoitettun lämpökäsitellyn mäntyraaka-aineen tulisi olla oksatonta. (Möller & Otranen 1999, 35 - 36). Taulukossa 2 esitetään yhteenveto lämpöpuun sisäkäytöstä puulajeittain ja tuoteluokittain.

Sisäkäytössä lämpökäsitellyn puun suojaaminen ei ole välttämätöntä, mutta se voidaan suorittaa halutessa selvästi laimeammilla suoja-aineilla kuin ulkokäytössä. Esimerkiksi saunoissa on käytetty pintakäsittelemätöntä haapaa lauteisiin ja paneeleihin hyvin kokemuksiin, jolloin alkuperäinen väri on säilynyt hyvin. ThermoWood sopiikin hyvin hygieenisyytensä, värinsä ja alentuneen lämmönjohtavuutensa ansiosta saunojen rakennusmateriaaliksi. Nopeat kastumis

ja kuivumisjaksot kuumassa ympäristössä saattavat kuitenkin aiheuttaa lauteiden halkeilun lautojen päistä. Tämän välttämiseksi on suositeltavaa pintakäsittellä lautojen päät öljyllä, vahalla tai lakalla. Rakenteet on myös syytä suunnitella niin, että poikkileikkauspintoja on mahdollisimman vähän. (Möller & Otranen 1999, 78, 86; ThermoWood käsikirja 2003, 4-6.)

TAULUKKO 2. Yhteenveto lämpöpuun sisäkäytöstä puulajeittain ja tuoteluokittain

Sisäkäyttö	Thermo S	Thermo D
Havupuut (Mänty, kuusi) 	<ul style="list-style-type: none"> - Keittiökaapistot - Listat - Lattialaudat - Seinäpaneelit - Huonekalut - Pystypuulattiat - Seinäelementit - Rakennekomponentit - Sisustukset, kuivat tilat - Kiintokalusteet, kuivat tilat - Saunan lauteet - Ikkuna- ja ovirakenteet 	<ul style="list-style-type: none"> - Listat - Keittiökaluusteet - Saunan seinäpaneelit - Seinäelementit - Sauna -ja kylpyhuone sisustukset - Lattiat
Lehtipuut (Koivu, haapa) 	<ul style="list-style-type: none"> - Keittiökaapistot - Huonekalut - Listat - Sisälattiat - Seinäpaneelit - Saunan paneelit - Saunan lauteet - Veistotyöt - Sorvaustyöt - Leikkuulaudat - Sisäseinäpaneelit - Sisustukset - Kiintokalusteet 	<ul style="list-style-type: none"> - Huonekalut - Sisäseinäpaneelit - Keittiökaapistot - Veistotyöt - Tiskipöydän kannet - Sisustukset - Kiintokalusteet - Lattiat - Saunan rakenteet

2.4.2 Ulkokäyttö

Lämpökäsitelty puu vaatii pintakäsittelyn ulkokäytössä. Pintakäsittely ei ole oleellista lahonkeston kannalta, mutta ulkonäölliset seikat vaativat lämpökäsitellyn puun pinnankäsittelyä. Ilman pintakäsittelyä lämpökäsitelty puu käyttäytyy kuten lämpökäsittelemättömän puun pinta. Puun pinta harmaantuu ajan myötä, pintaan muodostuu mikrohalkeamia ja patinoituu. Tämä johtuu auringon UV-säteilystä ja ilmankosteudesta. Sade puolestaan harmaannuttaa vaalentunutta, pintakäsittelemätöntä puun pintaa. Tuhoisimpia biologisia vaurioita aiheuttavat lahottajasienet, jotka vaurioittavat ja hajottavat puun solukkoa. Home- ja sinistäjä sienet sekä levä aiheuttavat ulkonäöllisiä ongelmia, kuten värjäytymistä ja hankaloittavat puun pintakäsittelyä. (Puumerkin ThermoWood-pintakäsittelykäsikirja 2011, 5.)



Alkuperäisen värisävyn ja pinnanlaadun säilyttämiseksi suositellaan pintakäsittelyä. Pintakäsittely onnistuu parhaiten käyttämällä öljypohjaisia maaleja, jos pohjamaalia levitetään käsin. Jos materiaali on toimitettu kohteeseen pohjakäsiteltynä, tällöin vastaavat viimeistelykerrokset voidaan ongelmitta levittää käsin sivelemällä sekä öljy- että vesipohjaisina riippuen pohjamaalin tyypistä ja valmistajan suosituksista. (Möller & Otranen 1999, 87.)

Puun värisävyn muuttumista voidaan vähentää käyttämällä pintakäsittelyaineita, joissa on puuta suojaavaa pigmenttiä. Pintakäsittely tehdään läpikuultavalla puunsuoja-aineella, johon on lisätty ruskeaa pigmenttiä vastaamaan mahdollisimman tarkkaan ThermoWoodin alkuperäistä väriä. Aineen suojaava vaikutus on riippuvainen pigmenttikerroksen paksuudesta. Yleensä tämä aiheuttaa hieman tummemman ulkonäön. Peittävää maalia käytettäessä alkuperäisen lämpöpuun väri ja ominaisuudet eivät pääse hyvin esille, mutta alkuperäinen väri saadaan säilymään kauemmin peruskylästeen ja läpikuultavan öljymaalin avulla. (Möller & Otranen 1999, 87)

Erilaisilla käsittelyillä on erilaiset huoltovälit. Mitä enemmän pigmenttiä, sitä pidempi huoltoväli. Materiaali suositellaan käsiteltäväksi kerran ennen asennusta ja asennuksen jälkeen tehdään viimeistelykäsittely. Pintakäsittely tulisi myös uusua noin viiden vuoden välein. Homeenestoaineita sisältäviä tuotteita

suositellaan käytettäväksi, kun käytetään kasviöljypohjaisia pintakäsittelyaineita säälle alttiissa kohteissa. (Möller & Otranen 1999, 87; ThermoWood käsikirja 2003, 3-6). Taulukossa 3 esitetään yhteenveto lämpöpuun ulkokäytöstä puulajeittain ja tuoteluokittain.

TAULUKKO 3. Yhteenveto lämpöpuun ulkokäytöstä puulajeittain ja tuoteluokittain

Ulkokäyttö	Thermo S	Thermo D
Havupuut (Mänty, kuusi) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ulkoseinäverhoukset - Puutarhakalusteet - Katetut terassituotteet 	<ul style="list-style-type: none"> - Katetut terassilattiat - Leikkikentän kalusteet - Ikkunat - Ulkoseinäverhoukset - Kattamattomat terassilattiat - Meluaidat - Piha-aidat - Ulko-ovet - Ikkunaluukut - Ympäristörakenteet - Puutarhakalusteet - Räystäslaudat
Lehtipuut (Koivu, haapa) 	<ul style="list-style-type: none"> - Puutarhakalusteet - Katetut terassituotteet 	<ul style="list-style-type: none"> - Pihakalusteet - Puutarhakalusteet - Räystäslaudat

2.4.3 Rakennusmateriaalina

Lämpökäsiteltyä puumateriaalia voidaan käyttää myös rakennuksissa rakennusmateriaalina. Hyvinä ominaisuuksina voidaan pitää lämmöneristävyyttä, joka on jopa 30 % parempi verrattuna käsittelemättömään puuhun.

Lämpökäsitelty puu elää vähemmän, ja sillä on parempi sään -ja lahonkesto kuin käsittelemättömällä puulla. Se on myös kevyempää eikä sisällä pihkaa, jolloin ulkopinnoitteen rikkoutumisvaara vähenee. Värisävyn ansiosta sisäseinissä ei näy

vaaleita alueita esimerkiksi taulun paikkaa siirrettäessä. Huonoina ominaisuuksina voidaan pitää heikentyneitä lujuusominaisuuksia, joiden takia lämpökäsiteltyä puuta ei tule käyttää kantavissa rakenteissa. Syttymisherkyys kasvaa, ja mahdollisia hajuhaittoja saattaa ilmetä. Sisäseinät saattavat näyttää yksitoikkoisilta ja tummilta. Lisäksi lämpökäsittely aiheuttaa hinnan lisäystä, ja mahdollinen hukka saattaa nostaa kuutiohintaa. (Möller & Otranen 1999, 106.)

2.4.4 Lämpöpuu, painekyllästetty puu ja lahonsuojaus

Lämpökäsitelty puu ei korvaa painekyllästettyä puuta, vaan tarjoaa ekologisemman ja myrkyttömän vaihtoehdon, sillä lämpökäsittelyprosessissa käytetään vain vesihöyryä ja lämpöä. Lämpökäsittelyn puun hävittäminen on ekologisesti ongelmaton, sillä sen voi käyttää polttopuuna. Kyllästetty puu on toimitettava käytön jälkeen kaatopaikoille ja sen poltto on sallittua vain luvan saaneissa polttolaitoksissa. (Möller & Otranen 1999, 73.)

Puuta kyllästetään luokkiin AB ja A. Ne suojataan samalla kuparipohjaisella kyllästeellä. AB-luokan kestopuu on tarkoitettu maanpinnan yläpuolisiin rakenteisiin, jotka ovat säälle alttiita. A-luokan puussa on enemmän kyllästysainetta, ja sitä käytetään suoraan maa- tai vesikosketukseen tulevissa rakenteissa (tukirakenteet, rungot, perustukset). Puisissa ulkorakenteissa käytetään kyllästettyä puuta, kun puurakenne on maa- tai vesikosketuksessa tai jatkuvassa alttiudessa säärasitukselle. Käyttö on myös suositeltavaa, jos rakenne tai sen osa on hankalasti vaihdettavissa tai korjattavissa. (YLE Mikaeli 2001.)

Lämpökäsittelyn puun kestoikä ulkokäytössä on melkein sama kuin AB-luokkaan kyllästetyn puutavaran eli yli 20 vuotta. Maakosketuksessa olevissa kohteissa lämpökäsittelyn puun lahonkesto ei ole painekyllästetyn puun luokkaa. Lämpökäsitelty puu soveltuu hyvin kohteisiin, joissa lujuus ei ole tärkein vaatimus. (Hyvä tietää kestopuusta –esite, 2.)

3 LÄMPÖPUUN MUUTOKSET JA OMINAISUUDET

3.1 Termokemialliset muutokset

Puun lämpökäsittely muuntaa useita puun kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia pysyvästi. Ominaisuuksien muuttuminen johtuu pääasiassa hemiselluloosien termisestä hajoamisesta. Terminen hajoaminen alkaa hemiselluloosista ja etenee tämän jälkeen vähitellen selluloosaan ja lingniiniin. Näiden termokemiallisten muutosten seurauksena lämpökäsitellyn puun kuivatiheys alenee. Haluttuja muutoksia alkaa tapahtua jo 150 °C:n lämpötiloissa ja edelleen nostettaessa lämpötilaa portaittain. (Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art 2002.)

3.1.1 Selluloosa ja hemiselluloosa

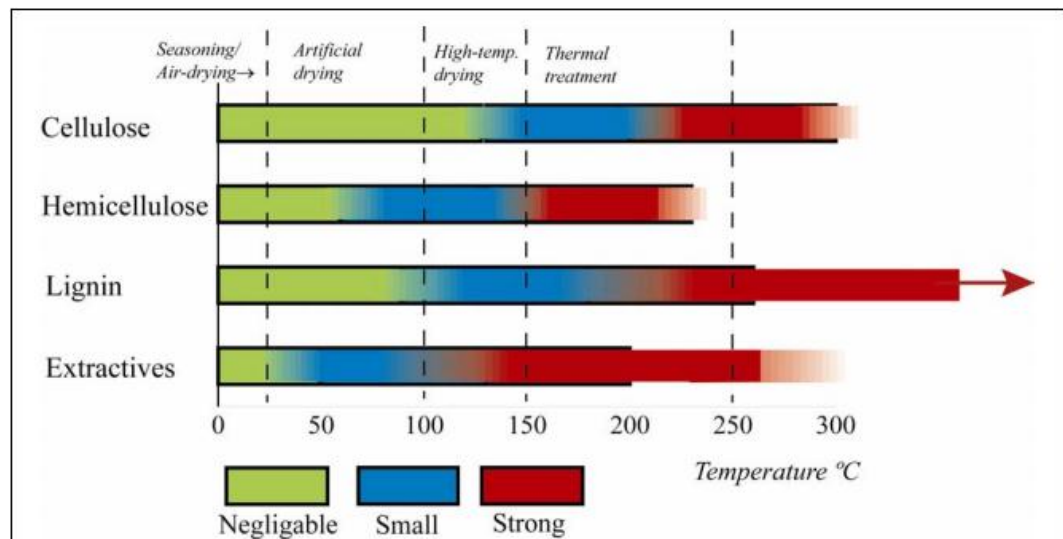
Selluloosa ja hemiselluloosa ovat hiilihydraatteja ja toimivat rakennekomponenteina puussa. Selluloosa on puun pääasiallinen rakennusaine, jota on puulajista riippuen 40-50 % puun kuivapainosta. Hemiselluloosan osuus vaihtelee puulajista riippuen 25-35 % puun kuivapainosta. (Thermowood käsikirja 2003, 2-4.)

Selluloosan ja hemiselluloosan määrä alenee puun lämpötilan kasvaessa. Tämä johtuu niiden hydrolysoitumisesta pienimolekyylisiksi sokereiksi, kuten glukoosiksi ja ksyloosiksi. Hemiselluloosan hajoaminen tapahtuu 200-260 °C:ssa ja selluloosan 240-350 °C:ssa. Lehtipuissa hemiselluloosan määrä on suurempi kuin havupuissa, joten ne hajoavat lämmön vaikutuksesta voimakkaammin kuin havupuut. Hemiselluloosaketjun katkeaminen ei alenna puun lujuutta, vaan parantaa puun puristettavuutta, pienentää jännitystä ja puuaineksen palautumista. (Viitaniemi & Jämsä 1996, 15.)

3.1.2 Ligniini ja uuteaineet

Ligniini on puun lujuutta lisäävä ja puun soluja koossa pitävä aine. Sitä on puussa 20-30 % puulajista ja puun osasta riippuen. Puun ainesosista ligniini kestää parhaiten lämpöä. Ensimmäiset muutokset ligniinissä tapahtuvat 150 °C:ssa, ja se hajoaa 280-350 °C:ssa. (Möller & Otranen 1999, 33.)

Puuaines sisältää myös pienimolekyylisiä uuteaineita, jotka eivät ole puun rakennekomponentteja. Niitä on puussa alle 5 %, ja suurin osa haihtuu puun lämpökäsittelyprosessissa. Puusta haihtuu mm. muurahaishappoa, etikkahappoa, fenolisia ja aromaattisia yhdisteitä, rasva- ja hartsihappoja, furaaniyhdisteitä, metanolia, hiilimonoksidia ja -dioksidia sekä vesihöyryä. (Möller & Otranen 1999, 33-34). Kuviossa 3 havainnollistetaan puun rakennekomponenttien yleiset muutokset lämpökäsittelyssä.



KUVIO 3. Puun rakennekomponenttien yleiset muutokset lämpökäsittelyssä (Sundqvist 2004, 11)

3.2 Tiheyden ja lujuuden muutokset

Puun tiheys on massa tilavuusyksikköä kohti. Massan ja vastaavan tilavuuden ilmoittaminen ei yksiselitteisesti määrittele puuaineen ominaisuuksista mitattavaa suuretta. Puun massa ja määrä-tapauksissa myös tilavuus riippuu puun sisältämästä kosteudesta. Puu on hygroskooppinen aine eli se pystyy imemään ilmasta kosteutta. Tällöin puun tiheyden mittaaminen edellyttää sovittujen menettelytapojen noudattamista. Nykyisin kuiva-tuoretiheys on käytetyin tunnus. Kuiva-tuoretiheyttä mitattaessa puun massa punnitaan kuivana ja tilavuus puun syiden kyllästymispistettä korkeammassa kosteudessa. (Kärkkäinen 2003, 133-134.)

ThermoWood ei ole yhtä tiheää kuin käsittelemätön puu. Tämä on seurausta käsittelyn aikana tapahtuneista näytteen massan muutoksista, kun puu menettää painoaan. Tiheys pienenee käytettäessä korkeampia käsittelylämpötiloja. Hajonta on kuitenkin suurta ja selitysaste alhainen, jotka johtuvat puun luontaisesta tiheyden vaihtelusta. (ThermoWood käsikirja 2003, 4-4.)

Puumateriaalin lujuudella ja tiheydellä on yleensä vaikutusta toisiinsa. Thermowoodin tiheys on hieman alhaisempi lämpökäsittelyn jälkeen, joten sillä on joissain tapauksissa myös matalammat lujuusarvot. Paino-lujuus-suhde saattaa kuitenkin pysyä lähes muuttumattomana. Puun lujuus on riippuvainen kosteuspitoisuudesta silloin kun puunkosteuspitoisuus on alle puun syiden kyllästymispisteen. Koska ThermoWoodin tasapainokosteus on pienempi, sen kosteuspitoisuus on tietyissä olosuhteissa alhaisempi ja siten sen lujuusarvot voivat olla korkeampia kuin tavallisella puulla. (ThermoWood käsikirja 2003, 5-4.)

3.2.1 Taivutuslujuus

Lämpökäsittelyllä ei ole merkittävää vaikutusta puun taivutuslujuuteen alle 200 °C:ssa suoritetuissa lämpötiloissa. Männyn lujuus heikkenee merkittävästi 220 °C:n ylittävissä lämpötiloissa. Lämpökäsiteltyä sahatavaraa ei kuitenkaan suositella käytettäväksi kantavissa rakenteissa. Taivutuslujuuden heikentyminen

johtuu monesti puuaineksen oksakohdista, joissa lujuus on muuta puuta alhaisempi. Lisäksi oksien laatu vaikuttaa puun taivutuslujuuteen. Kuolleet tai osittain kuolleet oksat heikentävät puun lujuutta terveitä oksia enemmän. (Hyvä tietää lämpöpuusta -esite 2005, 1.)

3.2.2 Puristuslujuus

Lämpökäsittely ei pienennä puun puristuslujuutta. VTT:n tutkimusten mukaan puristuslujuusarvot ovat jopa parempia kuin käsittelemättömällä puulla, myös korkeissa yli 220 °C:n lämpötilojen käsittelyissä. Lämpökäsitelty puu ei ole kuitenkaan yhtä kimmoisaa kuin käsittelemätön puu, sillä tutkimuksessa maksimivoimien tapauksissa lämpökäsitelty puu hajoaa pienempiin osiin, kun taas tavallinen uunikuivattu puu nurjahtaa. Puun tiheydellä on huomattava vaikutus puristuslujuuteen. (ThermoWood käsikirja 2003, 7-5.)

3.2.3 Halkaisulujuus

Lämpökäsittelyn aiheuttama puun halkaisulujuuden heikkeneminen on yksi pahimmista tekijöistä lämpökäsittelyn puun lujuudessa. Sillä on suurempi merkitys kuin muilla muiden lujuuksien heikkenemisellä. Halkaisulujuuden heikkeneminen vaikuttaa puun työstettävyyteen, kiinnittimien käyttöön ja puun kestävyteen mekaanisia iskuja vastaan. Myös staattinen rasitus on otettava huomioon. Halkaisulujuus vähenee 30-40% lämpökäsittelyn jälkeen ja väheneminen on suurempaa korkeammissa lämpötiloissa. (Möller & Otranen 1999, 67.)

3.2.4 Muut lujuudet

Leikkauslujuuden pienentyminen on melko vähäistä normaaleissa lämpökäsittelylämpötiloissa, mutta alenee todella korkeissa, yli 230 °C:n lämpötiloissa. Vetolujuus heikkenee 30-50 % normaaliin puuhu verrattuna. Myös iskutaivutuslujuus madaltuu noin 25 %. (ThermoWood käsikirja 2003, 8-4, 9-4.) Ruuvinpitävyytsteissä puun luontainen tiheys vaikutti enemmän pitokykyyn kuin itse lämpökäsittely. Sama pätee myös Brinell kovuuteen, joskin kovuus hieman vähenee lämpökäsittelyn jälkeen varsinkin havupuilla. (Möller & Otranen 1999, 61-62.)

3.3 Värimuutokset

Lämpökäsittelyssä puun väri tummuu kauttaaltaan. Värimuutokset lisääntyvät yli 100 °C:n lämpötiloissa eli kuumakuivauksen lämpötila-alueella. Värisävyn tummuusaste määräytyy lämpötilan, ajan ja höyrytysten mukaan. Värin yhtenäisyyteen vaikuttavat normaalit tiheydestä aiheutuvat vaihtelut sekä se, käytetäänkö kevät- vai kesäpuuta. Värin tummuuden hajonta lisääntyy myös käsittelylämpötilan noustessa ja ajan pidentyessä. Pintaosan tummuminen sydänosaa tummemmaksi johtuu hapen pääsystä lämpökäsittelykammioon käsittelyn aikana. Puun lähtökosteus ja lämpökäsittelyprosessissa vallitsevat olosuhteet aiheuttavat myös värieroja sydän- ja pintapuun välillä. (Möller & Otranen 1999, 35-36.)

Puun väri muodostuu sen rakenneaineiden välillä tapahtuvista kemiallisista reaktioista. Puun pinta tummuu jo kuivausprosessin aikana, jolloin sisäosat säilyvät vaaleana. Värimuodostusprosessi johtuu hydrolyysistä, jolloin puun rakenneaineiden väliset sidokset hajoavat energian vapautuessa. Värisävyn syntymiseen vaikuttavat eri tavoin ligniini-, selluloosa- ja hemiselluloosapitoisuudet. Hemiselluloosan hajoamistuotteet voivat lisätä myös uuteaineiden määrää. Puun väriä muokkaavat myös lämpökäsittelyssä muodostuvat sokerit ja aminohapot. Kromoforit ovat väriä muodostavia aineita, jotka tuottavat puun värin. Puun vaalean keltainen väri johtuu ligniinin ja

joidenkin uuteaineiden kromoforeista. Sydänpuussa olevat erinäiset fenoliyhdisteet aiheuttavat ruskean, punaoranssin, lilan ja mustan värisävyn. (Sundqvist 2004; Sallinen V. 2011, 11-12.)

Lämpökäsittelyn jälkeen puun väriin vaikuttavat sahatavaran varastointiaika ja -olosuhteet ennen lämpökäsittelyä. Esimerkiksi esivarastointi auringonvalossa tummentaa lämpökäsittelyssä saatavaa värisävyä. Myös lämpökäsittelyä edeltävä kuivausprosessi vaikuttaa lämpökäsittelyn puun lopulliseen väriin. Esimerkiksi lauhde- tai lämminilmakuivattu on vaaleampaa kuin kuumakuivattu puu. Myös lämpökäsittelyssä käytössä olevat välirimat saattavat kosteina jättää puun pintaan jälkiä. (Möller & Otranen 1999, 35-36.)

Lämpökäsittelyllä voidaan peittää osittain koivun ja haavan luontaisia ja keinokuivauksen aiheuttamia värivikoja. Esimerkiksi punertavaa koivua pidetään lämminilmakuivauksesta aiheutuneena kuivausvikana, joka voidaan helposti poistaa lämpökäsittelyn avulla. Tällöin punertavuuden aiheuttama arvonalennus on muuttunut koivusahatavaran arvonnousuksi. Myös männyn sinistymää voidaan häivyttää lämpökäsittelyn avulla. Jos sinistymä on voimakasta, lämpökäsittelykään ei voi sitä peittää. (Möller & Otranen 1999, 35-36). Lisää puun värinmittauksista ja menetelmistä löytyy luvusta 5.8 Värinmittaus ja 5.9 Värinmittausmenetelmä (CIELab). Kuviossa 4 on lämpökäsittelyn männyn väri eri lämpötiloissa.

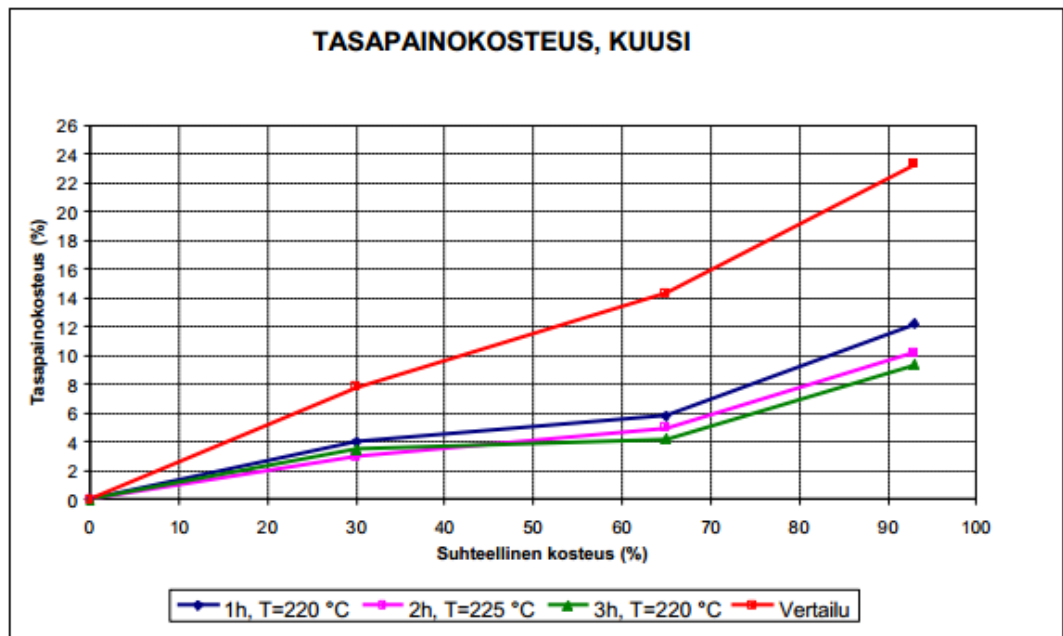


KUVIO 4. Lämpökäsitellyn männyn väri eri lämpötiloissa, käsittelyaika 3 h (ThermoWood käsikirja 2003, 24-4)

3.4 Tasapainokosteus ja kosteuseläminen

Lämpökäsittely laskee puun tasapainokosteutta. Mitä korkeammassa lämpötilassa lämpökäsittely tehdään, sitä alhaisempi tasapainokosteuskäsitellyllä puulla on. Myös käsittelyajalla on merkitystä tasapainokosteuden alenemiseen, tosin merkitys ei ole niin suuri kuin lämpötilalla. Korkeissa lämpötiloissa tasapainokosteus on noin 40-50 % alhaisempi käsittelemättömään puuhun verrattuna. Puun kosteuden arvoissa ero on suurempi, kun ilman suhteellinen kosteus on korkeampi. (Möller & Otranen 1999, 36, 42-43; ThermoWood käsikirja 2003, 10-4). Kuviossa 5 havainnollistetaan suhteellisen kosteuden vaikutusta lämpökäsitellyn kuusen kosteuspuitoisuuteen.

Puun mittapysyvyys paranee selkeästi, kun tasapainokosteus alenee. Säteen ja tangentin suuntainen turpoaminen kosteuden lisääntyessä voi olla 40-50% pienempi kuin normaalilla puulla. Lämpökäsiteltäessä puun kosteuseläminen pienenee jopa 80-90 %, ja mitä suurempi lämpökäsittelyn aiheuttama painohäviö on, sitä vähemmän puuhun imeytyy vettä. Upotuskokeissa on huomattu, että lämpökäsiteltyyn puuhun imeytyy huomattavasti vähemmän vettä kuin normaalin puuhun, kunhan kappaleiden päät ovat suojattuja ja imeytyminen tapahtuu syrjäpinnoilta. (Möller & Otranen 1999, 43; Hyvä tietää lämpöpuusta –esite 2005, 1.)



KUVIO 5. Suhteellisen kosteuden vaikutus lämpökäsitellyn kuusen kosteuspitoisuuteen (ThermoWood -käsikirja 2003, 10-4.)

3.5 Lämmönjohtavuus ja paloturvallisuus

ThermoWoodin lämmönjohtavuus pienenee 20-25%:lla käsittelemättömään havupuuhun verrattuna. Tämän takia ThermoWood on hyvä materiaali käytettynä mm. saunojen materiaalina, ulko-ovissa, ulkooverhouksissa ja ikkunoissa. (ThermoWood -käsikirja 2003, 13-4.)

Lämpökäsittely näyttää huonontavan puun palonkestävyyttä, mikä johtuu luultavasti haihtuvien aineiden vapautumisesta ja vähitellen hajoavista puun ainesosista lämpökäsittelyn aikana. ThermoWood ei kuitenkaan merkittävästi eroa tavallisesta puusta paloturvallisuuden suhteen. ThermoWood kuuluu paloluokkaan D. Lämpökäsitelty puu häviää selvästi syttymisajan suhteen tavalliseen tapaan kuivatuille havupuille, mutta lämmönluovutuksessa ja savuntuotossa se pärjää paremmin. Lisää tutkimuksia kuitenkin tarvitaan. (ThermoWood -käsikirja 2003, 13-4, 14-4, 15-4.)

3.6 Biologinen kestävyys ja sään kesto

Lämpökäsittely parantaa huomattavasti puun biologista kestävyyttä laboratoriossa stantardien EN 113 ja ENV 807 tehtyjen testien perusteella. Ilman kemiallista suojausta thermowood soveltuu käytettäväksi standardin EN 355-1 luokkien 1-3 olosuhteissa, mutta sitä ei suositella käytettäväksi jatkuvassa kosteassa maankosteudessa kohteissa, joissa vaaditaan rakenteellista lujuutta. (Hyvä tietää lämpöpuusta-esitys 2005). Lämpökäsitelty puu vastustaa merkittävästi varsinkin ruskolahon aiheuttamaa lahoamista. Thermowood pystyy myös tehokkaasti vastustamaan huonekaluhyönteisiä, kuten tupajääriä. (ThermoWood käsikirja 2003, 19-4.)

Lämpökäsitelty puu sinistyy, homehtuu ja harmaantuu sään vaikutuksesta. Tartunnan ilmaantuminen on kuitenkin hitaampaa ja vaikutukset eivät välttämättä ole yhtä suuria kuin käsittelemättömällä puulla. Säätietustestien mukaan thermowoodin kosteuspitoisuus on noin puolet pienempi kuin käsittelemättömän puun, myös viiden vuoden kuluttua. Lisää sään vaikutuksista ja siltä suojautumiselta löytyy luvusta 2.4.2 Ulkokäyttö. (Möller & Otranen 1999, 78.)

3.7 Jännitykset

Lämpökäsittelyn aikana puu on kuivunut lähes absoluuttisen kuivaksi, jolloin siellä ei ole juurikaan vettä. Lämpökäsittelyn jälkeisen lopputasaannutuksen tarkoituksena on kostuttaa puuta, jotta puuta voidaan työstää sen rikkoutumatta. Tällä estetään myös kappaleen muodonmuutokset työstön jälkeen. Tasaannutuksen aikana lämpökäsiteltyyn puuhun on tarkoituksena saada käyttökohteen tasapainokosteutta vastaava kosteuspitoisuus. Lämpökäsittelyn jälkeen puuhun jääneet jännitykset aiheutuvat epäonnistuneesta lopputasaannutuksesta. (Möller & Otranen 1999, 48-49.)

3.7.1 Pintahalkeilu

Vääränlainen kuivaus alhaisiin loppukosteuksiin saattaa aiheuttaa pintahalkeamia. Nämä eivät välttämättä näy visuaalisesti, sillä pinnan kostuttaminen tasaannutuksen aikana saa raot painumaan umpeen. Pintahalkeamia syntyy, kun puun pinta kuivuu sisäosia aikaisemmin, jolloin pintaosaan syntyy vetojännityksiä. Näiden ollessa suurempia kuin puun murtolujuus syntyy halkeamia. Kuivauksen aikana puuhun syntyneet mikrohalkeamat avautuvat lämpökäsittelyssä, jolloin lämpökäsittelyä edeltäneen kuivauksen onnistuminen korostuu. (Möller & Otranen 1999, 49-50.)

3.7.2 Sisähalkeilu

Sisähalkeilu on lämpökäsittelyn puun pahin vika. Se rajoittaa puun jatkojalostusta, sillä varsinkin halkaistaessa tai höylätessä puuta sisähalkeamat tulevat näkyviin. Sisähalkeamat eivät näy välttämättä ulospäin, joten tämä vika saattaa käydä loppukäyttäjälle kalliiksi. Halkeamista aiheutuva hukka saattaa kasvaa suureksi, jolloin sisähalkeamat lisäävät lopputuotteen valmistuskustannuksia ja hintaa. Sisähalkeamat esiintyvät puussa säteen suuntaisina halkeamina, jotka eivät ulotu pintaan asti. Sisähalkeamia voivat aiheuttaa puun lämpenemisestä aiheutuvat

muodonmuutokset tai puun kosteus. (Möller & Otranen 1999, 49.) Kuvion 6 männyssä on havaittavissa sisähalkeilua.



KUVIO 6. Sisähalkeilua lämpökäsitellyssä männyssä (Vaarin puutavara 2002)

3.7.3 Muodonmuutokset

Lämpökäsittelyssä puun soluseinämän tilavuuskutistuminen on suurempaa, koska puusta haihtuu hajoamistuotteina erilaisia aineita. Kutistuminen on erilaista soluseinämän eri kerroksissa, joten tämä aiheuttaa puussa muodonmuutoksia. Lisäksi puun absoluuttinen kuivuminen aiheuttaa maksimin muodonmuutoksissaan, joten muodonmuutokset ovat näiltä osin palautumattomia. Kasvaneet muodonmuutokset lisäävät työvaroja ja hukkan kasvu lisää työkustannuksia. (Möller & Otranen 1999, 51-52.)

Sahatavaran kieroutuminen on näkyvin muodonmuutos. Sitä voidaan vähentää välttämällä sydänkeskeisten sahatavarakappaleiden kuivausta, sillä puun sydämen läheltä sahatut tai sydäntä sisältävät kappaleet kieroutuvat ja kupertuvat helpommin. Huolellinen ja oikea rimoitus sekä lämpökäsittelykuorman päällä käytettävät painot estävät kieroutumista. Myös sahatavaran kuivaus oikeaan loppukosteuteen vähentää kieroutumista. Suuret oksat aiheuttavat voimakasta syrjävääräyttä ja lylypuuta vastaava vetopuu aiheuttaa voimakkaita muodonmuutoksia. (Möller & Otranen 1999, 51-52.)

4 LÄMPÖPUUN TYÖSTÄMINEN JA LAADUNVALVONTA

4.1 Työstöominaisuudet

ThermoWood on lujuusominaisuuksistaan johtuen alttiimpaa mekaanisille vaurioille jatkojalostuksessa, joten ThermoWoodin käsittely edellyttää hieman enemmän tarkkuutta kuin käsittelemättömän puun. Lämpökäsitellyn puun työstäminen tapahtuu pääasiassa perinteisin työmenetelmin ja laittein.

Työstämiseen suositellaan teräviä työkaluja. Puutavaran alhaisempi tasapainokosteus lisää purun pölyämistä työstössä, minkä vuoksi suositellaan tehokkaampia pölynpoistojärjestelmiä sekä henkilökohtaisia suojavälineitä, kun puutavaraa työstetään suurempia määriä. Ennen työstämisen aloittamista on varmistuttava, että Thermowoodin kosteus vastaa käyttökohteen kosteutta. (Puun lämpökäsittely, rakentajan ja remontoijan käsikirja 2009.)

4.1.1 Höyläminen

Lämpöpuun höylättävyys on hyvä, eikä se eroa suuresti käsittelemättömän puun höyläyksestä. Tärkein lähtötekijä hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi on raaka-aineella. Lämpökäsittely ei paranna huonolaatuisen sahatavaran työstettävyyttä ja höyläyslaatu on vettarravissa lähtöpuun laatuun. Kierous, kuperuus ja oksaisuus heikentävät höylättävyyttä ja höyläysjälkeä. Parhaan höläystuloksen saavuttamiseksi kannattaa käyttää materiaalia, joka on sahattu mahdollisimman pitkälle puun syiden suuntaisesti. (ThermoWood käsikirja 2003, 2-5.)

Lämpöpuukappaleiden syötössä esiintyy vähemmän kitkaa ja työstö sujuu tasaisemmin pihkan puuttumisen seurauksena. Koneen terät ja muut pinnat ovat myös puhtaampia tämän vuoksi. Materiaalin alentuneiden lujuusominaisuuksien takia syöttörullien paine on säädettävä pienemmäksi, jotta laudat eivät katkeile. Joillakin höyläyslinjoilla myös syöttönopeutta täytyy vähentää, jolloin vastaavasti terien pyörintänopeutta on vähennettävä, jotta puun pinta ei pala. Lämpöpuuta

höylättäessä höylän parametrit säädetään aina höyläkohtaisesti. Höylän terien huolto- ja teroitusväli voi olla moninkertainen käsittelemättömään puuhun verrattuna. Kaikki teräkulmat toimivat hyvin, ja kovametalliterillä saadaan parhaat tulokset. (ThermoWood käsikirja 2003, 2-5, 3-5.)

Höyläystä haittaa lämpökäsittelystä puusta lähtevä voimakas haju. Puulajeittain hajulla ei ole eroa, mutta mitä korkeampi on käsittelyaste, sitä voimakkaampi ja haittaavampi on haju. Haju hälvenee voimakkaasti höyläyksen jälkeen jo parissa päivässä. Pölyävyys on toinen suuri haitta lämpöpuun höyläyksessä. Höylättäessä ei synny normaaleja lastuja, vaan siitä lähtee hienojakoista pölyä, joka vaatii parempia suojaustoimenpiteitä purunpoistossa ja kasvonsuojauksessa. Oksien irtoilu on myös runsaampaa lämpökäsittelyn puun höyläyksessä. Lämpökäsittelyn muodonmuutokset ja mittamuutokset on huomioitava suurempina työstövaroina. (Möller & Ortanen 1999, 81.)

4.1.2 Sahaaminen

Lämpöpuun sahaaminen on helppoa. Hyvä leikkujälki syntyy nopeasti sekä katkaisu- että halkaisusahaamisessa, sillä puussa ei ole enää pihkaa. Pihkan puuttuminen vähentää puun ja sahanterän välistä kitkaa ja leikkaustyökalujen tehontarvetta sekä pidentää leikkaustyökalujen käyttöikää merkittävästi. (Möller & Otranen 1999, 82.)

Oksankohdissa ei ole havaittavissa erityistä repeämistä tavalliseen puuhun verrattuna. Sahanpuru on erittäin hienojakoista ja leviää helposti ympäristöön, sillä lämpökäsitelty puu on erittäin kuivaa. Pölynpoistojärjestelmän toimivuuteen on tällöin kiinnitettävä erityistä huomiota. Järjestelmän on oltava tiivis ja tarpeeksi tehokas. (Möller & Otranen 1999, 82.)

Harvahampainen saha saattaa aiheuttaa lohkeilua reunoissa, varsinkin kappaleilla, joilla on korkeampi käsittelyaste. Lohkeamista voidaan ehkäistä käyttämällä tiheähampaisia sahoja, katkaisualustaa, terävää katkaisuterää ja piirtoterää. Kovametalliterät vähentävät sahanterien huolto ja teroitustarvetta. (Möller & Otranen 1999, 82; ThermoWood –käsikirja 2003, 1-5.)

4.1.3 Hiominen

Hiominen vastaa käsittelemättömän puun hiomista. Usein ei kuitenkaa ole tarvetta hiomiseen, sillä höyläämisen ja jyrsimisen jälkeen pinnanlaatu on hyvä.

Hionnassa syntyvä pöly on hienojakoista, mutta kevyttä ja kuivaa. Tämä ei kuitenkaa aseta erityisvaatimuksia pölynpoistojärjestelmälle. Pölyräjähdysten riski on aina olemassa, kuten myös tavallisella puupölyllä. (ThermoWood - käsikirja 2003, 3-5.)

4.1.4 Jyrsiminen

Jyrsintäterien tulee olla teräviä, jotta saavutetaan hyvä pinnanlaatu materiaalin repeämättä. Repeämistä tapahtuu varsinkin poikkisyyhyyn jyrситtässä. Suurimmat repeytymisongelmat esiintyvät jyrsintää aloittaessa ja lopetettaessa, kun terä irtoaa puusta. Työstöjärjestyksellä on myös vaikutusta työstöominaisuuksiin.

Työstäminen on suunniteltava tarkasti etukäteen ja paras tulos saadaan, kun terän takana on tarpeeksi kiinteää puumateriaalia. (ThermoWood –käsikirja 2003, 3-5.)

4.1.5 Liimaaminen

VTT on testannut lämpökäsitellyn puun liimattavuutta 1- ja 2-komponenttisilla PVAc-liimoilla, 1- ja 2-komponenttisilla polyuretaaniliimoilla (PU), resorsinolifenoliliimoilla (RF) ja emulsiopolymeeri-isosyanaattiliimoilla (EPI). Liimattavuustesti on suoritettu normin DIN 68603 mukaisesti. Liimasauman lujuus määritettiin standardin EN 392 mukaisesti ja kosteudenkestävyys testattiin delaminaatiotestin EN 302-2 mukaisesti. (ThermoWood-käsikirja 2003, 3-5.)

Liimattavuus riippuu lämpökäsittelyluokasta. Mitä korkeampi on lämpökäsittelyaste, sitä pienempi on liimasauman leikkauslujuus. Tämä johtuu lujuusominaisuuksien muutoksista, mikä selittää myös suuret puustamurtumaprosentit (90-100 %). ThermoWoodia liimattaessa on kiinnitettävä

huomiota oikeanlaisiin työskentelyolosuhteisiin, kuten puun lämpötilaan, kosteusolosuhteisiin ja pinnan puhtauteen. (ThermoWood-käsikirja 2003, 3-5.)

EPI-liiman tunkeutuminen lämpökäsiteltyyn puumateriaaliin oli korkea. Usean tunnin pitkä kylmäpuristus aika saattaa auttaa liiman imeytymisessä. MUF- että RF-liimat toimivat hyvin. Jotkin PVAc-liimat saattavat aiheuttaa ongelmia merkittävästi pidempien kuivumisaikojen vuoksi, koska ne perustuvat veden imeytymiseen puuhun. Käytettäessä PVAc-liimaa täytyy liiman vesipitoisuus minimoida. Lämpökäsittelyprosessi muuttaa vedensitoutumiskykyä puuaineessa, jolloin liiman ja veden imeytyminen puuhun hidastuu. Kemiallisesti kovenevat liimat toimivat normaaliin tapaan. Poluuretaaniliimat toimivat hyvin. PU-liiman kovettumisreaktio tarvitsee vettä, joten se voidaan absorboida joko puusta tai ympäröivästä ilmasta. Jos puu ja ilma ovat hyvin kuivaa, on mahdollista, ettei liimaaminen onnistu. Parempaan lopputulokseen liimaamisessa päästään käyttämällä matalammassa lämpötilassa käsiteltyä puuta. (Hyvä tietää lämpöpuusta 2005, 5)

4.1.6 Kiinnittäminen

Lämpöpuurakenteiden kiinnittämisessä on käytettävä karkeakierteisiä ruuveja, sillä lämpökäsittelyn haurastuttava vaikutus heikentää ruuvien pitokykyä. Tiheä- ja matalakierteinen ruuvi jauhaa liikaa puuainesta. Halkaisulujuuden heikkenemisen takia kappaleiden päistä kiinnittäminen vaikeutuu. Tällöin kappaleiden päiden esiporaaminen on tärkeää, jotta halkeilua ei tapahtuisi. Päiden halkeilua vähennetään selvästi myös oikean ruuvi- ja naulakoon valinnalla. Myös kiertimien oikea vääntömomentti korostuu lämpökäsiteltyyn puuhun ruuvatessa. Lämpökäsitellyt rakenteet kestävät ulkona jopa vuosikymmeniä, joten tämä asettaa suuret vaatimukset käytettäville kiinnikkeille. Tähän suositellaan kuumasinkittyjä tai ruostumattomasta teräksestä valmistettuja nautoja tai ruuveja. Sinkityt ruuvit ruostuvat melko nopeasti ulkorakenteissa ja kosteissa olosuhteissa. Galvanoiduilla ruuveilla ja nautoilla esiintyy korroosio-ongelmia, sillä lämpökäsittelystä puusta tulee pH-arvoltaan happamampi. RST- ja haponkestävät

ruuvit toimivat hyvin, mutta ovat hinnaltaan korkeampia. (Möller & Otranen 1999, 82.)

4.2 Lämpökäsitellyn puun laatu

Lämpökäsitellyn puun laatuun vaikuttaa keskeisesti raaka-aineeksi käytettävän puun laatu. Lämpökäsittely sopii periaatteessa kaikille puulajeille. Puulajien välillä on kuitenkin eroja, kuten vuosikasvu, puun solut, puun huokokset ja puun kemiallisten komponenttien määrät. Puulaji vaikuttaa myös esim. kuidun pituuksiin: havupuilla on laajempi jakauma kuidun pituuksissa, sekä lehtipuilla jakauma on pienellä välillä ja kuidut lyhyitä. Prosessiparametrit on näin ollen optimoitava jokaiselle puulajille erikseen. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-2.)

Suomessa lämpökäsitellään mäntyä, kuusta, koivua ja haapaa. Kokemuksia radiatamännyn, saarnin, lehtikuusen, tervalepän, pyökin ja eukalyptuksen lämpökäsittelystä on saatu ja ne ovat poikkeuksetta myönteisiä. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-2.)

Puun kosteudella ei ole merkitystä lämpökäsittelyn onnistumisen kannalta. Käsittely voidaan aloittaa joko tuoreesta puusta tai kuivatusta puusta. Käsittelyn ensimmäisessä vaiheessa puu kuivataan joka tapauksessa absoluuttisen kuivaksi. Kuivaus on pisin vaihe lämpökäsittelyprosessissa, ja siksi sen pituus vaikuttaakin olennaisesti kustannuksiin. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-2, 2-2.)

4.2.1 Sahatavaran laatu

Sahatavaran laatua valvotaan yleisen laatuluokituksen avulla. Laatuluokat jaetaan kolmeen ryhmään oksien määrän, laadun, paikan ja koon mukaan. Luokat on nimetty A-, B- ja C- laatuihin. A-luokka on jaettu alaluokkiin A1, A2, A3 ja A4. Lisäksi sahoilla on käytössä useita asiakaskohtaisia sovellutuksia. Rakennesahatavaralle on tehty myös oma lujusluokittelu standardin EN 338

mukaan. Myös oksatyypit huomioidaan. Lämpökäsittelyyn valitaan ensisijaisesti terveoksisia sahatavaralaatuja. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-2, 2-2.)

Lämpökäsittelyprosessi asettaa käsiteltävälle sahatavaralle tiukat laatuvaatimukset. Lämpöpuuyhdistys ry on määritellyt minimilaatuvaatimukset raaka-aineena käytettävälle mänty-, kuusi- ja lehtipuusahatavaralle. (ThermoWood-käsikirja 2003, 1-2, 2-2). Minimilaatuvaatimukset esitetään jäljempänä liitteissä 1-3. ThermoWoodin tuotantoon vaadittavat laatuvaatimukset tuoteluokittain esitetään taulukossa 4.

TAULUKKO 4. ThermoWoodin tuotantoon vaadittavat laatuvaatimukset tuoteluokittain. (Tuotesertifiointi, lämpökäsitelty puutavara (TR 31 2007-06-06), Inspecta 2012)

Vaatimus/Ominaisuus	Havupuut		Lehtipuut (koivu)	
	Thermo-S	Thermo-D	Thermo-S	Thermo-D
- Käsittelylämpötila °C (puu)	190 ± 3	212 ± 3	185 ± 3	200 ± 3
- Käsittelyaika (h)	2 - 3	2 - 3	2 - 3	2 - 3
- Loppukosteus keskikosteus %	4 - 7	4 - 7	4 - 7	4 - 7
- Tasapainokosteus % T= 20 °C, RH 65 %,	6 - 8	4 - 6	6 - 8	-
- Väri, L*-arvo	58 - 68	42 - 55	45 - 55	-
- Pintahalkeamat halkeaman pituus % kappaleen paksuus (mm) 16 – 31 32 – 50 51 - 75	< 15 < 25 < 35	< 15 < 25 < 35	< 15 < 25 < 35	< 15 < 25 < 35
- Sisähalkeamat halkeama % kappaleen paksuus (mm) 16 – 31 32 – 50 51 - 75	< 5 < 10 < 15	< 5 < 10 < 15	< 5 < 10 < 15	< 5 < 10 < 15
- Muodonmuutokset Lapevääritys (mm 2 m:n matkalla) Syrjävääritys (mm 2 m:n matkalla) Kuperuus (% kappaleen leveydestä) Kierous (% kappaleen leveydestä)	< 10 < 4 < 2 < 6	< 10 < 4 < 2 < 6	< 10 < 4 < 2 < 6	< 10 < 4 < 2 < 6

5 KOKEELLINEN OSA

5.1 Tukkien sahaus

Lämpöpuuyhdistys toimitti tukit Kotkaan, jossa koekappaleet valmistettiin Kotkan Kymenlaakson ammattikorkeakoulun (KYAMK) puulaboratoriossa Mussalossa. Tukit sahattiin tukkivannesahalla (kuvio 7) ja pyörösahalla (kuvio 8). Tukit sahattiin metodilla 2-exlog ja 4-exlog eli yhdestä tukista sahattiin kaksi tai neljä koekappaletta. 25 mm:n kappaleiden 4-exlog-sahaus ja tiheyskoekappaleiden sahaus ja merkintä aiheuttivat suunnitelmaan nähden lisätöitä ja hidastivat sahausta.



KUVIO 7. Tukin sahaus Canali-tukkivannesahalla. 50x150 mm:n kuusen sahaus ja pelkkojen sahaus ohuemmillä kappaleilla



KUVIO 8. Ohuiden kappaleiden sahaaminen pelkasta pyörösahalla

Raaka-aineina käytettiin suomalaista mäntyä (*pinus sylvestris*) ja kuusta (*picea abies*). Kummatkin puulajit lajiteltiin kahteen laatuluokkaan röntgenvalaisun jälkeen: optimilaatuun ja lankeavaan laatuun. Optimilaadun kappaleet ovat parempilaatuista ja oksattomampaa puuta, kun taas lankeavan laadun kappaleet ovat hieman huonompilaatuisempaa ja oksaisempaa puuta.

Materiaali jaettiin kolmeen eri paksuusdimensioon:

1. verhouslaudat
 - mänty 25 mm, leveys 150 mm
 - kuusi 25 mm, leveys 150 mm
2. katelaudat
 - mänty 32 mm, leveys 125 mm
 - kuusi 32 mm, leveys 150 mm
3. puusepän sahatavara
 - mänty 50 mm, leveys 150 mm
 - mänty (halkaistu) 50 mm, leveys 75 mm
 - kuusi 50 mm, leveys 150 mm
 - kuusi (halkaistu) 50mm, leveys 75 mm

5.2 Koekappaleiden merkinnät

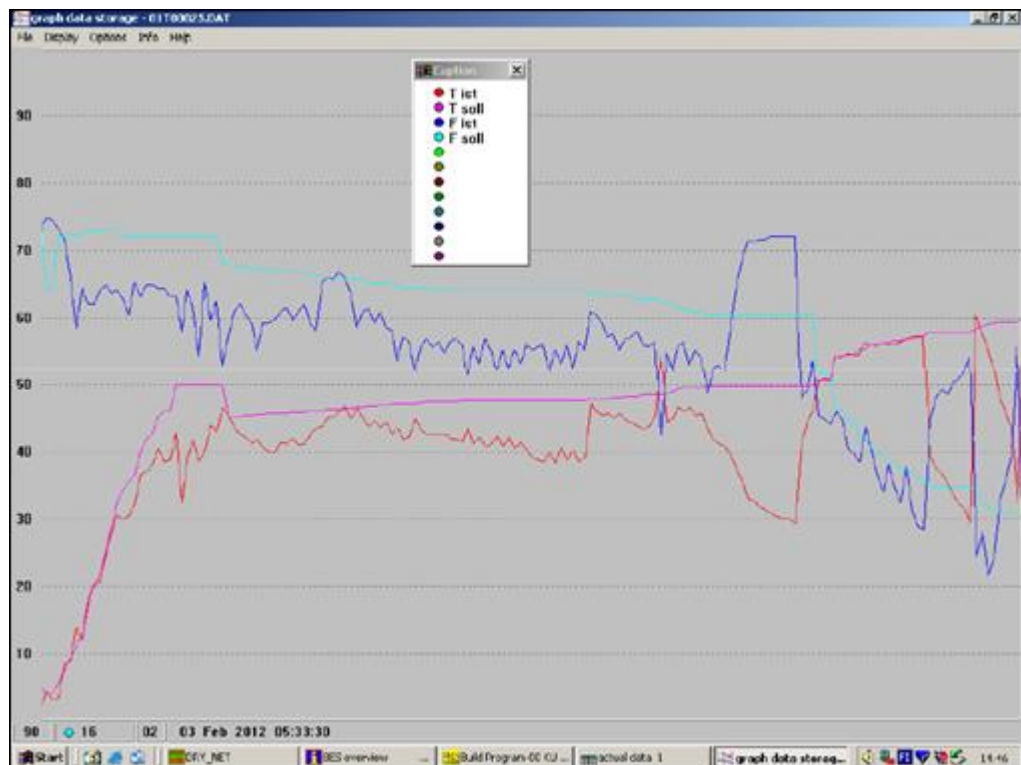
Koekappaleisiin merkattiin tusseilla tarkat merkinnät. Aluksi puulajit merkattiin kirjaimilla ”M” (mänty) ja ”K” (kuusi) ja tukkinumerot kirjaimen perään eli männyllä M1, M2, M3... ym. ja kuusella K1, K2, K3... ym. Tukin laatu merkittiin kirjaimella ”O” , jos se oli optimilaatua, ja ”L”, jos tukki oli lankeavaa laatua. Sahatavarakappaleet merkittiin 2-exlog-kappaleilla kirjaimilla ”A” ja ”B”, paitsi 32 mm:n mäntykappaleilla kirjaimet olivat virheellisesti ”A” ja ”C”. 4-exlog-kappaleet (eli 25 mm kappaleet) merkittiin kirjaimilla A, B, C ja D. Tyvikappale merkittiin numerolla ”1” ja latvakappaleet numerolla ”2”. Lopuksi merkittiin käsittelyn numero/kirjain-yhdistelmä. 32 mm:n kappaleilla käsittelymerkinnät olivat D1, D2, D3, D4, D5 tai D6. 50 mm:n kappaleilla ne olivat 1 tai 2 ja 25 mm:n kappaleilla C1 tai C2. Referenssi eli vertailukappaleet merkittiin tekstillä ”REF” ja varakappaleet tekstillä ”VARA”.

Otetaan esimerkki 50 mm:n koekappaleesta K50-OA1-1. Tässä on kyseessä kuusen tukki numero 5, joka on optimilaadun kappale A:n tyvipuoli (1) ja kappale menee käsittelyyn 1. Käsittelyn jälkeen merkintöjä jouduttiin usein vahvistamaan puun tummumisen tai pihkan poistumisen takia. Näin tapahtui varsinkin

mäntykoekappaleiden osalta. Tarkka ladontajärjestys ja sen kirjaaminen auttoi tunnistamaan kappaleet, joiden koko merkintä oli hävinnyt lämpökäsittelyssä.

5.3 Koekappaleiden kuivaus

Koekappaleet esikuivattiin KYAMK:n kuivauskamarissa. Kuivauksia suoritettiin yhteensä kuusi kuivausta. Pääsääntöisesti kuivaukset kulkivat Laatukamari-ohjelmaan (kuvio 9) asetetun kaavan mukaisesti. Kuivauksen prosessiarvot (Bollmannin ohjelmasta) saatiin vain kahdesta kuivauksesta. 32 mm:n mäntykappaleiden kohdalla tapahtui sähkökatkos, jolloin erä jäi kosteaksi. Myös homehtumista esiintyi muutamassa kappaleessa, ja sitä esiintyi lähinnä sahatavaran pintaan jääneessä sahanpurussa.



KUVIO 9. 50x150 mm kuusen kuivauskäyrä Laatukamari-ohjelmalla

Kappaleiden ladonta tehtiin koko kuivauskärryn pituudelle. Kappaleet ladottiin vierekkäin ja pituussuunnassa limittäin, jotta kuivuminen ja ilman kierto tapahtuisi tasaisesti. Rimoitus tehtiin huolellisesti noin 500 mm:n välein. Kuorman päälle ladottiin vielä ylimääräisiä tukinpuolikkaita, jotta saatiin lisää korkeutta kuormaan. Kuviossa 10 on valmiit kuivauskuormat kamarikuivaamossa.



KUVIO 10. Kamarikuivaamo ja 50x150 mm:n kuusen kuivauskuormat ennen kuivausta

5.4 Koekappaleiden pätkiminen ja kosteuskappaleet

Kuivauksen jälkeen tukeista sahatut koekappaleet pilkottiin lopullisiin lämpökäsittelymittoihin kaapalla. Yhdestä kappaleesta tuli sahata kaksi 2,15 metrin mittaista kappaletta. Tämä pituus mahtuu juuri sopivasti LAMK:n lämpökäsittelylaitokseen. Pitkien 4,5m - 4,8m kappaleiden (kuvio 11) päistä sahattiin mahdolliset päätyhalkemat, vajaasärmät ja muut vikaisuudet pois, sen

verran mitä kappaleiden pituus antoi myöten. Keskeltä sahattiin noin 50 mm pitkä pätkä kosteuskappaleeksi kappaleen kosteudenmäärittämistä varten. Kosteus määritettiin punnitus-kuivausmenetelmällä, standardin EN 13183-1 mukaisesti. Nämä kappaleet punnittiin kosteina ja laitettiin pariiksi vuorokaudeksi uuniin, jossa lämpötila oli 105 °C. Tämän jälkeen kappaleet punnittiin uudelleen ja laskettiin niiden kosteusprosentti.



KUVIO 11. Täyspitkät kuusen 50x150 mm:n kappaleet valmiina pätkittäväksi

Osa kappaleista jäi alimittaisiksi ja vajaasärmäisiksi sahauksen jälkeen. Tämä ongelma oli erityisesti havaittavissa männyn 32x125 mm:n kappaleilla, sillä sahaukseen tulleet tukit olivat liian lyhyitä ja kapeita. Tämä aiheutti taas ongelmia lämpökäsittelykuormaa tehdessä, josta lisää myöhemmin luvussa 5.6.4 Lämpökäsittelykuorman teko.

5.5 Koekappaleiden kuvaaminen ja oksien tarkastelu

Kaikki kappaleet kuvattiin niiden kaikilta neljältä syrjältä. Tarkoituksena oli taltioida kappaleiden oksat ja muut vikaisuudet mahdollisimman hyvin. Aluksi oli myös tarkoitus laskea ja mitata kaikkien kappaleiden oksamäärät, lajit, laadut, koot ja sijainnit, mutta työmäärän ollessa liian suuri projektin aikatauluun ja resursseihin verraten oksamittauksista luovuttiin. Myös oksien mittaus skannaamalla ei onnistunut aikataulullisesti. Ainostaan 50x150 mm:n ja halkaistujen kuusi-koekappaleiden oksat on tarkastettu manuaalisesti. Alle 7 mm:n oksat luokiteltiin helmioksiksi ja ne ainostaan laskettiin. Muista oksista tutkittiin ja merkittiin niiden sijainti (sahatavaran sivu L1, L2, S1, S2 + L=lapeoksa, S=syrjäoksa, SÄ=särmäoksa), oksamuoto (PY=pyöreä, SO=soikea, SA=sarvioksa, LO=lehtioksa, R=ryhmäoksa) ja oksalaatu (TO=terveoksa, KO=kuiva/kuollutoksa, KU=kuorioksa, LO=laho-oksa).

Kappaleet kuvattiin aluksi käsittelyjen mukaan, mutta myöhemmin siirryttiin käytännöllisempään kuvaustekniikkaan kuvaamalla kappaleet tukeittain, jolloin yhteen kuvaan saatiin neljä tai useampi kappale näiden mitoista riippuen. Kappaleet sijoitettiin kuvaan latvapuoli ylöspäin. Ensimmäisenä kuvattiin kappaleen pintalappeet (lape 1), jonka jälkeen kappaleet käännettiin myötäpäivään ja kuvattiin ensimmäinen syrjä (syrjä 1). Tämän jälkeen kuvattiin sydänlape (lape 2) ja toinen syrjä (syrjä 2). Samalla kappaleet punnittiin, jonka jälkeen ne lajiteltiin kärryihin. Lämpökäsiteltävät – ja varakappaleet lajiteltiin eri nippuihin ja referenssi-kappaleet vietiin tasaannutushuoneeseen, jossa ilman suhteellinen kosteus oli 65 % ja lämpötila 20 °C. Kuviossa 12 on kuva kuvaustilanteesta.



KUVIO 12. Kuvatut lankeava kuusi 50x150 mm kappaleet 26-30 lappeelta 1 ja syrjältä 1

5.6 Lämpökäsittelyt

Tässä luvussa käsitellään suoritettavat lämpökäsittelyt ja niissä käytetyt laitteet ja menetelmät. Lämpökäsittelyt tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun tiloissa lämpökäsittelyn puutavaran tuotesertifiointin TR 31 (2007-06-06) mukaisesti.

5.6.1 TekmaWood lämpökäsittelylaitos

Kaikki lämpökäsittelyt tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun (LAMK) TekmaWood-lämpökäsittelylaitoksella. Laitos on saapunut Lahden ammattikorkeakouluun vuonna 2002. Laitokseen kuuluu kamari, mitta- ja toimilaitteet, PC sekä vaunut ja kiskot. Kuviossa 13 on kuvattuna lämpökäsittelylaitos ulkopuolelta ja kuviossa 14 sisäpuolelta.



KUVIO 13. Tekmawood lämpökäsittelylaitos ulkopuolelta

Kamari on varustettu 7,5 kW:n puhallinmoottorilla. Puhallinmoottori on sijoitettu kamarin takaosaan. Puhaltimen nopeutta säädetään taajuusmuuttajan avulla. Puhallussuunta vaihtuu PC:lle määritetyn puhallusajan perusteella. Yleensä puhallussuunta muutetaan 0,5-1 h:n välein. Lämmityslaitteena toimii 1 kpl sähkövastuspattereita. Vastuspatteri koostuu kolmesta vastusryhmästä. Patterissa on 18 kpl 2,78 kW:n sähkövastusta. (TekmaWood Oy 2002, lämpökäsittelylaitoksen käyttöohje, 5.)

Höyrykehitin sijaitsee PC-huoneessa, ja sen tehtävä on höyryn kehittäminen prosessiin. Höyryä tarvitaan kaikissa lämpökäsittelyprosessin vaiheissa. Alkulämmityksessä höyry estää puutavaran pinnan liiallisen kuivumisen, lämpökäsittelyssä höyry toimii suojakaasuna ja tasaannutuksessa höyryn avulla palautetaan kosteutta puuhun. Höyrykehitin on sähköinen, ja se pystyy tuottamaan höyryä noin 30 kg/h. Kehitin on erillinen yksikkö, jossa on oma sähkökeskus, paineenylläpitojärjestelmä sekä sähkö- ja säätöjärjestelmä. Höyryn moottoriventtiili sijaitsee höyrykehittimen päällä. Sen toimintaa ohjaavat

paineanturit. Höyryventtiilin automaattista avautumista ja sulkeutumista tapahtuu pääasiassa puutavaran kuivausvaiheessa. Höyryventtiilin tarkoituksena on syöttää kamariin ulkopuolista höyryä, jolla pidetään kamari ylipaineisena ja estetään hapen pääsy kamariin käsittelyn aikana. Tällä tavoin estetään puutavaran syttyminen. Vedenpehmentimen tehtävä on poistaa vedestä kovuus, jotta kattilakiveä ei kehittyisi lämpökäsittelylaitokseen. Pehmentimessä on erillinen ohjauksikkö. (TekmaWood Oy 2002, lämpökäsittelylaitoksen käyttöohje, 5.)

Käsittelykamarin katolla on kaksi moottoriventtiiliä, jotka toimivat jäähdytyspelteinä lämpökäsittelyn jäähdytysvaiheessa. Kuivauksessa niiden tehtävä on toimia ilmanvaihtopelteinä, jolloin niiden kautta poistetaan ylimääräistä kosteutta. Peltien asento on myös nähtävillä näytöltä. (TekmaWood Oy 2002, lämpökäsittelylaitoksen käyttöohje, 5-7.)

Kamarin molemmilla sivuilla on sumutusputkistot, joissa kussakin on 1 kpl jäähdytysventtiilin suuttimia ja 2 kpl kostutusventtiilin suuttimia. Jäähdytysventtiilien suuttimen reiät ovat suuremmat kuin kostutusventtiilien suutinreiät. Kostutusventtiilejä käytetään pääasiassa prosessin tasaannutusvaiheen yhteydessä ja hätätilanteissa. Jäähdytysventtiilit toimivat ainostaan lämpökäsittelyn pitovaiheen jälkeisessä jäähdytyksessä ja tehtävänä on jäähdyttää lämpökäsitteltyä puutavaraa. (TekmaWood Oy 2002, lämpökäsittelylaitoksen käyttöohje, 5-7.)

Kamarin molemmilla seinille on sijoitettu Pt-100 kuiva-anturit, jotka mittaavat ilman lämpötilaa. Tämän lisäksi kamariin on sijoitettu märän lämpötilan mittaus. Anturina toimii myös Pt-100 anturi ja mittaus tapahtuu ns. märkäsukka-menettelmällä, jossa anturi on peitetty kostealla kankaalla. Paineanturit sijaitsevat kamarin molemmilla puolilla kaapeissa. Niiden avulla valvotaan kamarin sisällä vallitsevaa painetta. (TekmaWood Oy 2002, lämpökäsittelylaitoksen käyttöohje, 5-7.)



KUVIO 14. Tekmawood- lämpökäsittelylaitos, kamari sisältä

5.6.2 WinTek 2000 Chamber 5 – Heat Treatment-ohjelma

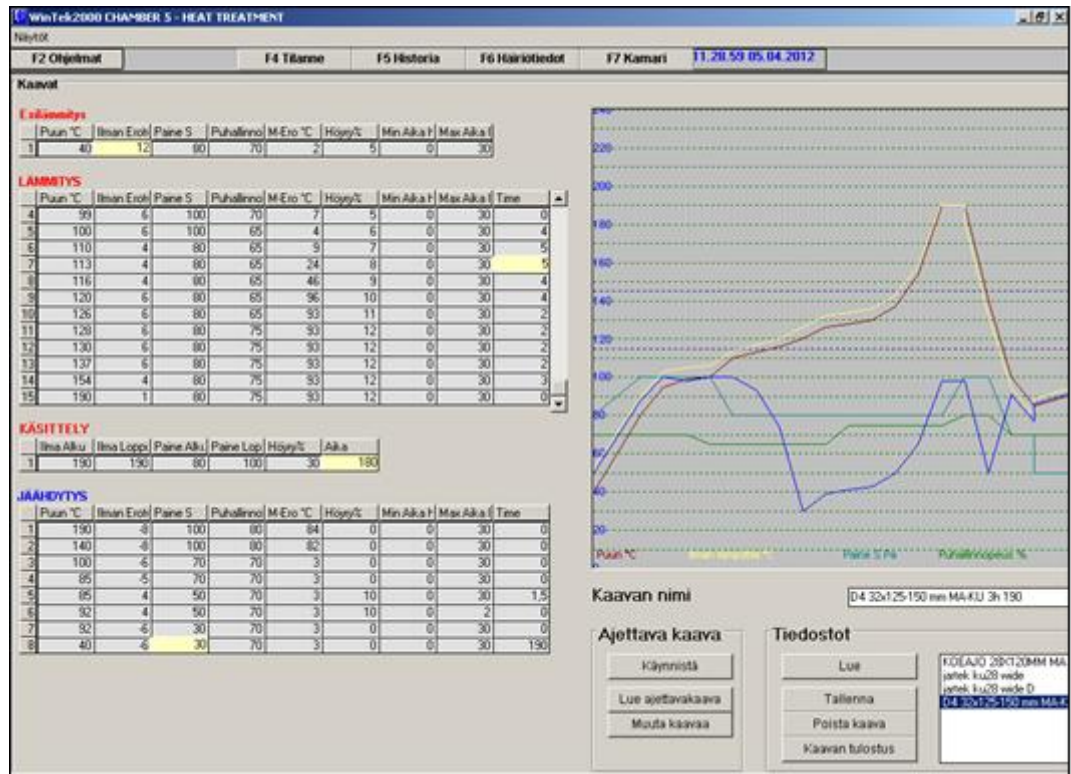
Ohjelmana käytettiin Jartekin WinTek2000 Chamber 5 – Heat Treatment-ohjelmaa. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun ohjelmaa käytettiin LAMK:n lämpökäsittelyuunissa. Ohjelman runkona käytettiin aikapohjaisuuteen perustuvaa menetelmää, jossa käsittelyn eri vaiheet vaihtuivat tietyn ajan mukaan, riippumatta puun lämpötilasta.

Ohjelman kaava koostui neljästä eri vaiheesta, jotka oli vielä jaettu portaisiin. Vaiheet olivat esilämmitys (yksi porras), lämmitys (x- määrä portaita), käsittely

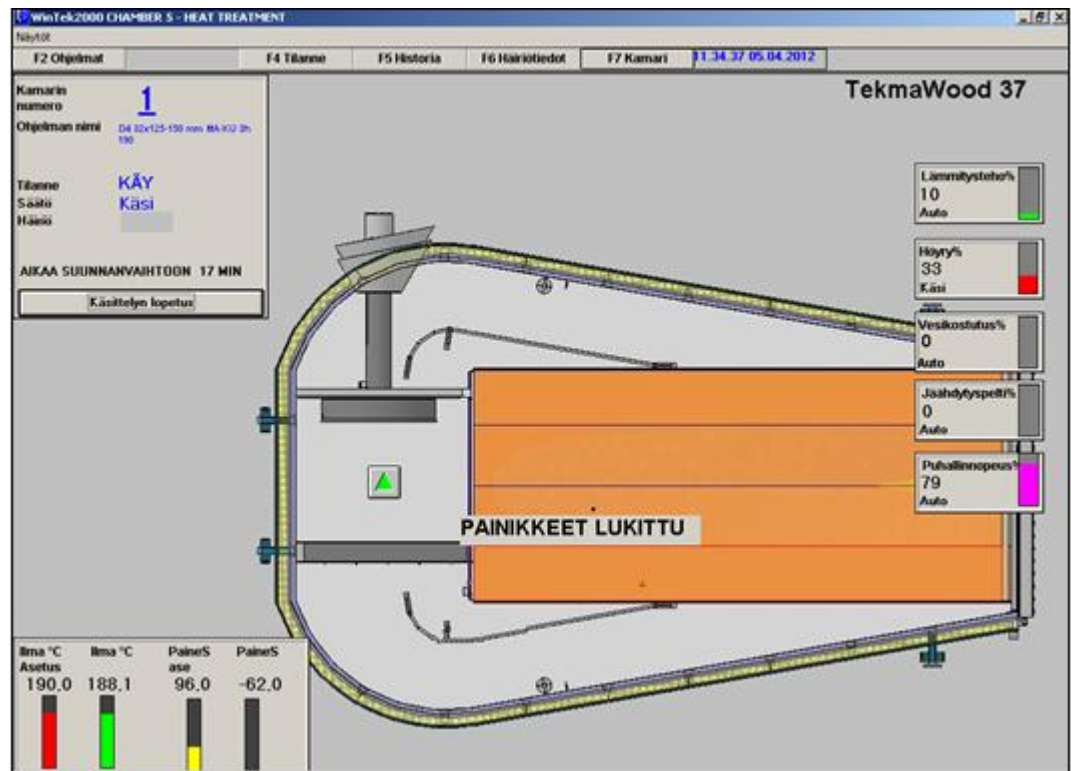
(yksi porras) ja jäädytys (x-määrä portaita). Prosessi eteni vaiheittain ja portaittain ohjelmaan syötetyn tuntimäärän mukaan, jolloin tietyn ajan kuluessa umpeen ohjelma vaihtoi seuraavaan vaiheeseen tai portaaseen. Alkuvaiheessa prosessi eteni puun lämpötilan mukaan 100°C:seen asti.

Ohjelman arvaamattoman luonteen ja yleisen turvallisuuden vuoksi lämpökäsittelyä tuli valvoa lämmitysvaiheen 150°C:sta asti aina jäädytysvaiheen 150 °C:seen asti jatkuvasti. Varsinkin lämmön noustessa kohti käsittelylämpötilaa ja sen aikana tuli olla tarkkana, jotta lämpötila ei pääse kohoamaan suunniteltua korkeammaksi, jolloin oli vaarana käsittelyn epäonnistuminen tai tulipaloriski.

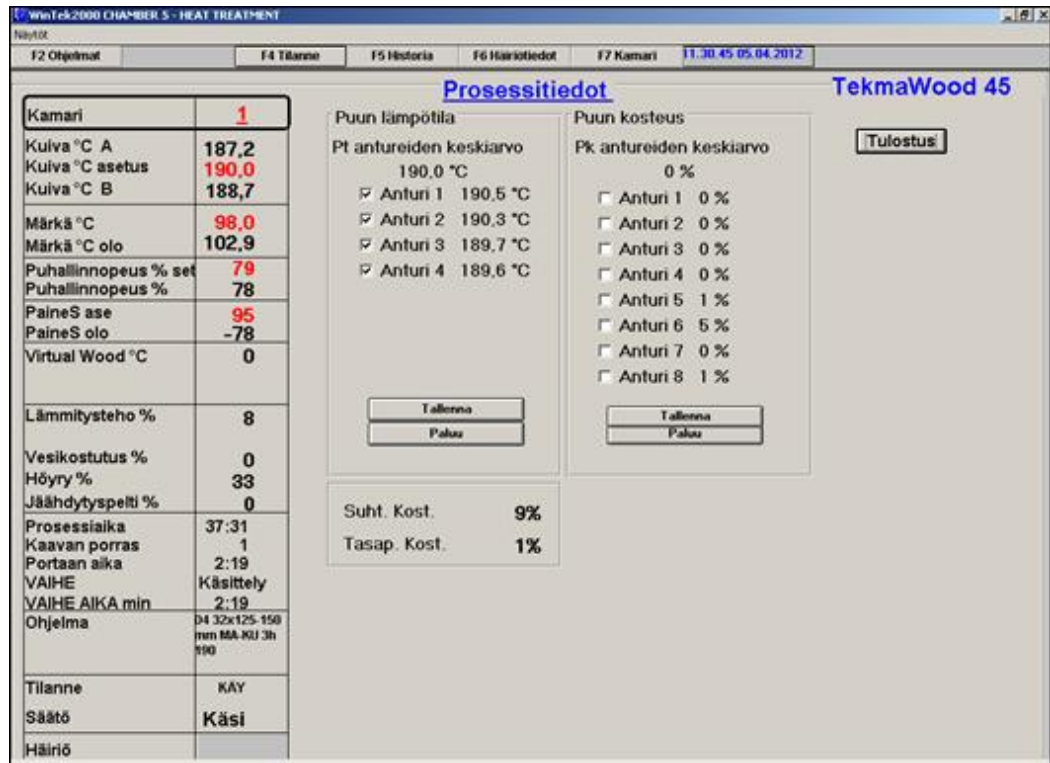
Kuvioissa 15-18 on esitetty ohjelman tärkeimmät valikot. Kuvion 15 ”ohjelmat”-välilehden kenttään syötettiin lämpöpuuyhdistykseltä saatujen lämpökäsittelykaavojen arvot. Kuvion 16 ”kamari”-välilehdestä säädettiin ohjelman parametreja, kuten höyryä käsi- ja automaattiajolle. Kuvion 17 ”tilanne”- välilehdestä seurattiin lämpökäsittelyn kulkua. Kuvion 18 ”historia”-välilehdestä nähdään koko lämpökäsittelyn käyttäminen eri käyrinä.



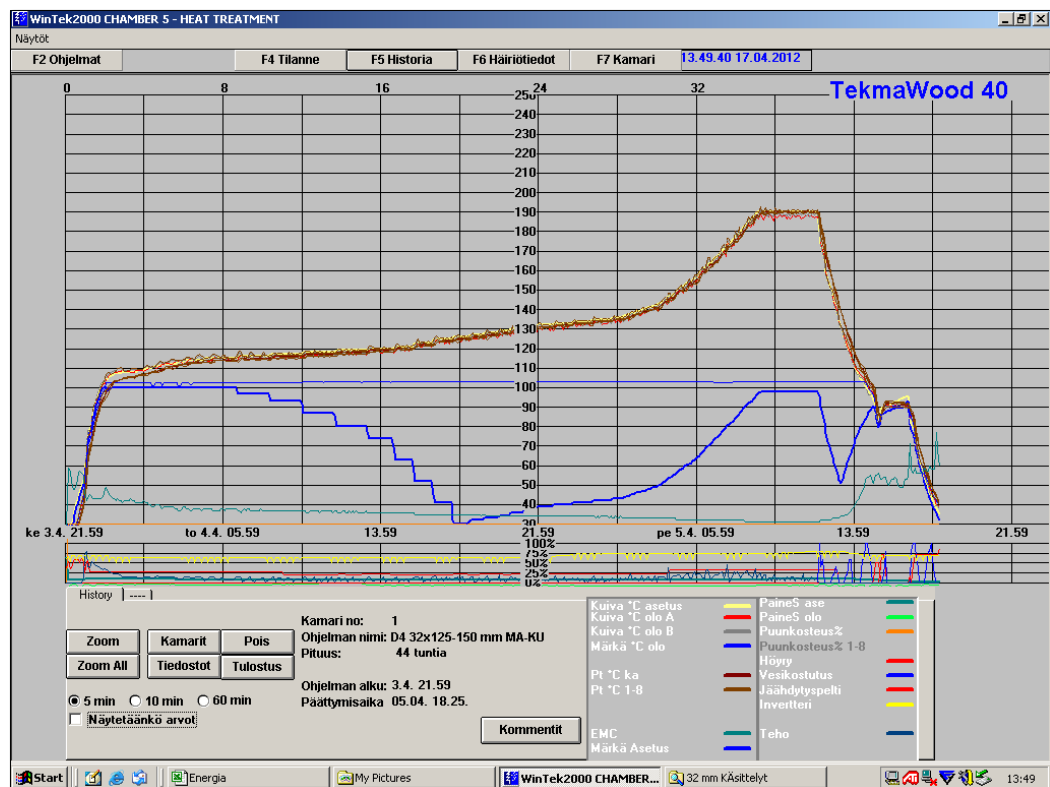
KUVIO 15. WinTek 2000 –ohjelma, ohjelmat



KUVIO 16. WinTek 2000 –ohjelma, kamari



KUVIO 17. WinTek 2000 -ohjelma, tilanne



KUVIO 18. WinTek 2000 -ohjelma, historia

5.6.3 Koekäsittelyt

Ennen varsinaisia lämpökäsittelyitä suoritettiin kaksi 0-sarjaa eli koeajoa Tekmawood-lämpökäsittelylaitoksella. Tarkoituksena oli testata laitoksen ja lämpökäsittelyohjelman toiminta ennen varsinaisia ajoja ja säätää ohjelman parametrit kuntoon. Ensimmäinen koeajo suoritettiin joulukuussa 2011 28 mm:n männyllä Jartekin vanhalla ohjausjärjestelmällä. Jartekin ohjausjärjestelmän muutoksen jälkeen tehtiin vielä yksi koeajo 28 mm:n männylle (Thermo D, 3 h). Koeajojen perusteella hienosäädettiin varsinaisten käsittelyjen asetukset.

5.6.4 Lämpökäsittelykuorman teko

Lämpökäsittelykuormat tehtiin pääsääntöisesti kaikki samalla ladontatekniikalla. Kappaleet ladottiin vaunuun niin, että yhdelle riville tuli viisi koekappaletta vierekkäin. Joissain tapauksissa kappaleita oli enemmän, esimerkiksi 50 mm:n halkaistuja. Kappaleet ladottiin tukkinumeron mukaan pienimmästä suurimpaan. Opti- ja lankeavaa laatua ladottiin kerroksittain vuorotellen. Mänty ja kuusi ladottiin eri kerroksiin vuorotellen, jos ne olivat samassa käsittelyssä. Kappaleiden latva- ja tyvipäät otettiin myös huomioon, ja kappaleet ladottiin niin, että päiden suunta vaihtelee kerroksittain. Ennen ladontaa kappaleet punnittiin ja niistä tarkastettiin sekä kirjattiin ylös mahdolliset virheet, kuten vajaasärmät, halkemat ja alimittaisuus lämpökäsittelyn puutavaran tuotesertifioinnin (TR 31, 2007-06-06) mukaisesti. Näillä virheillä saattaa olla merkitystä tuotantoprosessin suorittamisessa, koekappaleiden vaatimustenmukaisessa valmistamisessa sekä testaustilanteissa.

Varsinaisten kappaleiden jälkeen kuorman päälle ladottiin vielä varakappaleita, sillä virheellisiä kappaleita oli jokaisessa kuormassa. Varakappaleiden valinta toi ongelmia ladontaan, sillä kappaleet oli valittava samoista tukeista, jotta saadaan vertailukelpoisuutta eri käsittelyjen välille. Kuormaa täydennettiin tarvittaessa ylimääräisillä kappaleilla, jotta siitä saataisiin mahdollisimman korkea.

Lämpökäsittelykuorma tehtiin lämpökäsittelyn puutavaran tuotesertifioinnin mukaan (TR 31, 2007-06-06). Rimoitus tehtiin huolellisesti, jotta varmistettiin

lämpökäsittelyn vaatimustenmukaisuus ja välttyttiin muodonmuutoksilta. Rimoina käytettiin 15 mm:n mittatarkkoja metallirimoja. Rimat sijoitettiin tasaisin välein noin 500 mm:n päähän toisistaan, samoihin kohtiin, missä vaunun poikittaisraudat olivat. Rimakerrosten viimeiset rimat sijoitettiin enintään 100 mm:n päähän kappaleiden päistä. Tämä ei kaikkien kappaleiden osalta ollut kuitenkaan mahdollista niiden alimittaisuuden vuoksi.

Muodonmuutosten vähentämiseksi kuorman päälle laitettiin vielä vanerilevy ja sen päälle painoja noin 300 kg:n edestä. Tämä oli sertifikaatin TR 31 mukaan suositeltavaa. Painot olivat pyöreitä metallilevyjä, jotka painoivat kukin 25 kg. Painojen päälle ladottiin vielä tarvittaessa ylimääräisiä kappaleita tukkimaan koko uuni. Kuviossa 19 on valmis kuorma.



KUVIO 19. 50x125 mm mäntykuorma lämpökäsittelyyn menossa

Käsiteltävään puutavarakuormaan kiinnitettiin lopuksi kaksi Pt-100 puun lämpötila-anturia käsittelyerän kummallekin puolelle (kuvio 20). Antureille porattiin tiukat reiät puutavaran syrjäpinnalle viistosti. Väliin asettiin vielä ylimääräistä puusilppua, jotta anturit pysyisivät varmasti paikoillaan käsittelyn ajan. Lukemia voitiin sen jälkeen tarkkailla PC:ltä.



KUVIO 20. Pt-100-lämpötila-anturit

5.6.5 Lämpökäsittelyt ja lämpökäsittelykaavat

Lämpökäsittelyjä tehtiin yhteensä 12 kappaletta ja yksi lämminilmakuivaus. Lämpökäsittelyprosessit suoritettiin tuotesertifikaatin TR 31 mukaisesti. Prosessissa käytettiin ainoastaan vettä ja lämpöä. Prosessissa ei käytetty mitään kemikaaleja, eikä puutavarassa ollut käsittelyn jälkeen keinotekoisesti puun ominaisuuksiin vaikuttavia aineita. Lämpökäsittelyprosessi sisälsi kaikki sertifikaatin TR 31:n mukaan vaadittavat vaiheet eli kuivauksen, lämpökäsittelyn

ja tasaannutuksen. Koekappaleiden alkukosteus ennen käsittelyä hieman vaihteli, mutta pääsääntöisesti kosteudet olivat 16 - 19 %. Kappaleiden loppukosteus tasaannutusten jälkeen oli 3,5-5,5%.

Ajettujen koesarjojen ja höyrykehittimen tehottomuuden perusteella ohjelmaan päätettiin säätää höyryjä seuraavasti: Alkulämmityksen aikana höyryt nostettiin käsiajolla 50-60 %:iin. Höyrykehittimen teho riitti tähän hyvin. Jokaisessa lämpökäsittelyprosessissa on käytetty arvoa 55 %. Kun puun lämpötila on noussut 100 °C:seen, höyryt laskettiin käsiajon 20 %:iin. Käsittelyvaiheessa ohjelma pakotti höyryt 33%:iin. Jäähdytysvaiheen 150 °C: n jälkeen höyryt vaihdettiin automaattiajolle, jolloin arvo oli alussa 33% ja myöhemmin lämpötilan laskiessa 0%.

Taulukossa 5 on taulukoitu kaikki lämpökäsittelyt ja kuvioissa 20 ja 21 on kuvat kuormista lämpökäsittelyjen jälkeen. Lämminilmakuivauksen koekappaleet lähtivät Saksaan Göttingenin yliopistoon jatkotutkimuksiin mikrohalkeilun osalta, joten tässä opinnäytetyössä aihetta ei käsitellä enempää. Tarkoituksena oli myös suorittaa D6-käsittely 32 mm:n koekappaleille, mutta lämpökäsittelykaavaa ei ollut tiedossa tätä opinnäytetyötä kirjoitettaessa.

Taulukossa 5 ensimmäisillä sarakkeilla on lämpökäsittelyn tunnus ja sitä vastaavan sahatavaran dimensiot sekä puulajit (Mä=mänty, Ku=kuusi). ”Lämmönnostoaika”- sarakkeessa on se aika tunneissa, joka kului lämpötilan nostamiseen 0 °C:sta lämpökäsittelyvaiheen lämpötilaan. Neljännellä ja viidennellä sarakkeella on lämpökäsittelyvaiheen lämpötila ja tässä lämpötilassa käytetty aika tunneissa. ”Jäähdytys+tasaannutus”-sarakkeessa on aika, joka kului lämpökäsittelyvaiheen päättymisestä koko lämpökäsittelyn päättymiseen.

TAULUKKO 5. Lämpökäsittelyt

Käsit. tunnus	Saha- tavara (mm)	Lämmön- nostoaika (h)	Lämpö- tila (°C)	Pito- aika (h)	Jäähdytys+ tasaannutus (h)	Kokonais- kesto (h)	Sähkön- kulutus (kWh)
C1	25x125- 150 mm Mä-Ku	26	180	2	11	39	418
C2	25x125- 150 mm Mä-Ku	28	212	3	4	35	514
D1	32x125- 150 mm Mä-Ku	37	212	1	10	48	634
D2	32x125- 150 mm Mä-Ku	37	212	6	9	52	658
D3	32x125- 150 mm Mä-Ku	44	212	3	5	52	558
D4	32x125- 150 mm Mä-Ku	35	190	3	6	44	561
D5	32x125- 150 mm Mä-Ku	38	220	3	10	51	637
J1a	50x 150 mm Mä	63	180	3	17	83	844
J1b	50x 150 mm Ku	63	180	3	18	84	875
J2a	50x 150 mm Mä	68	212	4	26	98	1057
J2b	50x 150 mm Ku	68	212	4	23	95	986



KUVIO 20. 32x125-150 mm:n mänty- ja kuusikuorma käsittelyn jälkeen



KUVIO 21. 25x125-150 mm mänty- ja kuusikuorma lämpökäsittelyn jälkeen

5.7 Tutkimuskoekappaleiden valmistus

Värimittauksen koekappaleet valmistettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa. Lahden ammattikorkeakoulun lämpökäsittelylaitoksessa käsitellyt koekappaleet pätkittiin kaapan avulla eri osiin sekä pituuksiin jatkotutkimuksia varten. Värimittauskappaleet olivat noin 500mm pitkiä. Mahdollisimman luotettavien tulosten vuoksi kappaleet oli höylättävä. Pintapuoli höylättiin ensin oikohöylällä sileäksi. Tämän jälkeen ne höylättiin tasohöylällä määrämittaam (kuvio 22). Tässä tutkimuksessa käsiteltävät 32mm:n paksuiset koekappaleet höylättiin noin 25 mm:n paksuisiksi. Kummaltakin lappeelta höylättiin sama määrä puuainesta pois, jotta päästäisiin mahdollisimman yhtäläiseen alkuasetelmaan värimittausten kannalta.



KUVIO 22. Värimittauskappaleiden höyläys

5.8 Värimittaus

Puun värimittauksen tarkoitus on saada kokonaiskuva puun väristä. Mitattavia tekijöitä ovat puun tummuusaste, punaisuus, keltaisuus, värin kokonaisuutos, saturaatio, värisävyt ja heijastuminen. Tässä työssä väri määritettiin värimittarilla kalorimetrisesti CIELAB-järjestelmän mukaisesti. Mittauksessa käytettiin $L^*a^*b^*$ -värikoordinaatistoa, josta lisää luvussa 5.9 Värimittausmenetelmä (CIE Lab). Värin mittaamista ja värianalyysiä voidaan käyttää laadunvalvonnassa ja näitä mittaustuloksia voidaan hyödyntää oksien ja muiden puun virheiden paikantamisessa, kuormituskokeissa ja lujuusmittauksissa. (Sallinen V., 18-19.) Laitosten sisäisessä laadunvalvossa värimittaus on vapaaehtoista (Inspecta 2012, 8-9.) ja ulkoisessa laadunvalvonnassa väri mitataan kerran vuodessa. (Aavakallio 2012.)

Lämpökäsitellyn puun vääränlainen väri alentaa puun arvoa, kun taas joissain käyttökohteissa sillä on suuri esteettinen arvo. Puun värillä on suuri merkitys mm huonekaluissa ja koristeviiluissa –ja laminaateissa sekä kaupankäynnissä. Värin yhtenäisyydellä ja ominaisvärillä on merkitystä lämpökäsitellyn puutavaran hintojen arvioinnissa. (Johansson 2008, 104-109; Aguilar-Tovar, Moya, Tenorio 2009, 207-210.)

Värimittaus suoritettiin kaikille käsittelyerien kappaleille. Mittaukset suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa. Väri mitattiin käyttäen Minolta Chroma Meter CR-210-värianalyysilaitetta (kuvio 23). Laite käyttää laaja-alaista valaisua ja 0 asteen valaisukulmaa. Mittausalue on halkaisijaltaan 50mm. (Minolta 1988.) Mittaukset otettiin pääasiassa kappaleiden pintalappeelta, mutta 32 mm:n ja 50 mm:n dimensioiden tapauksissa myös sydänlapeelta. Tässä työssä keskitytään vain 32 mm:n dimension pinta- ja sydänlapeen värimittaustuloksiin.



KUVIO 23. Minolta Chroma Meter CR-210-värianalyysilaite

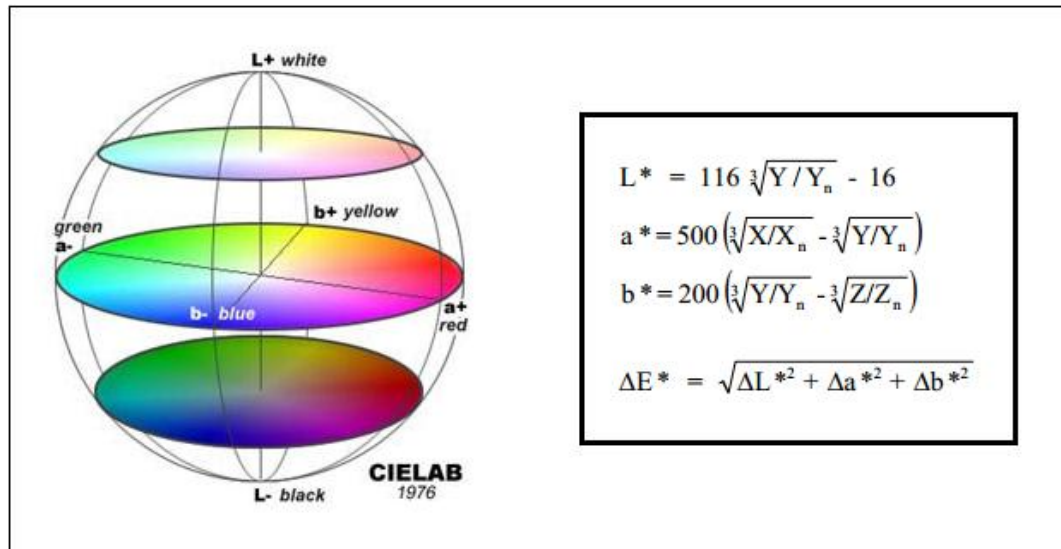
Ennen varsinaisia mittauksia värianalyysilaite kalibroitiin täysin valkoisen kalibrointilevyn avulla. Kappaleista valittiin silmämääräisesti kolme mittauskohtaa. Mittauskohdat pyrittiin valitsemaan niin, että ne kuvaavat mahdollisimman hyvin koko koekappaleen väriä. Kaikki kolme mittausta otettiin peräkkäin samalta leveyskohdalta eri pisteistä. Kummaltakin puolelta väri pyrittiin mittamaan samasta kohdasta. Värianalyysilaite laski näistä mittauksista väriarvojen keskiarvon. Oksien ja muiden virheiden kohdalta mittaamista on pyritty välttämään. Kuviossa 24 on värinmittauksen suoritus.



KUVIO 24. Värimittauksen suoritus

5.9 Värimittausmenetelmä (CIELab)

Tässä työssä värejä tutkittaessa käytettiin CIELAB ($L^*a^*b^*$) -värimittausmenetelmää. L^* -komponentilla tarkoitetaan puun tummuus- ja valoisuusastetta. Maksimi- L^* -arvo on 100, joka edustaa täysin vaaleaa (valkoista) väriä. Minimi- L^* -arvo on 0, joka edustaa täysin mustaa. Väliarvot kuvaavat harmaan eri sävyjä. Komponenteilla a^* ja b^* ei ole numereenisiä rajoja. Positiivinen a^* -arvo tarkoittaa punaisuutta ja negatiivinen a^* -arvo vihreyttä. Positiivinen b^* -arvo kuvastaa keltaisuutta ja negatiivinen arvo sinisyyttä. (Hunterlab 2008, 1-2; JISC Digital Media 2012.)



KUVIO 25. CIE Lab-väriavaruus ja mitattavat värikomponentit sekä $L^*a^*b^*$ -väriarvojen laskentakaavat (Hunterlab 2008)

$L^*a^*b^*$ -väriavaruusmallia (CIE Lab) käytetään yleisesti kappaleen väriä mitattaessa. Menetelmä koostuu kolmiulotteisesta XYZ-mallista, jossa X kuvaa punaisuuden osuutta väriavaruudessa, Y keltaisen ja vihreän osuutta ja Z sinisen osuutta. Näiden avulla saadaan laskettua $L^*a^*b^*$ -väriarvot sekä kokonaisvärinmuutos ΔE . Kuviossa 25 esitetään kyseisten arvojen laskentakaavat ja väriavaruus. (Hunterlab 2008.)

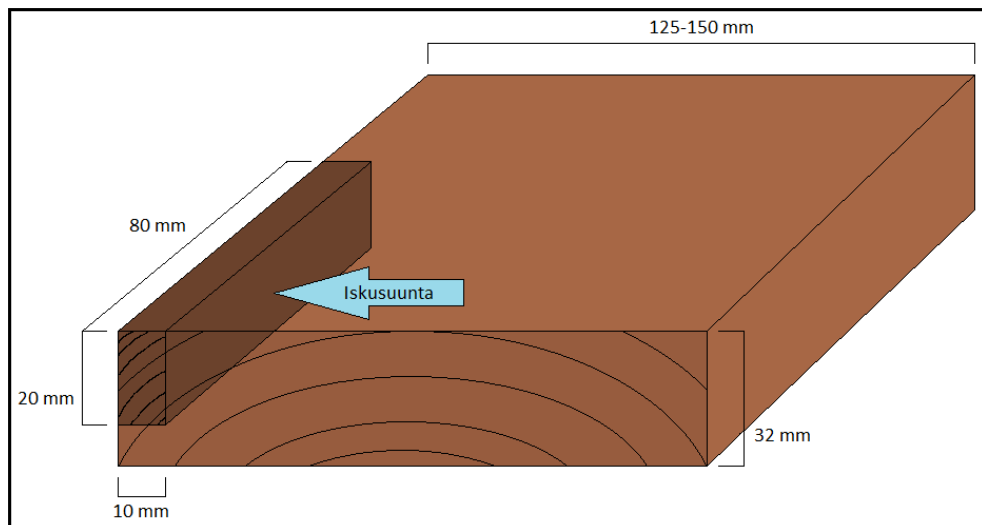
5.10 Iskulujuusmittaus

Iskulujuusmittaukset tehtiin Mikkelin ammattikorkeakoulussa standardin EN ISO 179-1 mukaisesti, joka on normaalisti ollut käytössä muovien iskulujuuksien testauksissa. Laitteena käytettiin kuvion 26 Sharpy ROELL AMSLER RKP 300 – iskuvasaraa (kuvio 26). Sharpy testissä heilahdusvasara nostetaan yläasentoon ja alhaalle asetetaan testikappale. Vasara vapautetaan ja annetaan vapaasti iskeytyä testikappaleeseen. Heilahdusvasaran energia on ala-asennossaan 300 J. Iskun voimasta kappale katkeaa ja absorboi osan vasaran energiasta, joka näkyy jouleina mitta-asteikolla. Tästä arvosta laskettiin Sharpy-iskulujuus (J/mm^2) kaavalla

$X/(10*20))*1000$. (Aavakallio 2012). Testikappaleen sahaus ja mitat havainnollistetaan kuviossa 27.



KUVIO 26. Sharpy ROELL AMSLER RKP 300 -iskuvasara



KUVIO 27. Iskulujuus koekappaleen sahaus, mitat ja iskusuunta

6 TULOKSET

Tulokset osiossa käsitellään värinmittauksista ja iskulujuusmittauksista saatuja tuloksia. Tuloksia tarkastellaan värinmittausten osalta 20:stä tai useammasta kappaleesta saatujen keskiarvojen, keskihajontojen ja näistä muodostettujen kaavioiden avulla. Vertailuksi mitattiin männyn ja kuusen referenssikappaleista pintalappeen L*-arvot kolmesta saman erän kappaleesta. L*-komponentin keskiarvo männyllä oli noin 84 ja kuusella noin 85. Iskulujuudet otettiin vain joka toisesta vastaavasta kappaleesta eli mittauksia oli 10 kpl/laatu.

6.1 Värinmittaus

Männyn ja kuusen värinmittaustulosten keskiarvot ja vastaavat keskihajonnat esitetään numeroina taulukoissa 6 ja 7. Taulukoihin valitut erilaiset värit edustavat myös myöhemmissä taulukoissa ja diagreimmeissa vastaavia laatuja. Sininen väri edustaa optimi mäntyä ja punainen väri lankeavaa mäntyä. Vihreä väri edustaa optimi kuusta ja violetti väri lankeavaa kuusta.

TAULUKKO 6. Männyn värinmittaustulosten keskiarvot ja vastaavat keskihajonnat

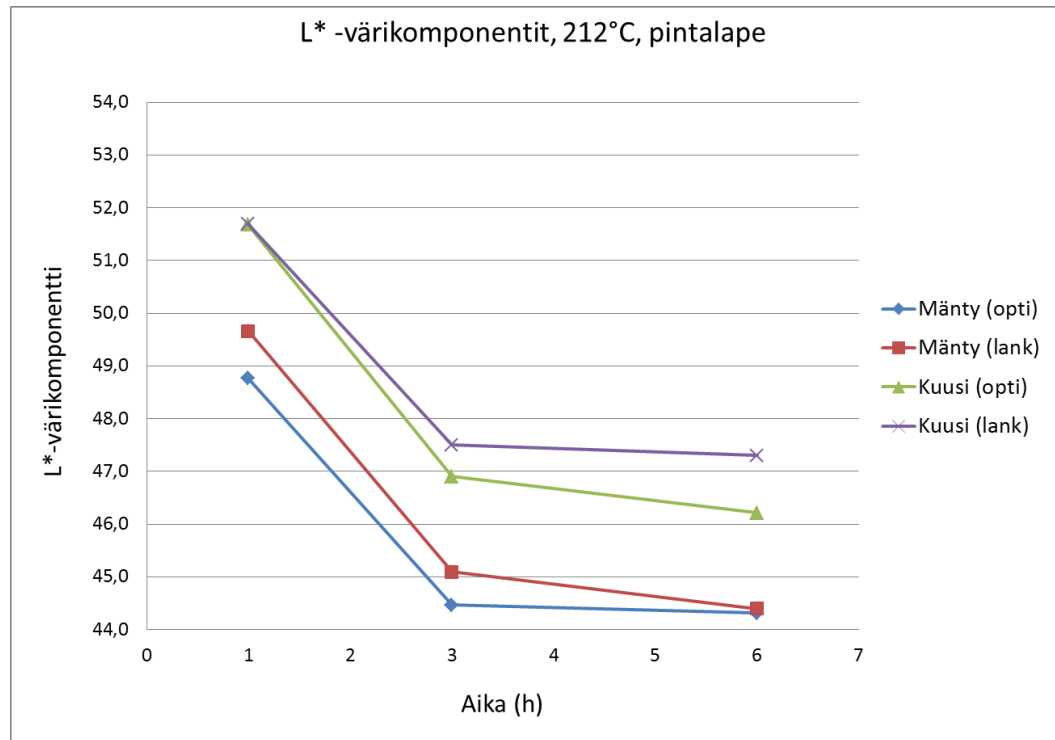
Keskiarvot (mänty opti.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (opti.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	58,0	9,3	25,8	60,3	8,8	25,7
D1	212	1	48,8	10,2	21,7	52,8	9,3	22,4
D3	212	3	44,5	9,6	19,1	48,7	9,3	21,0
D2	212	6	44,3	9,2	18,6	47,5	8,9	19,9
D5	220	3	44,5	9,2	18,9	45,9	9,1	19,8
Keskihajonnat (mänty opti.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (opti.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	1,8	0,3	0,8	1,6	0,3	0,6
D1	212	1	1,7	0,3	0,8	1,8	0,3	0,6
D3	212	3	2,2	0,3	1,0	1,4	0,3	0,9
D2	212	6	2,3	0,3	1,2	1,1	0,3	0,8
D5	220	3	1,6	0,2	0,7	1,3	0,2	0,8
Keskiarvot (mänty lank.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (lank.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	58,3	9,2	26,0	61,2	8,7	26,2
D1	212	1	49,7	10,1	22,1	53,1	9,3	22,5
D3	212	3	45,1	9,5	19,1	48,7	9,3	20,9
D2	212	6	44,4	9,4	18,8	48,0	9,1	20,3
D5	220	3	45,0	9,2	19,0	46,6	8,9	20,0
Keskihajonnat (mänty lank.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (lank.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	2,2	0,4	0,9	1,5	0,4	0,7
D1	212	1	1,9	0,4	0,4	1,4	0,3	0,5
D3	212	3	2,0	0,4	1,0	1,6	0,4	0,8
D2	212	6	1,7	0,2	0,8	1,4	0,3	0,7
D5	220	3	1,5	0,2	1,0	1,2	0,2	0,7

TAULUKKO 7. Kuusen värinmittaustulosten keskiarvot ja vastaavat keskihajonnat

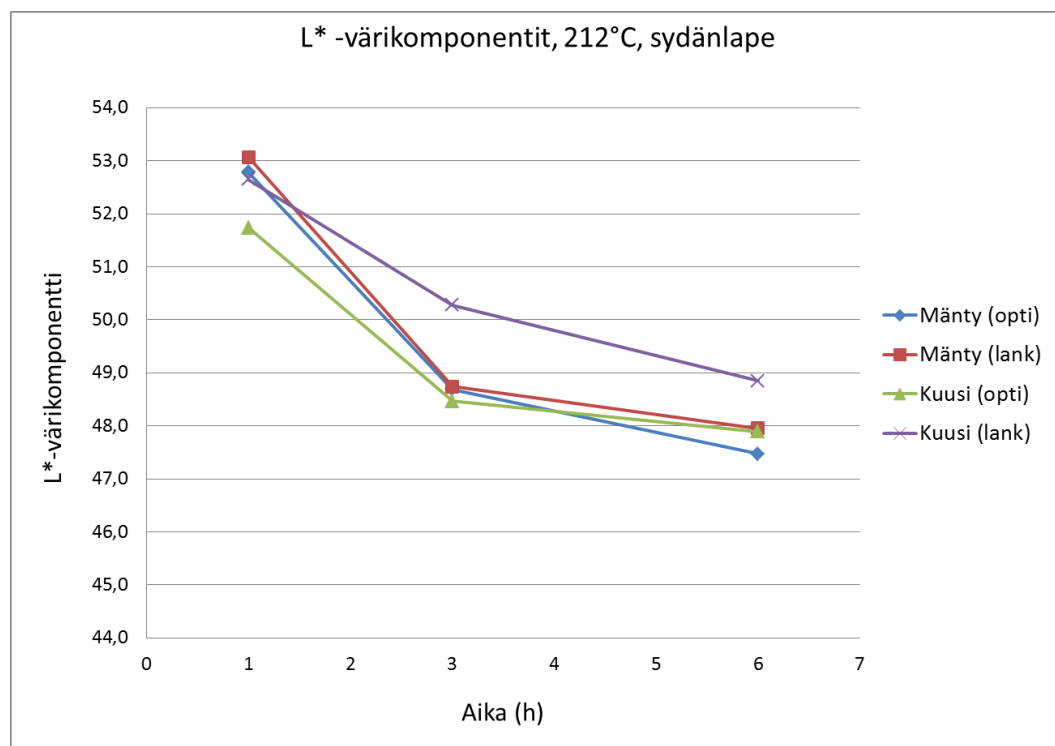
Keskiarvot (kuusi opti.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (opti.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	60,0	8,7	24,7	60,6	7,9	24,3
D1	212	1	51,7	9,1	21,4	51,7	9,0	22,4
D3	212	3	46,9	9,0	19,5	48,5	9,0	20,9
D2	212	6	46,2	8,9	19,3	47,9	8,9	20,9
D5	220	3	44,1	9,0	18,2	46,2	9,0	19,8
Keskihajonnat (kuusi opti.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (opti.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	2,1	0,5	0,7	3,4	0,5	0,3
D1	212	1	1,2	0,3	0,6	2,1	0,2	0,7
D3	212	3	1,3	0,2	0,8	1,8	0,2	1,0
D2	212	6	0,7	0,1	0,4	1,5	0,2	0,9
D5	220	3	1,5	0,3	0,8	2,0	0,3	0,8
Keskiarvot (kuusi lank.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (lank.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	60,7	8,7	24,4	63,8	7,5	24,3
D1	212	1	51,7	9,1	21,6	52,7	8,7	22,6
D3	212	3	47,5	9,2	20,1	50,3	8,9	21,5
D2	212	6	47,3	9,2	20,5	48,8	9,0	21,2
D5	220	3	44,4	9,2	18,6	47,5	8,8	20,5
Keskihajonnat (kuusi lank.)			Pintalape			Sydänlape		
Käsittely (lank.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	L*	a*	b*	L*	a*	b*
D4	190	3	1,2	0,3	0,6	1,9	0,4	0,5
D1	212	1	1,3	0,2	0,6	2,1	0,2	0,7
D3	212	3	1,3	0,2	0,8	1,6	0,2	0,9
D2	212	6	1,7	0,2	1,0	1,5	0,2	0,8
D5	220	3	1,3	0,2	0,9	1,9	0,2	1,0

6.1.1 L*a*b* -värikomponentit lämpötilassa 212 °C

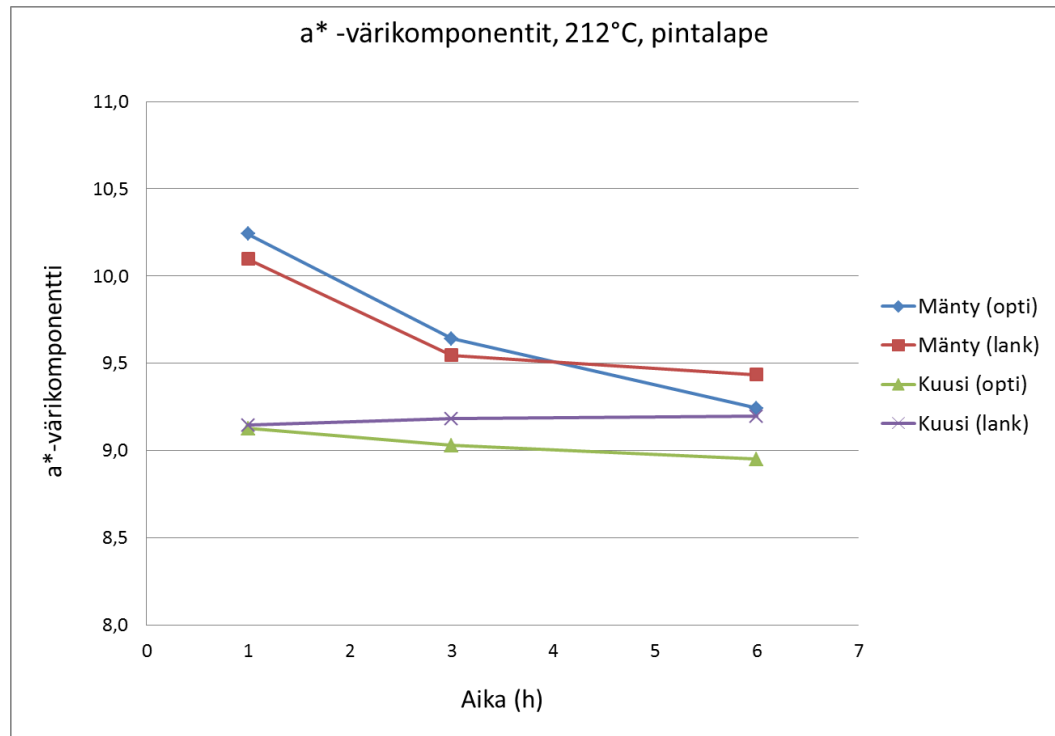
Tässä luvussa esitetään lämpötilassa 212 °C käsiteltyjen kappaleiden värinmittaustulokset (L*, a* ja b*) pistediagrammeina. Tähän kuuluvat käsittelyt D1 (212 °C, 1 h), D2 (212 °C, 6 h) ja D3 (212 °C, 3 h). Kaikissa diagrammeissa on esitetty männyn ja kuusen optimi sekä lankeavat laadut. Pinta- ja sydänlappeet on esitetty erikseen. Kuviossa 28 ja 29 käsitellään L*-komponenttia, kuvioissa 30 ja 31 a*-komponenttia ja kuvioissa 32 ja 33 b*-komponenttia.



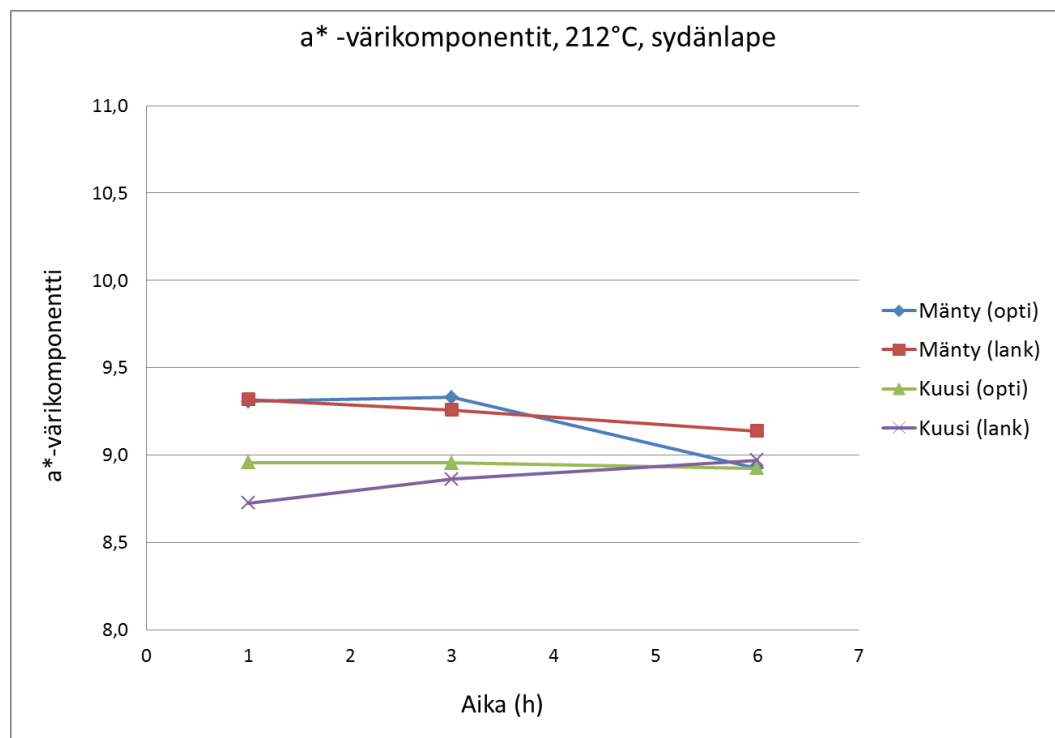
KUVIO 28. Pintalappeen L*-arvo ajan funktiona



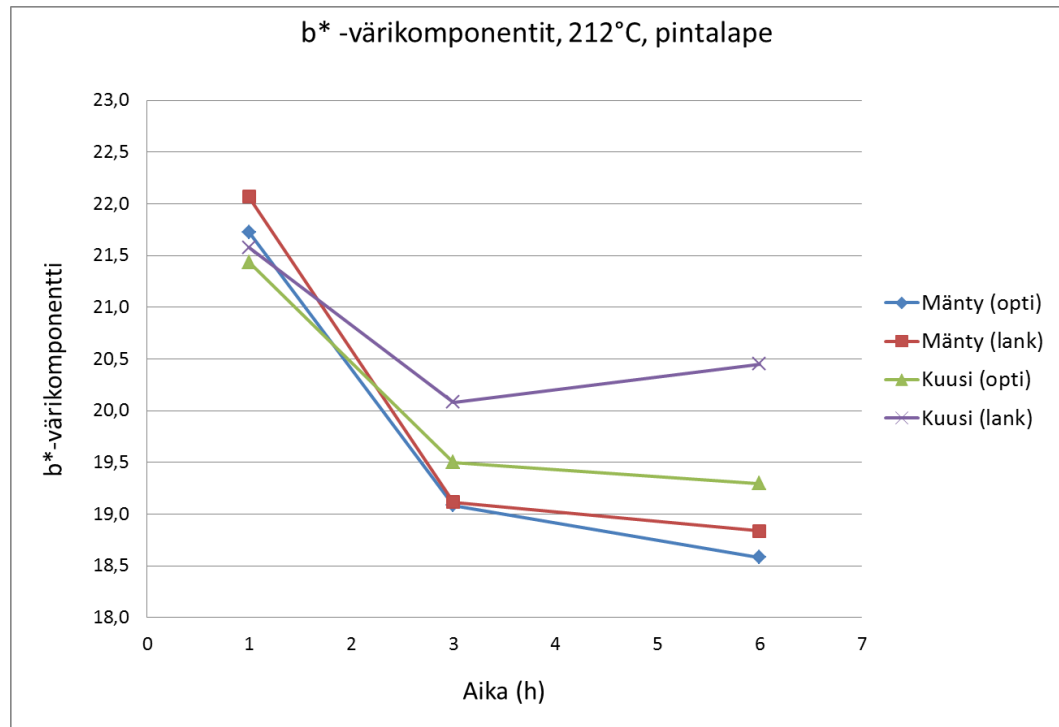
KUVIO 29. Sydänlappeen L*-arvo ajan funktiona



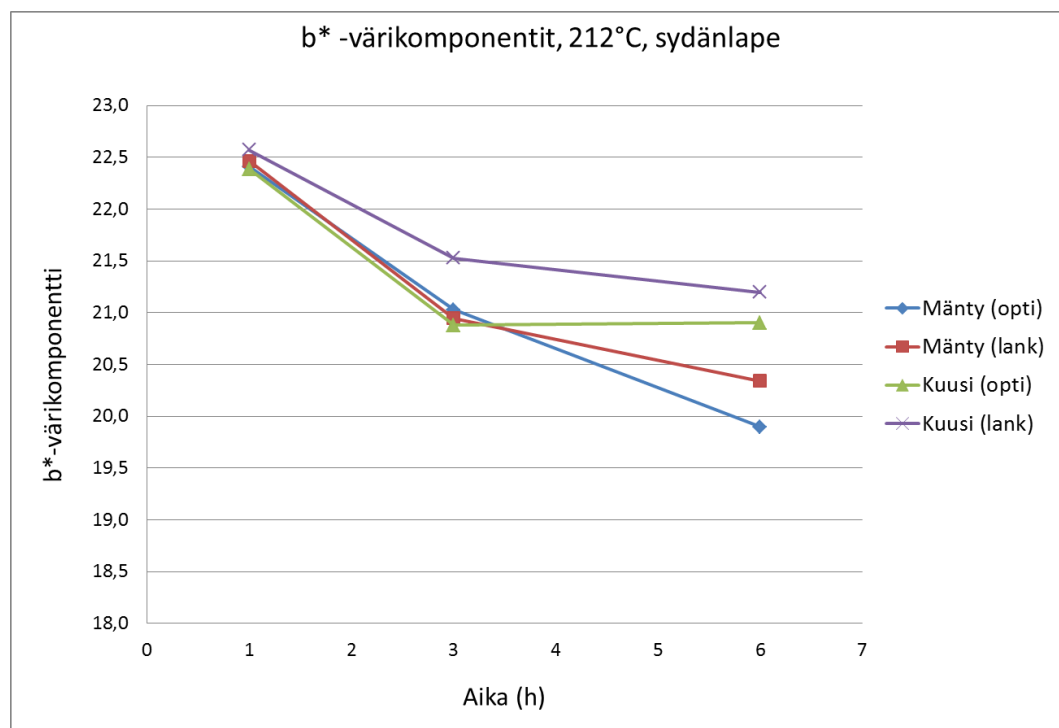
KUVIO 30. Pintalappeen a*-arvo ajan funktiona



KUVIO 31. Sydänlappeen a*-arvo ajan funktiona



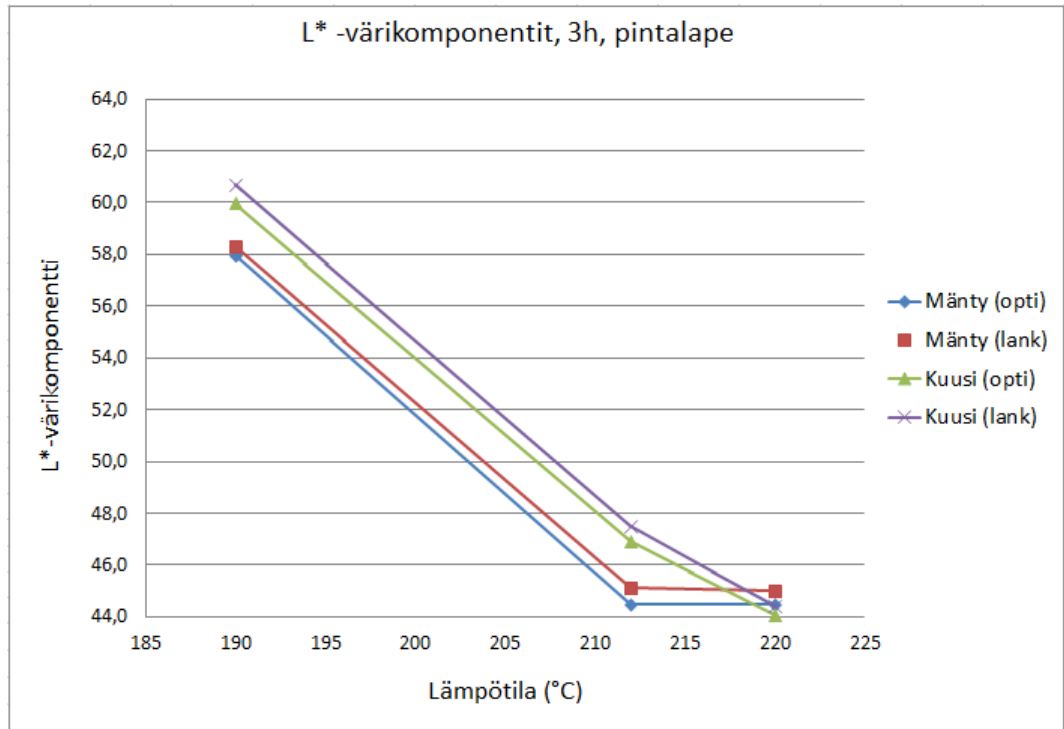
KUVIO 32. Pintalapeen b*-arvo ajan funktiona



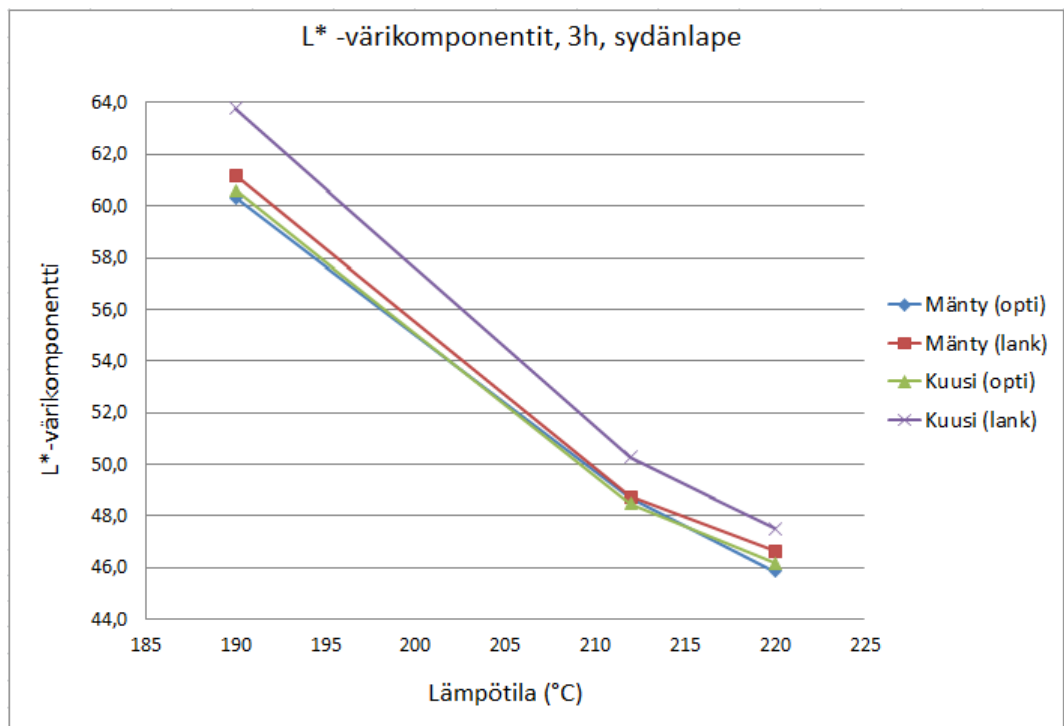
KUVIO 33. Sydänlapeen b*-arvo ajan funktiona

6.1.2 $L^*a^*b^*$ -värikomponentit pitoajassa 3 h

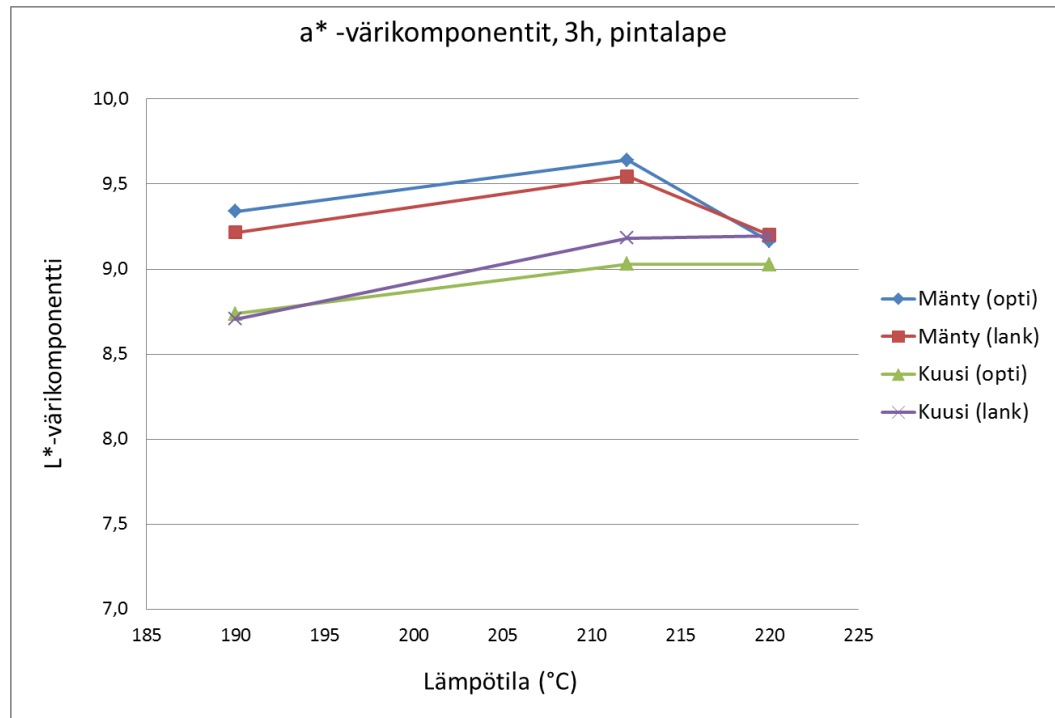
Tässä luvussa esitetään pitoajassa 3 h käsiteltyjen kappaleiden värinmittaustulokset (L^* , a^* ja b^*) pistediagrammeina. Tähän kuuluvat käsittelyt D3 (212 °C, 3 h), D4 (190 °C, 3 h) ja D5 (220 °C, 3 h). Kaikissa diagrammeissa on esitetty männyn ja kuusen optimi sekä lankeavat laadut. Pinta- ja sydänlappeet on esitetty erikseen. Kuviossa 34 ja 35 käsitellään L^* -komponenttia, kuvioissa 36 ja 37 a^* -komponenttia ja kuvioissa 38 ja 39 b^* -komponenttia.



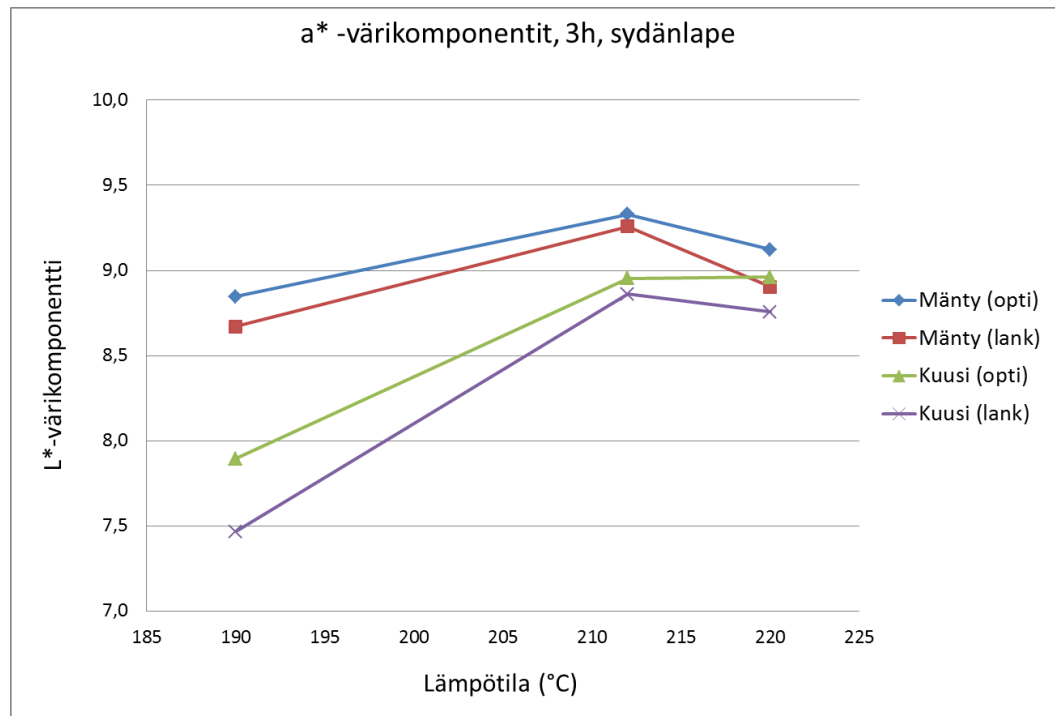
KUVIO 34. Pintalapeen L*-arvo lämpötilan funktiona



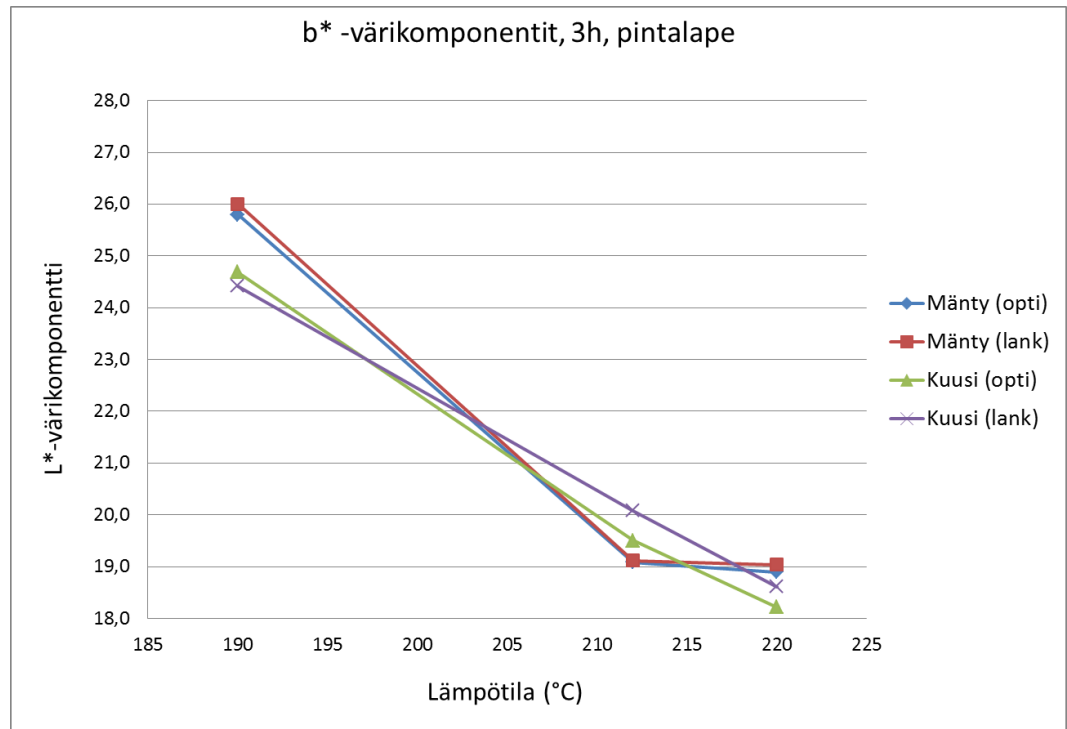
KUVIO 35. Sydänlapeen L*-arvo lämpötilan funktiona



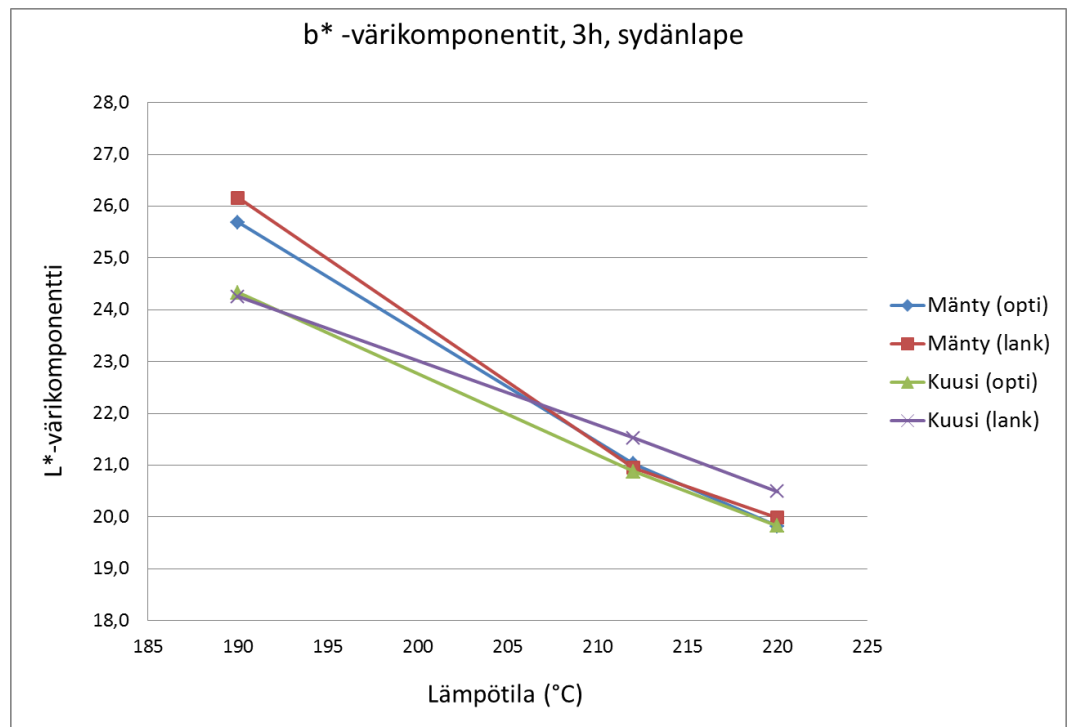
KUVIO 36. Pintalapeen a*-arvo lämpötilan funktiona



KUVIO 37. Sydänlapeen a*-arvo lämpötilan funktiona



KUVIO 38. Pintalapeen b*-arvo lämpötilan funktiona



KUVIO 39. Sydänlapeen b*-arvo lämpötilan funktiona

6.1.3 Kokonaisvärinmuutokset (ΔE)

Tämän luvun taulukossa 8 ja kuviossa 40 esitetään lämpötilassa 212 °C käsiteltyjen kappaleiden kokonaisvärinmuutokset ΔE numeroina ja pylväsdiagrammina. Näihin kuuluvat käsittelyt D1 (212 °C, 1 h), D2 (212 °C, 6 h) ja D3 (212 °C, 3 h). Diagrammissa on esitetty männyn ja kuusen optimi sekä lankeavat laadut eri lämpötilojen muutoksissa. Pinta- ja sydänlapeet on esitetty erikseen.

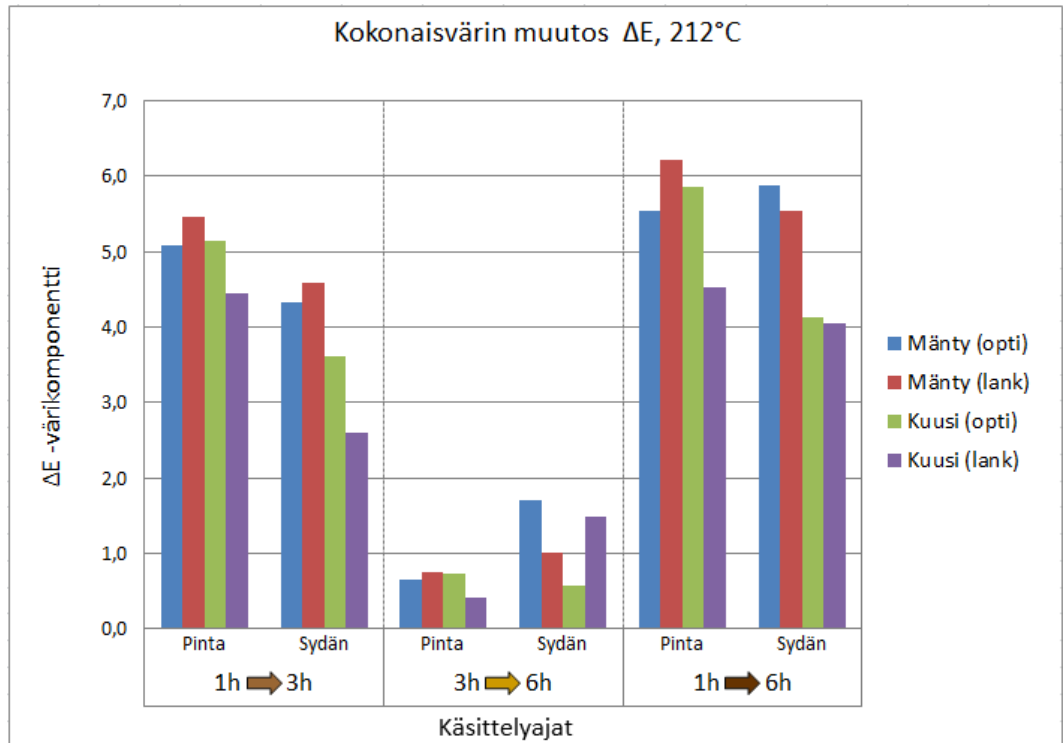
Taulukossa 9 ja kuviossa 41 esitetään pitoajassa 3 h käsiteltyjen kappaleiden kokonaisvärinmuutokset ΔE numeroina ja pylväsdiagrammina. Näihin kuuluvat käsittelyt D3 (212 °C, 3 h), D4 (190 °C, 3 h) ja D5 (220 °C, 3 h). Diagrammissa on esitetty männyn ja kuusen optimi sekä lankeavat laadut eri pitoaikojen muutoksissa. Pinta- ja sydänlapeet on esitetty erikseen.

TAULUKKO 8. Kokonaisvärinmuutokset ΔE lämpötilassa 212 °C

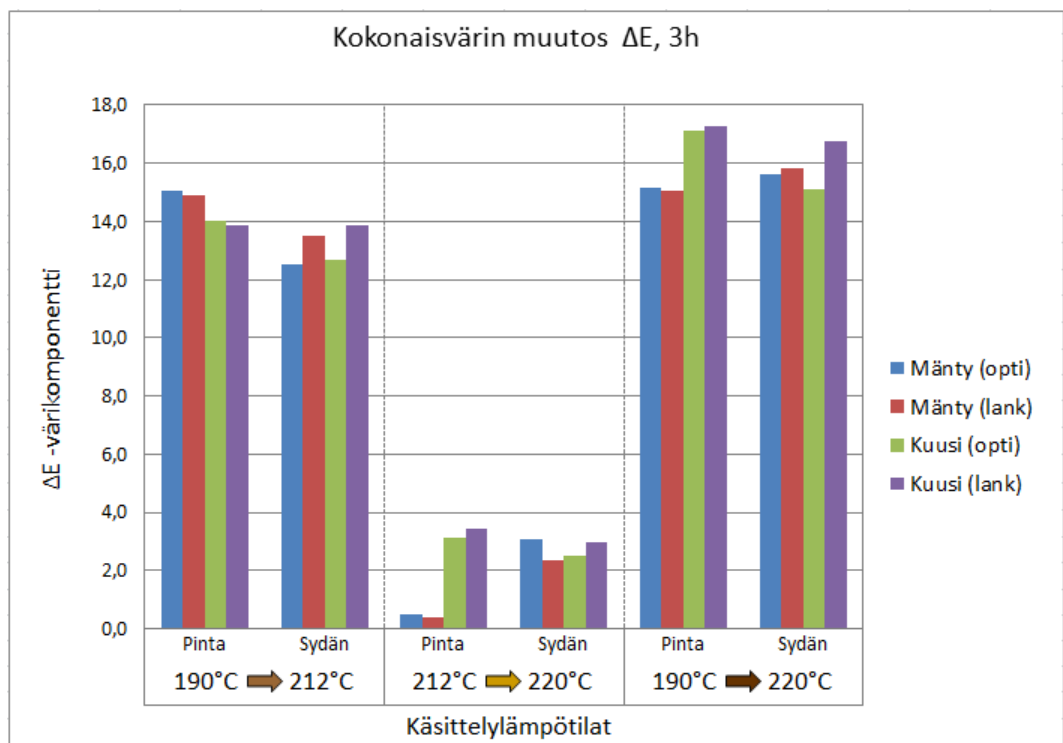
Mänty optimi	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D1 (212°C, 1h) ==> D3 (212°C, 3h)	5,1	4,3
D3 (212°C, 3h) ==> D2 (212°C, 6h)	0,7	1,7
Mänty lankeava	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D1 (212°C, 1h) ==> D3 (212°C, 3h)	5,5	4,6
D3 (212°C, 3h) ==> D2 (212°C, 6h)	0,8	1,0
Kuusi optimi	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D1 (212°C, 1h) ==> D3 (212°C, 3h)	5,1	3,6
D3 (212°C, 3h) ==> D2 (212°C, 6h)	0,7	0,6
Kuusi lankeava	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D1 (212°C, 1h) ==> D3 (212°C, 3h)	4,5	2,6
D3 (212°C, 3h) ==> D2 (212°C, 6h)	0,4	1,5

TAULUKKO 9. Kokonaisvärinmuutokset ΔE pitoajassa 3 h

Mänty optimi	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D4 (190°C, 3h) ==> D3 (212°C, 3h)	15,1	12,5
D3 (212°C, 3h) ==> D5 (220°C, 3h)	0,5	3,1
Mänty lankeava	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D4 (190°C, 3h) ==> D3 (212°C, 3h)	14,9	13,5
D3 (212°C, 3h) ==> D5 (220°C, 3h)	0,4	2,3
Kuusi optimi	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D4 (190°C, 3h) ==> D3 (212°C, 3h)	14,0	12,7
D3 (212°C, 3h) ==> D5 (220°C, 3h)	3,1	2,5
Kuusi lankeava	Pinta	Sydän
Käsittelyt	ΔE	ΔE
D4 (190°C, 3h) ==> D3 (212°C, 3h)	13,9	13,9
D3 (212°C, 3h) ==> D5 (220°C, 3h)	3,4	3,0



KUVIO 40. Kokonaisvärin muutokset lämpötilassa 212 °C



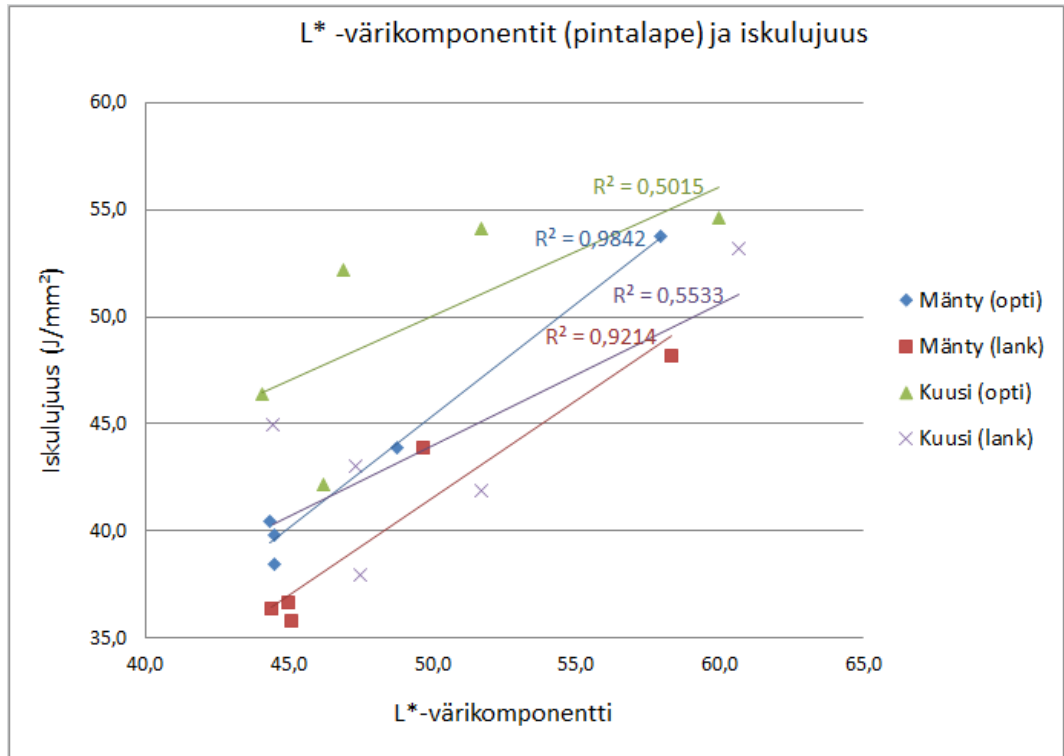
KUVIO 41. Kokonaisvärin muutokset pitoajassa 3 h

6.2 Iskulujuus

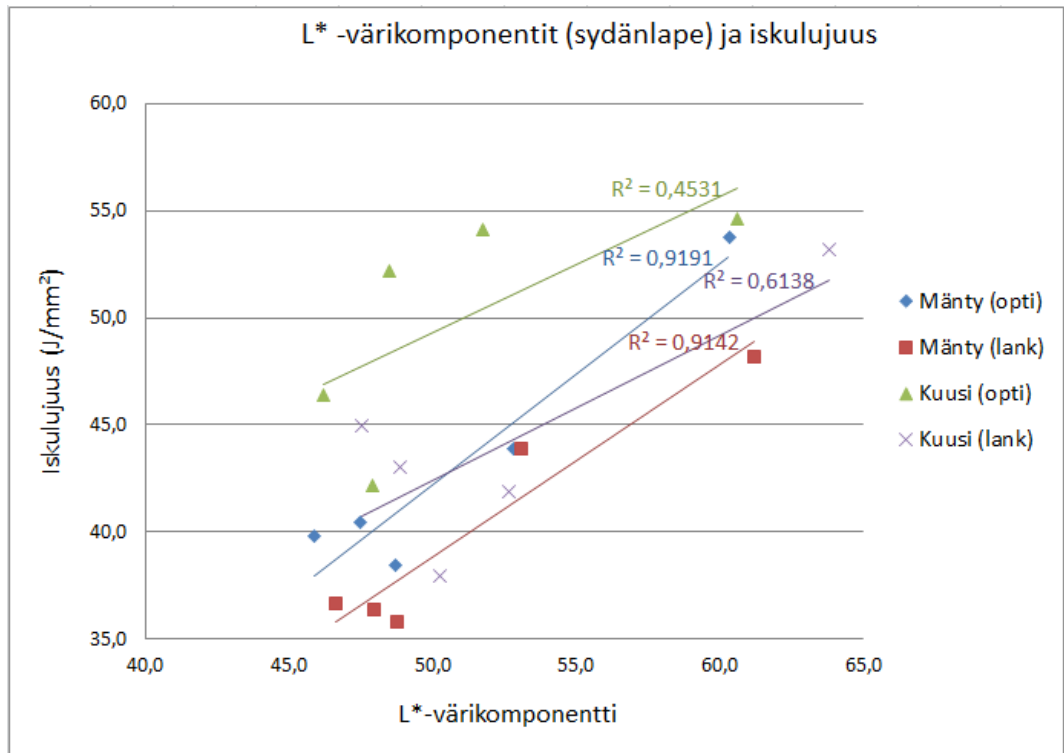
Tässä luvussa esitetään iskulujuustulokset. Taulukkoon 10 on koottu D1-D5-käsittelyjen ja referenssikappaleiden L^* -värikomponenttien keskiarvot sekä vastaavat iskulujuuksien keskiarvot ja niiden hajonnat puulajeittain ja laaduittain. Kuvioissa 42 ja 43 on esitetty männyn ja kuusen optimi sekä lankeavat laadut L^* -värikomponentin funktiona pistediagrammeina selityskertoimiseen pinta- ja sydänlapeittain.

TAULUKKO 10. L*-värikomponenttien keskiarvot sekä vastaavat iskulujuuksien keskiarvot ja niiden hajonnat puulajeittain ja laaduittain

Mänty optimi			Väri		Iskulujuus	
Käsittely (opti.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	Pinta L*	Sydän L*	Lujuus J/mm ²	Hajonta J/mm ²
D4	190	3	58,0	60,3	53,8	9,7
D1	212	1	48,8	52,8	43,9	3,9
D3	212	3	44,5	48,7	38,5	6,6
D2	212	6	44,3	47,5	40,4	4,5
D5	220	3	44,5	45,9	39,9	2,7
REF	-	-	84	-	70,1	12,4
Mänty lankeava			Väri		Iskulujuus	
Käsittely (lank.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	Pinta L*	Sydän L*	Lujuus J/mm ²	Hajonta J/mm ²
D4	190	3	58,3	61,2	48,2	5,5
D1	212	1	49,7	53,1	43,9	5,7
D3	212	3	45,1	48,7	35,8	6,0
D2	212	6	44,4	48,0	36,4	6,9
D5	220	3	45,0	46,6	36,7	3,3
REF	-	-	84	-	64,4	12,7
Kuusi optimi			Väri		Iskulujuus	
Käsittely (opti.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	Pinta L*	Sydän L*	Lujuus J/mm ²	Hajonta J/mm ²
D4	190	3	60,0	60,6	54,7	19,3
D1	212	1	51,7	51,7	54,1	11,5
D3	212	3	46,9	48,5	52,2	18,1
D2	212	6	46,2	47,9	42,2	12,1
D5	220	3	44,1	46,2	46,4	14,7
REF	-	-	85	-	77,2	18,7
Kuusi lankeava			Väri		Iskulujuus	
Käsittely (lank.)	Lämpötila (°C)	Aika (h)	Pinta L*	Sydän L*	Lujuus J/mm ²	Hajonta J/mm ²
D4	190	3	60,7	63,8	53,2	8,7
D1	212	1	51,7	52,7	41,9	5,9
D3	212	3	47,5	50,3	38,0	8,4
D2	212	6	47,3	48,8	43,0	8,1
D5	220	3	44,4	47,5	45,0	7,8
REF	-	-	85	-	63,9	16,0



KUVIO 42. Iskulujuus pintalapteen L*-värikomponentin funktiona



KUVIO 43. Iskulujuus sydänlapteen L*-värikomponentin funktiona

7 TULOSTEN ANALYYSINTI

7.1 L*a*b* -värikomponentit lämpötilassa 212 °C

Tuloksista havaitaan selkeästi, että lämpökäsittelyvaiheen pitoajan pidentäminen pienentää L*-arvoa eli puu tummuu. Kuvioiden 28 ja 29 värinmuutoksista huomataan kuitenkin, että kolmen tunnin pitoajan jälkeen 212 °C:ssa ei enää juurikaan L* -arvon pienenemistä eli värin tummenemista tapahdu, tai se on hyvin pientä, noin 0,2-1 yksikköä. Ensimmäisen kahden tunnin aikana huomataan, että värin tummeneminen on melko voimakasta niin pinta- kuin sydänlapeellakin, noin 3,5-4,5 yksikköä. Kuvion 29 sydänlapeen värin tummeneminen jatkuu kolmen tunnin pitoajan jälkeen yleisesti ottaen hieman voimakkaammin kuin pinalapeella. Kuvioita tarkasteltaessa huomataan myös, että sydänlape on noin 1-3 yksikköä vaaleampaa koko lämpökäsittelyn ajalta kuin pinalape.

Kuusen L*-arvot ovat pinalapeella (kuvio 28) selvästi suurempia kuin männyllä eli kuusi on lämpökäsittelyn jälkeen vaaleampaa noin kolme yksikköä.

Pinalapeella optimilaadut ovat noin 2-3 yksikköä tummempia kuin lankeavat laadut. Sydänlapeella (kuvio 29) L*-arvoissa laatujen erot ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä ja ainostaan lankeava kuusi erottuu hieman vaaleampana. Optimilaadut ovat yleisesti myös sydänlapeella lankeavia laatuja hieman tummempia.

Kappaleiden punaisuuden (a*) arvot pienenevät yleisesti ottaen pitoajan pidentyessä (kuviot 30 ja 31). Arvojen pienentyminen on kuitenkin melko vähäistä, noin 0-1 yksikköä yhden ja kuuden tunnin pitoajan välillä.

Sydänlapeella muutos on lähes olematonta (kuvio 31). Poikkeuksena on kummallakin lapeella lankeava kuusi, jonka punaisuus näyttää hieman kasvavan. Kuusen a*-arvot ovat kummallakin lapeella 0-1 yksikköä pienemmät kuin männyllä.

Kappaleiden keltaisuuden (b*) arvot pienenevät pitoajan pidentyessä (kuviot 32 ja 33). Ensimmäisen kahden tunnin aikana pinalapeen b*-arvon muutos on noin 2-kertaa voimakkaampaa kuin sydänlapeella. Kolmen tunnin pitoajan jälkeen

keltaisuuden pienentyminen on enää melko vähäistä kummallakin lappeella, noin 0-1 yksikköä. Männyllä keltaisuuden pienentyminen kummallakin lappeella on yleisesti voimakkaampaa kuin kuusella. Kuviosta 32 havaitaan, että poikkeuksena on jälleen lankeava kuusi, jonka b^* -arvot näyttävät kasvavan pitoajan pidentyessä. Kuusen b^* -arvot ovat kummallakin lappeella suuremmat kuin männyllä.

7.2 $L^*a^*b^*$ -värikomponentit pitoajassa 3 h

Tuloksista havaitaan selkeästi, että käsittelylämpötilaa nostettaessa puu tummuu eli L^* -arvo laskee 190 °C - 220 °C välillä noin 16 yksikköä (kuviot 34 ja 35). Tummeneminen on vielä voimakasta 212 °C:een jälkeen, paitsi pintalappeen männyn L^* -arvot eivät enää juurikaan muutu (kuvio 34). Kuusi on jälleen yleisesti kummallakin lappeella 0-2 yksikköä vaaleampaa kuin mänty.

Optimilaadut ovat hieman tummempia kuin lankeavat laadut. Sydänlappen L^* -arvot ovat noin kaksi yksikköä suurempia kuin pintalappeella. Sydänlapeella arvojen erot eri laaduilla ovat pienemmät kuin pintalappeella. Poikkeuksena käyttäytyy kuitenkin jälleen lankeava kuusi, joka on muita selvästi vaaleampaa.

Kuvioista 36 ja 37 havaitaan, että punaisuus (a^*) on nousujohteista noin 0,5-1,5 yksikköä kummallakin lappeella 212 °C:een asti, jonka jälkeen männyn a^* -arvot laskevat, mutta kuusen arvot eivät juurikaan muutu. Kummallakin lappeella kuusen a^* -arvot ovat noin 0,2-1 yksikköä alhaisemmat kuin männyllä. Samoin lankeavien laatujen arvot ovat yleisesti optimilaatuja hieman alhaisemmat.

Kuvioista 38 ja 39 havaitaan, että keltaisuus (b^*) laskee melko suoraviivaisesti käsittelylämpötilan noustessa. Pintalappeella männyn b^* -arvot eivät juurikaan muutu 212 °C:n jälkeen. Eri puulajien ja laatujen käyttäytyminen on melko samankaltaista kaikissa lämpötiloissa. Suurimmat, yhden yksikön erot männyn ja kuusen välillä ovat 190 °C:ssa.

7.3 Kokonaisvärinmuutokset (ΔE) lämpötilassa 212 °C

Kuviosta 40 havaitaan, että yhdestä kolmeen tuntiin kokonaisvärimuutos on yleisesti 4-5 yksikköä suurempi kuin kolmesta kuuteen tuntiin. Pitoajan pidentäminen ei siis vaikuta 212 °C:n lämpötilassa kokonaisvärin muutoksiin merkittävästi. Männyllä kokonaisvärinmuutokset ovat yleisesti hieman suuremmat kuin kuusella. Pintalappeella muutokset ovat pitoajan 1 h - 3 h tapauksessa sydänlappen muutoksia yleisesti 1-2 yksikköä suuremmat. Kolmen tunnin jälkeen värinmuutoksen tilanne on päinvastainen eli sydänlappen kokonaisvärin muutokset ovat 0,3-1 yksikköä pintalappen muutoksia suuremmat.

7.4 Kokonaisvärinmuutokset (ΔE) pitoajassa 3 h

Kuviosta 41 havaitaan, että 190 °C:sta 212 °C:seen kokonaisvärimuutos on yleisesti 10-14 yksikköä suurempi kuin 212 °C:sta 220 °C:seen. Lämpötilan nostaminen ei siis vaikuta merkittävästi kokonaisvärin muutoksiin nostettaessa 212 °C:sta 220 °C:seen kolmen tunnin pitoajalla. Kokonaisvärinmuutokset puulajien ja laatuojen välillä ovat melko tasaisia. Selkeä ero on kuitenkin 212 - 220 °C: n tapauksessa pintalappeella, jossa männyn muutos on hyvin pientä, mutta kuusella huomattavasti voimakkaampaa.

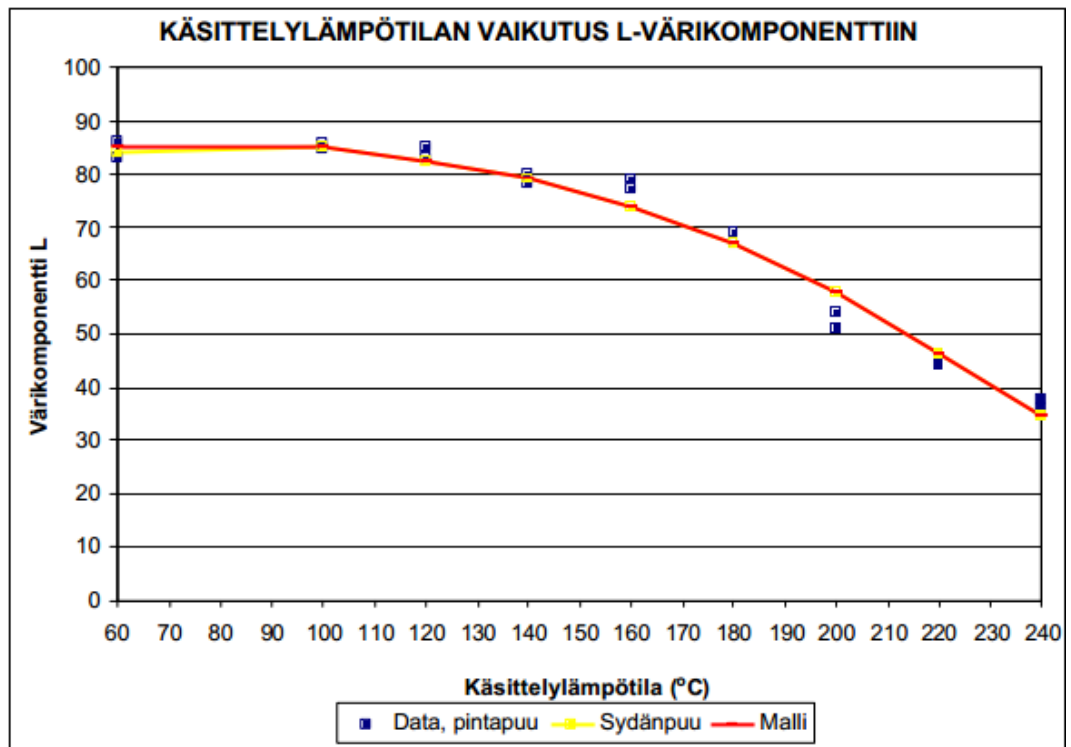
7.5 Iskulujuus

Kuvioista 42 ja 43 havaitaan, että iskulujuus korreloi selkeästi värin kanssa. Tuloksista voidaan todeta, että mitä vaaleampaa lämpökäsitelty puu on, sitä suurempi on iskulujuus. Pinta- ja sydänlapetta vertailtaessa eroa ei juurikaan ole, pintalappeella korrelointi on hieman vahvempaa. Mänty korreloi huomattavasti voimakkaammin kuin kuusi. Männyllä yli 90 % iskulujuuden vaihtelusta voidaan selittää L^* -värikomponentin vaihtelulla. Taulukosta 10 havaitaan, että iskulujuus on yleisesti pienempi suuremmissa lämpötiloissa ja pidemmällä pitoajoilla.

Taulukosta havaitaan myös, että uunikuivatut referenssikappaleet ovat iskulujuudeltaan huomattavasti suurempia kuin käsitellyt kappaleet.

7.6 Vertailua muihin tutkimustuloksiin

Puun lämpökäsittely tummentaa puuta eli pienentää L*-värikomponenttia. Puu on sitä tummempaa, mitä korkeammassa lämpötilassa sitä on käsitelty ja mitä pidempi on lämpökäsittelyvaiheen aika. Lämpökäsittelylämpötilaa nostettaessa saadaan väri tummenemaan voimakkaammin kuin pitoaikaa nostamalla. Kuviosta 43 havaitaan, että tässä työssä päädyttiin melko samankaltaiseen lopputulokseen ja arvojen suuruusluokkaan VTT:n tutkimuksien kanssa männyn osalta.



KUVIO 43. Käsittelylämpötilan vaikutus L*-värikomponenttiin (mänty, 3h)
(Lähde: VTT)

Taulukosta 10 havaitaan, että tämän työn tutkimustuloksista käsittely D1 (212 °C, 1 h) vastaa parhaiten lämpöpuuyhdistyksen tutkimustuloksia. Käsittelyn D3 (212

°C, 3 h) arvot ovat jo selkeästi erilaisia varsinkin L*-komponentin osalta (ero 3-4 yksikköä), vaikka käsittely on perinteinen thermo D -käsittely. Tämän työn tuloksissa on kuitenkin vähemmän hajontaa havaittavissa, varsinkin kuusen hajonta on puolet pienempää kuin lämpöpuuyhdistyksen tutkimuksissa.

TAULUKKO 10. Lämpöpuuyhdistyksen laaduntarkastusmittausten värinmittausten keskiarvoja vuosilta 2007-2012. Thermo D (212 °C, 2-3 h), mitattu höylätyltä pintapuolelta, mitat 32-38 mm, otoskoot: mänty 139 kpl, kuusi 152 kpl.

Puulaji	Mänty			Kuusi		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Keskiarvo	49,1	9,7	21,7	50,0	9,1	21,3
Hajonta	1,8	0,5	1,1	3,0	0,6	1,3
Minimi	44,6	8,6	19,2	41,5	8,1	15,0
Maksimi	53,6	10,7	24,8	57,8	10,8	24,0

Hajonnat ovat myös yksi vaikuttava tekijä tuloksissa. Tuloksista havaitaan, että suurinta hajonta näyttää olevan L*-komponentissa, keskiarvoiltaan 1,4-2,1 yksikköä. Tuloksista käy ilmi, että hajonta on suurinta pienissä lämpötiloissa ja lyhyimmillä pitoajoilla vastoin kirjallisuudesta saatuja arvoja, jossa hajonta kasvaa lämpötilan suurentuessa ja ajan pidentyessä. Punaisuus (a*) käyttäytyy samalla tavalla, keskiarvo hajontojen ollessa 0,2-0,4 yksikköä. Keltaisuuden (b*) hajonnat (keskiarvo hajonnat 0,5-0,9) taas suurenevat lämpötiloissa ja pitkissä pitoajoissa.

8 YHTEENVETO

8.1 Värimittaus

Puun lämpökäsittely tummentaa puuta eli pienentää L^* -värikomponenttia. Puu on sitä tummempaa, mitä korkeammassa lämpötilassa sitä on käsitelty ja mitä pidempi on lämpökäsittelyvaiheen aika. Lämpökäsittelylämpötilaa nostettaessa saadaan väri tummenemaan voimakkaammin kuin pitoaikaa nostamalla, sillä korkeissa lämpötiloissa puun rakenneaineiden väliset kemialliset reaktiot korostuvat. L^* -värikomponentin hajonta on suurinta pienissä lämpötiloissa ja lyhyillä lämpökäsittelyvaiheen pitoajoilla.

Tuloksista voidaan yleisesti todeta, että punaisuus (a^*) ei juurikaan muutu, kun pitoaikaa pidennetään. Lämpötilaa nostettaessa punaisuus (a^*) kasvaa hieman. Tämä voi johtua esimerkiksi fenolien muutoksista. Keltaisuus (b^*) pienenee melko voimakkaasti lämpötilan ja pitoajan noustessa. Tämä voi johtua esimerkiksi puun keltaisuuden aiheuttaman ligniinin hajoamisesta lämpökäsittelyssä tai uuteaineiden lisääntymisestä puussa hemiselluloosien hajoamistuotteena.

Sydänlappen väri on vaaleampaa kuin pintalappen väri kaikissa käsittelylämpötiloissa ja pitoajoilla. Ero voi johtua pintapuun suuremmista ligniini- ja uuteainepitoisuuksista. Ero voi johtua myös pintalappeella syykuvioista, vuosirenkaa syykulmista sekä kesä- ja kevätpuun välisestä suhteesta. Pintalape voi olla mahdollisesti myös tiheämpää, koska se on tummempaa. Sydänlappen värimuutokset ovat eri puulajien ja laatujen välillä tasaisempia kuin pintalappeella. Kokonaisvärinmuutoksissa pintalappen muutokset olivat yleisesti hieman suurempia, mutta tuloksista käy ilmi, että sydänlappen värimuutokset ovat voimakkaampia suuremmissa lämpötiloissa ja pidemmällä pitoajoilla.

Tuloksista havaitaan, että optimi- ja lankeavien laatujen käyttäytymisessä oli selkeää eroa. Kummankin puulajin hyvälaatuiset optimilaadut olivat tummempia kuin huonompilaatuiset lankeavat laadut. Tämä voi johtua mahdollisesti puiden kasvutiheydestä aiheutuvista eroista ja optimilaadun puuaineen tiheydestä

sekä puulajikohtaisista tiheysvaihteluista. Tuloksiin voi vaikuttaa myös sahattujen tukkien rungon ikä, koko, kasvunopeus sekä oksamäärä, oksakulmat ja oksapaksuudet. Oksien lisäksi lankeavan laadun kappaleissa on enemmän puun muita vikoja ja vaurioita (vinosyisyys, lyly, pihkakolot, kaarnarosot, kaarnakorot, latvamurtuma, muotoviat, ym.), jotka osaltaan voivat vaikuttaa värieroihin. Mainitut syyt voivat olla syynä varsinkin lankeavan laadun muista poikkeavaan käyttäytymiseen tutkimuksessa. Tuloksista havaitaan, että värin avulla on joissain määrin mahdollista arvioida puun laatua, jos tiedetään lämpökäsittelyn parametrit.

Edellä pohdittujen syiden lisäksi puun lopulliseen väriin vaikuttaa puun kasvupaikka maastossa ja lämpövyöhykkeillä. Etelässä esimerkiksi tummemman kesäpuun osuus voi olla pohjoisessa kasvavaa puuta suurempi. Kuivaus- ja lämpökäsittelyprosessissa tapahtuvat rakenteelliset muutokset ja käytettävät menetelmät vaikuttavat väriin. Värivikoja voitaisiin minimoida luonnollisella kuivausmenetelmällä. Menetelmä kuitenkin haittaa puun taloudellista hyödyntämistä, koska kuivaus voi kestää muutamasta kuukaudesta pariin vuoteen. Lähtökosteus vaikuttaa luonnollisesti väriin, sillä tällöin lämpökäsittelyprosessi pitkittyy, jolloin puusta tulee tummempaa. Myös varastointiaika ja -olosuhteet sekä mahdolliset bakteerit vaikuttavat väriin.

8.2 Iskulujuus

Iskulujuustuloksia vertailtaessa vastaaviin L*-värikomponentteihin käy ilmi, että tummempi puu on iskulujuudeltaan heikompaa. Lämpökäsittely heikentää puun iskulujuusominaisuuksia selkeästi ja se voidaan todeta myös värin perusteella tässä tutkimuksessa männyn tapauksessa noin 90 %:n varmuudella ja kuusen tapauksessa noin 50 %:n varmuudella. Kuusen heikompi korrelointi voidaan osittain selittää suuremmilla hajonnoilla. Varsinkin optimi kuusen tapauksessa hajonnat ovat selkeästi suurempia. Optimilaatujen iskulujuus on lankeavia laatuja suurempi. Tämä voidaan selittää lankeavan laadun heikommalla laadulla (mm. oksaisuus ja viat). Tutkimuksen pieni otoskoko (10 kpl/laatu) ja monet poikkeavat arvot vaikuttavat kuitenkin tulosten luotettavuuteen.

8.3 Tavoitteet ja niiden toteutuminen

Tämän opinnäytetyön ensimmäisenä tavoitteena oli lämpökäsittellä männyn ja kuusen eri dimensioita ja laatuja lämpökäsittelyprosessin eri parametreilla. Seuraavana tavoitteena oli mitata 32 mm:n dimension kappaleista värit ja analysoida tuloksia keskenään. Kolmantena tavoitteena oli tutkia vastaavien iskulujuuksien korrelointia värinmittauksen L*-värikomponenttien kanssa. Tutkimuksen avustamiseksi ja kokonaisuuden ymmärtämiseksi opinnäytetyön tekijä osallistui vielä koemateriaalin valmisteluihin. Työn kaikki tavoitteet saavutettiin ongelmista huolimatta, mutta kuitenkin jonkin verran projektin aikataulusta myöhässä. Opinnäytetyön aihe oli mielenkiintoinen, mutta osoittautui melko työlääksi. Projekti opetti valtavasti puun lämpökäsittelystä, kuten lämpökäsittelyprosessista, ominaisuuksista, työstettävyydestä ja laadunvalvonnasta. Projekti opetti myös vuoden kestävän, suuren kokoluokan tieteellisen tutkimusprojektin eri vaiheita, projektinhallintaa ja ryhmätyöskentelyä sekä tutustutti opinnäytetyön tekijän uusiin ihmisiin, tilanteisiin, työmatkoihin ja eri työskely-ympäristöihin eri kaupungeissa. Opinnäytetyön kirjoittamisessa oppi luonnollisesti suunnittelutyötä, ajankäyttöä, neuvottelutaitoa sekä tiedon keruuta eri lähteistä ja Microsoft ohjelmien hallintaa.

Tutkimuksessa saatiin hyödyllistä tietoa suomalaisten dimensioltaan 32 mm:n havupuiden eri laatuja ja lappeiden värien käyttäytymisestä keskenään ja eri lämpökäsittelyprosessin parametreilla sekä L*-värikomponentin vaikutuksista iskulujuuteen. Tulokset vahvistivat myös yleisesti muita tutkimustuloksia, vaikka joitain poikkeuksia olikin. Käytännön lämpökäsittelyt vahvistivat aikapohjaisen lämpökäsittelymenetelmän toimivuuden ja ohjelman luotettavuuden. Mittavia tutkimustuloksia ja käytännön kokemuksia voidaan hyödyntää teollisuudessa, laadun tarkkailussa, opetuksessa sekä jatkotutkimuksissa.

8.4 Kehitysehdotukset

Tämä opinnäytetyö on vain pieni osa laajaa lämpöpuuyhdistys ry:n tutkimusprojektia. Aiheesta on mahdollista ja aiheellista suorittaa jatkotutkimuksia värinmittauksen ja iskulujuusmittauksen taholta. Lisätutkimuksia voisi tehdä värinmittausten keskihajonnoista, jolloin saadaan lisätietoa puun värin tasaisuudesta lämpökäsittelyn eri lämpökäsittelyvaiheen lämpötiloissa ja pitoajoissa. Kosteudet vaikuttavat myös olennaisesti puun lopulliseen väriin, joten lisätutkimukset koekappaleiden lähtö- ja loppukosteuksien merkityksistä puun lopulliseen väriin olisivat hyödyllisiä. Tutkimustuloksista löytyvät myös kattavat tiheysarvot, joista voidaan tehdä lisätutkimuksia niiden vaikutuksista puun väriin.

Sydänlappen L*-väriarvon käyttämistä voidaan harkita käytettäväksi laadunvalvonnassa. Kyseiset arvot mahtuvat helposti L*-värikomponentin laadunvalvonta asteikkoon, joka havupuilla thermo S -käsittelyssä on 58-68 ja thermo D -käsittelyssä 42-55. Lisäksi sydänlappen värimuutokset ovat eri puulajien ja laatuojen välillä tasaisempia kuin pintalappeella. Tämän tutkimuksen puitteissa laadunvalvonta-asteikkoa voisi jopa kaventaa, sillä tulokset ovat melko tasaisia, vaikka tutkimus sisältää erilaatuista sahatavaraa: L*-arvot thermo D -käsittelyssä (D3) pintalappeella ovat 44,5-47,5 ja sydänlapeella 48,5-50,3. L*-arvot thermo S -käsittelyssä (D4) pintalappeella ovat 58-60,7 ja sydänlapeella 60,3-63,8.

Lämpökäsittelykuormien ladontavaiheessa kappaleet ladottiin vaihtelevasti tyvi- ja latvapäädyn mukaan. Mielenkiintoinen tieto olisi, miten lämpökäsittely vaikuttaa kumpaakin päähän. Tarkkojen ladontakaavioiden avulla on mahdollista myös selvittää, kuinka lämpökäsittely vaikuttaa kappaleiden väriin kuorman eri kohdissa.

Tässä työssä käsiteltiin vain 32 mm:n dimension koekappaleita, joten aiheellista on tehdä samankaltaisia tutkimuksia myös muista 50 mm:n ja 25 mm:n dimensioiden koekappaleista. Kaikkien dimensioiden vertailun avulla saadaan lisätietoa, miten puun eri mitat lämpökäsittelyssä vaikuttavat väriin ja iskulujuuteen.

Iskuluuden ja värin suhdetta tutkittiin tässä työssä vain pintalappeen ja sydänlappen L^* -arvon osalta. Mielenkiintoista olisi tehdä tutkimus myös punaisuuden (a^*) ja keltaisuuden (b^*) osalta kummaltakin lappeelta. Erikseen voisi tutkia vielä korrelointia lämpökäsittelykohtaisesti sekä muiden dimensioiden osalta.

Lämpökäsittelylaitteiston ja tilan parantamiseksi on mahdollista tehdä erinäisiä toimenpiteitä. Höyrykehittimen teho on liian pieni verrattuna lämpökäsittelylaitteiston tarpeeseen. Käytännössä korkein käytettävä höyrymäärä on 60 %, jolloin paineet eivät putoa liian alas. Nykyisellä laitteella kuitenkin pystytään toimimaan kohtuullisesti, joten uuden hankkiminen ei ole välttämättömyys. Märkälämpötilan mitta-anturin kamarin puoleinen luukku jää auki käsittelyssä, jolloin anturin kostea kangas (märkäsukka) palaa anturiin kiinni. Tämä johtuu Wintek 2000 -ohjelmassa olevasta bugista, jota voi suositella korjattavaksi. Sähkökaapissa sijatsevassa paineen häiriövalossa on vikaa. Valo palaa usein, vaikka ongelmia ei olisikaan, joten korjausta voidaan suositella. Kamarin sähkölukko ei toimi kunnolla, ja se jää usein jumiin, jolloin lukkoa ei saa auki ennen käsittelyn lopettamista. Anturit eivät välillä toimi. Suositeltavaa on tarkistaa ne ennen käsittelyä ja käsitellä niitä varoen. Kamarin vaunun liikuttaminen raiteilla on työlästä, varsinkin jos raiteet ovat pihkassa.

Hallin tilassa on myös kehitettävää, jos tilaa käytettäisiin useammin vastaavien lämpökäsittelyerien suorittamiseen. Talvella lämpökäsittelyä vaikeuttaa pakkanen, joka jäädyttää putket, sillä halli on talvella kylmä seinäeristysten puuttuessa. Valvontatilassa on varsinkin lämpökäsittelyvaiheen paikkeilla todella kuuma ja katkuinen ilma. Parempaa ilmastointia on syytä suositella, sillä kyseisessä tilassa voi joutua olemaan kauan käsittelyä seuratessa. Hallin sisällä kulkevat raiteet vaikeuttavat kuormien liikuttamista pumppukärryillä.

Projektin suorittamisessa oli ongelmia, joihin on syytä kiinnittää huomiota tulevaisuudessa. Tukkien tilaus ei onnistunut toivotulla tavalla, sillä monista koekappaleista tuli alkuperäisen suunnitelman vastaisesti liian lyhyitä tai vajaasärmäisiä. Myös paksuusmitoissa oli vaihtelevuutta. Nämä vialliset kappaleet oli korvattava saman tukin varakappaleilla, mikä aiheutti paljon ylimääräistä työtä. Koekappaleet pitäisi alusta asti pitää järkevässä järjestyksessä. Tässä

projektissa aikaa meni runsaasti oikeiden kappaleiden etsimiseen ja lajitteluun. Myös kappaleiden varastoinneissa ja tasaannutuksissa oli ongelmia tilanpuutteen takia. Projektisuunnitelman, ajankäytön ja kustannusten arvioinnissa vaaditaan tarkkuutta, mutta niitä on näin laajoissa tutkimuksissa kuitenkin hyvin vaikeaa arvioida etukäteen.

LÄHTEET

Aavakallio, T. 2012. Henkilökohtaisia tiedonantoja.

Aguilar-Tovar, D., Moya, R., Tenorio, C. 2009. Wood color variation in undried and kiln-dried plantation –grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. [viitattu 9.10.2012]. Saatavissa: <http://www.scielo.cl/pdf/maderas/v11n3/art04.pdf>

Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art 2002 [viitattu 2.10.2012]. Saatavissa: <http://www.thermotreatedwood.com/Researches/heatreatmenteurope.pdf>

Hunterlab. 2008. CIE L*a*b* Color Scale [viitattu 9.10.2012]. Saatavissa: http://www.hunterlab.com/appnotes/an07_96a.pdf

Hyvä tietää kestopuusta –esite. 2011. [viitattu 25.4.2011]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/tee-se-itse/ohjeita-omatoimirakentajille/hyva-tietaa-kestopuusta/hyva-tietaa-kestopuusta-web.pdf>

Hyvä tietää lämpöpuusta-esite 2005 [viitattu 13.12.2011]. Saatavissa: http://www.thermowood.fi/data.php/201005/019560201005261146_ThermoFiNET.pdf

Inspecta. 2012. Tuotesertifiointi lämpökäsitelty puutavara (TR 31 2007-06-06).

Jartek. 2011. ThermoWood-lämpökäsittelylaitteet [viitattu 9.12.2011]. Saatavissa: http://www.jartek.fi/web/files/jartek_konserniesite.pdf

JISC Digital Media. 2012. Colour Theory: Understanding and Modelling Colour [viitattu 9.10.2012]. Saatavissa: <http://www.jiscdigitalmedia.ac.uk/stillimages/advice/colour-theory-understanding-and-modelling-colour/>

Johansson, D. 2008. Heat Treatment of Solid Wood: Effects on Absorption, Strength and Colour. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology [viitattu

9.10.2012]. Saatavissa: <http://epubl.ltu.se/1402-1544/2008/53/LTU-DT-0853-SE.pdf>

Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Metsälehti.

Lunawood. 2011. Luna-ThermoWood. [viitattu 13.12.2011]. Saatavissa: http://www.lunawood.fi/_downloads/lunawood_luna_thermowood.pdf

Lämpöpuuyhdistys Ry. 2011. [viitattu 12.12.2011] Saatavissa: <http://www.thermowood.fi/index.php?anonymous=thermofin>

Metsäteollisuuden tietopalvelu. 2006. Lämpökäsittelyllä puuhun uusia ominaisuuksia. [viitattu: 7.12.2011]. Saatavissa: <http://www.metsateollisuus.fi/juurinyt2/Uutiset/Sivut/Lampokasittelyllapuuhunuu siaominaisuuksia.aspx>

Minolta Chroma Meter CR-210. 1988. Käyttöohje.

Mäkelä, K. 2001. Lämpökäsitelty puu haastaa kyllästetyn puun. Nettiradio YLE Mikaeli. [viitattu 25.4.2011]. Saatavissa: <http://nettiradiomikaeli.internetix.fi/mikaeli/arkisto/maaseutu/puumarkkina/index.htm>

Möller, K. & Otranen, L. Puun Lämpökäsittely. 1999. Ympäristötekniikan instituutti. Mikkeli.

Pro puu ry. 2011. Kuumakuivaamo. [viitattu 12.12.2011]. Saatavissa: <http://www.puuproffa.fi/arkisto/kuumakuivaamo.php>

Puumerkki. 2011. ThermoWood pintakäsittelykäsikirja. [viitattu 15.4.2012]. Saatavissa: http://www.puumerkki.fi/files/104/ThermoWood_Pintakasittelykasikirja.pdf

Rakenna oikein, rakentajan ja remontoijan käsikirja. 2009. Puun lämpökäsittely. [viitattu 2.10.2012]. Saatavissa: <http://www.rakennaoinkein.fi/fi/artikkelit/puun-%C3%A4mp%C3%B6k%C3%A4sittely>

Sallinen V. 2011. Puun lämpökäsittelyn eri lämpökäsittelytasojen ja puun alkukosteuden vaikutukset värin tasaisuuteen puuaineksessa. Kandidaatin työ ja seminaari. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [viitattu 9.10.2012]. Saatavissa: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/66228/kandidaatinty%C3%B6_ville_sallinen.pdf?sequence=1

Salmi, M. LAMK kuivausmenetelmät-luentomateriaali 2011 [viitattu 9.12.2011]
Saatavissa: <http://reppu.lamk.fi/file.php/2515/Mikon/Kuivaamot03122007.pdf>

Sundqvist, B. 2004. Colour Changes and Acid Formation in Wood During Heating. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology. [viitattu 9.10.2012].
Saatavissa: <http://epubl.luth.se/1402-1544/2004/10/LTU-DT-0410-SE.pdf>

Suomen Lämpöpuu. 2011. [viitattu 7.12.2011]. Saatavissa:
<http://www.suomenlampopuu.fi/@Bin/126883/SLP+lyhyesti-fin.pdf.pdf/>

TekmaWood Oy. 2002. Lämpökäsittelylaitoksen käyttöohje.

ThermoWood-käsikirja. 2003. Lämpöpuuyhdistys ry.

Vaarin puutavara. 2002. Piharakentaminen. [viitattu 31.10.2012]. Saatavissa:
http://www.vaarinpuutavara.fi/tuotteet_piharakentaminen.html

Viitaniemi, P., Jämsä, S. 1996. VTT:n julkaisuja: Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. [viitattu 9.12.2011]. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1996/J814.pdf>

LIITTEET

LIITE 1. ThermoWood-käsikirja 2003, 3-2

Taulukko 1-2. Lämpökäsiteltävän mäntysahatavaran laatuvaatimukset

LAATU		A+B furniture
OKSAT ⁽¹⁾ huonoimmalla 2 m osuudella		kpl
terveet/kuivat	Lappeella	8/2
	Syrjällä	4/1
kuorioksat		ei sallita
oksan reikä tai irto-oksa		ei sallita
Terveen oksan suurin läpimitta lappeella		oksan läpimitta, mm
Dimensio	16, 19, 22, 25 * 75, 100, 115	35
	125, 150	55
	175, 200, 225	55
	32, 38, * 75, 100, 115	55
	125, 150	55
	175, 200, 225	60
	44, 50, *75, 100, 115	60
	125, 150	60
	175, 200, 225	70
	63, 75, * 75, 100, 115	60
	125, 150	60
	175, 200, 225	65
Terveen oksan suurin läpimitta syrjällä		oksan läpimitta, mm
Sahatavaran paksuus, mm	16,19	= paksuus
	22, 25	22
	32, 38	30
	44, 50	40
	63, 75	50
Muut oksat		Läpimitta enintään % ter- veen oksan mitasta
Kiinnipysyvät oksat laadussa A ja B		
Oksaryhmän oksa ⁽²⁾		70
Kuiva oksa ⁽³⁾		20
Kuorioksa ⁽⁴⁾		Ei sallita
Laho-oksa		Ei sallita
Muut viat		
Latvamurtuma		Max. 20% leveydestä
Ydin juova		Sallitaan
1	Oksakoon ollessa taulukkoarvoa pienempi, sallitaan suurempi lukumäärä oksia. Taulukon oksakokojen yhteissumma mm:ssä (= oksien lukumäärä * läpimitta) ei minkään oksatyy- pin osalta saa kuitenkaan ylittää.	
2	Oksaryhmään kuuluu vähintään 4 kpl yli 12 mm:n suuruista oksaa, jotka sijaitsevat kap- paleen samalla 150 mm pituisella osuudella pintalappeella ja syrjällä. Mikäli oksia ei erota toisistaan selvä puunsyymuodostelma, luetaan ne yhdeksi oksaksi ja mitataan sen mu- kaisesti.	
3	Oksan ollessa irti ympäröivästä puuaineesta enintään 1/4 osuudelta, se luokitellaan ter- veeksi.	
4	Oksan ollessa enintään ¼ osuudelta kuoren ympäröimä, se luokitellaan kuivaksi oksaksi.	

LIITE 2. ThermoWood-käsikirja 2003, 4-2

Taulukko 2-2. Lämpökäsiteltävän kuusisahatavaran laatuvaatimukset

LAATU		ST 1-5
OKSAT ¹ huonoimmalla 2 m osuudella		kpl
terveet/kuivat	Lappeella	8/2
	Syrjällä	4/1
kuorioksat		ei sallita
oksan reikä tai irto-oksa		ei sallita
Terveen oksan suurin läpimitta lappeella		oksan läpimitta, mm
Dimensio	16, 19, 22, 25 * 75, 100, 115	35
	125, 150	40
	175, 200, 225	45
	32, 38, * 75, 100, 115	40
	125, 150	45
	175, 200, 225	50
	44, 50, *75, 100, 115	45
	125, 150	50
	175, 200, 225	55
	63, 75, * 75, 100, 115	50
	125, 150	55
	175, 200, 225	60
Terveen oksan suurin läpimitta syrjällä		oksan läpimitta, mm
Sahatavaran paksuus, mm	16,19	=paksuus
	22, 25	22
	32, 38	30
	44, 50	40
	63, 75	50
Muut oksat		Läpimitta enintään % terveen oksan mitasta
Kiinnipysyvät oksat laadussa A ja B		
Oksaryhmän oksa ²		Oksasumma ei saa ylittyä
		20
Kuiva oksa ³		Ei sallita
Kuorioksa ⁴		Ei sallita
Laho-oksa		
Muut viat		
Latvamurtuma		Max. 20% leveydestä
Ydin juova		Sallitaan
1	Oksakoon ollessa taulukkoarvoa pienempi, sallitaan suurempi lukumäärä oksia. Taulukon oksakokojen yhteissumma mm:ssä (= oksien lukumäärä * läpimitta) ei minkään oksatyyppin osalta saa kuitenkaan ylittää.	
2	Oksaryhmään kuuluu vähintään 4 kpl yli 12 mm:n suuruista oksaa, jotka sijaitsevat kapaleen samalla 150 mm pituisella osuudella pintalappeella ja syrjällä. Mikäli oksia ei erota toisistaan selvä puunsyymuodostelma, luetaan ne yhdeksi oksaksi ja mitataan sen mukaisesti.	
3	Oksan ollessa irti ympäröivästä puuaineesta enintään 1/4 osuudelta, se luokitellaan terveeksi.	
4	Oksan ollessa enintään ¼ osuudelta kuoren ympäröimä, se luokitellaan kuivaksi oksaksi.	

LIITE 3. ThermoWood-käsikirja 2003, 5-2

Taulukko 3-2. Lämpökäsiteltävän lehtipuusahatavaran laatuvaatimukset

LAATUVAATIMUKSET (koskevat kaikkea lämpökäsiteltävää lehtipuusahatavaraa)		
	E-LAATU	A-LAATU
	Määritelmä: 4-sivun oksaton, täysin virheetön pintasahe	Määritelmä: 3-sivun oksaton pintasahe
Minimimitat toimituskosteudessa (n. 18 %)		
Leveys	nimellismitta + 6 %, muutaman mm:n ylitys sallitaan	
Paksuus	nimellismitta + 3 %, muutaman mm:n ylitys sallitaan	
Repeämät / halkeamat	ei sallita	
Vajaakantisuus	ei sallita	
Sivukäyryys	= 8 mm / 3 m	
Lapeväyryys	= 15 mm / 3 m	
Kierous	= 10 mm / 3 m	
Kosteus	< 20 %, tasainen koko erässä	
Sinistymä	ei sallita	
Toimituspituus	> 2 100 mm, erikseen sovittaessa lyhyempi	
Paketointi	pituuksien mukaan, 100 mm:n jaolla	
Sydänpuu	Tumma tai vaalea	ei sallita
Kuivauksen aiheuttamat värivirheet	ei sallita	
Sahausajankohdan tai varastoinnin aiheuttamat värivirheet	ei sallita	
Tasainen värivirhe	sopimuksen mukaan	
Puulajikohtaisia laatuohjeita	Koivu Loimua ja mineraalipilkkuja sallitaan.	Koivu Takalappeella sallitaan kaksi kpl terveitä oksia halkaisija max. 10 mm tai yksi kuollut oksa halkaisija max 10 mm / sahatavarametri. Harmaata sydänpuuta sallitaan yksittäisissä sahatavarakappaleidissa max. 20 mm:n leveydellä puolen metrin matkalla. Haapa Takalappeella sallitaan muutamia pinnallisia oksia ja värivirheitä yksittäisissä sahatavarakappaleissa.
	Haapa Ei sallita vesiharmaata tai solun luhistumaa	