

Tuulia Virkkunen

LÄMPÖKÄSITEELLYN KUUSEN
TAIVUTUSLUJUUDEN VERTAILU
KAHDELLA ERI MENETELMÄLLÄ

Opinnäytetyö
Puutekniikka


Toukokuu 2010




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

 MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkelin University of Applied Sciences	Opinnäytetyön päivämäärä 7.5.2010
Tekijä(t) Virkkunen Tuulia	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Puutekniikka
Nimeke Lämpökäsittelyn kuusen taivutuslujuuden vertailu kahdella eri menetelmällä	
<p>Tehtävän toimeksiantaja oli Mikkelin ammattikorkeakoulu Oy /YTI – palvelut. Tutkimus liittyi myös Petteri Torniaisen tutkimuksiin SLU: ssa (Svenska Lantsbruk Universitet ja LTU:ssa (Luleå Tekniska Universitet). Tehtävänä työssä oli määrittää lämpökäsittelyn kuusen taivutuslujuutta. Yli 200 °C:n käsittelylämpötiloissa saadaan puun sään – ja lahonkestoja parannettua olennaisesti.</p> <p>Tehtävässä verrataan kahta eri lämpökäsittelymenetelmää. ThermoWood – lämpökäsittelyä käytetään tässä tehtävässä toisena käsittelynä ja WTT – lämpökäsittelyä toisena. Käsittelylämpötilat ovat ThermoWoodissa 212 °C ja WTT:ssä 170 °C. WTT – lämpökäsittely on varsin uusi keksintö. Sitä on kehitelty Tanskassa viime vuosina.</p> <p>Tutkimuksessa käytettiin kahta eri kuusierää. Tammikuussa WTT – käsitelty kuusimateriaali noudettiin Ruotsista helmikuussa 2010. Erässä oli mukana myös vastaavat vertailukappaleet. WTT – käsittely ylipaineessa (alipaineistettu) teräksisessä paineastiassa oli suoritettu tammikuussa. ThermoWood – käsitelty sahatavara ostettiin Puukeskuksesta. Myös tässä koe-erässä oli mukana vastaavat vertailukappaleet. ThermoWood – lämpökäsittely suoritettiin maaliskuussa Mikkelin Sallonsaaressa (YTI). Lämpökäsittelyuunina oli Nardi ja uunin ohjaustekniikkana Tekma. Taivutuskappaleiden dimensiot olivat 20mm x 20mm x 400mm. Taivutustestaukset suoritettiin huhtikuussa Mikkelin ammattikorkeakoulussa. Taivutuslaitteena käytettiin Shimadzu – aineenkoestuskonetta. Testikappaleiden valmistuksessa käytettiin Mamk:n puuntyöstölaitteita. Värianalyysilaitteena oli Minolta Chroma meter CR-210. Punnituksessa käytettiin Sartorius BP 3100P(ISO 9001) – vaakaa. Dimensiokappaleiden määrittämisessä käytettiin Termaks – kuivausuunia. Kosteuksien ja tiheyksien määrittämisessä käytettiin laskukaavoja.</p> <p>Taivutustestauksessa ThermoWood – menetelmällä käsitellyt testikappaleet olivat selvästi parempia lujuudeltaan kuin WTT – käsitellyt (kimmomoduuli: 13124,6 N/mm² / 11454,6 N/mm² ja taivutuslujuus: 66,16 N/mm² / 45,64 N/mm²). Mamk:n esitutkimusraportissa keväällä 2009 (ThermoWood – käsittely:160 °C, 180 °C ja 200 °C) saatiin samankaltaisia tuloksia. Värianalyysissä tulokset olivat melko yhteneväiset, ainoastaan värin syvyys (c) oli WTT – käsitellyillä kappaleilla tummempi. Kosteudet määriteltiin kaikista tutkimuseristä. Dimensiokappaleet (20mm x 20mm x 50mm) olivat 18 tuntia kuivausuunissa. Kappaleet punnittiin ennen ja jälkeen kuivausuunikäsittelyä (103 °C). WTT – vertailukappaleiden kosteus oli 7,38 % ja vastaavat ThermoWoodi –koekappaleiden kosteus oli 9,39 %. Kuivauskäsittelyn jälkeen WTT – käsiteltyjen koekappaleiden kosteus oli 6,33 %. Vastaavat ThermoWood – koekappaleiden kosteus oli 1,97 %. Muutos WTT – koekappale-erissä oli 1,05 %. Muutos ThermoWood – koekappale-erissä oli 7,42 %. Tiheydet (märkä – ja kuivatiheys) määritettiin kaikista tutkimuseristä. Tutkimustulokset olivat kaikissa erissä melko yhteneväiset. WTT – vertailukappaleiden tuoretiheys oli 0,42 g/cm³ ja kuivatiheys oli 0,39 g/cm³. WTT – käsiteltyjen koekappaleiden tuoretiheys oli 0,42 g/cm³ ja kuivatiheys oli 0,39 g/cm³. ThermoWood – vertailukappaleiden tuoretiheys oli 0,46 g/cm³ ja kuivatiheys 0,42 g/cm³. ThermoWood – käsiteltyjen koekappaleiden tuoretiheys oli 0,42 g/cm³ ja kuivatiheys oli 0,41 g/cm³. Suurin muutos tapahtui ThermoWood – vertailukoekappaleiden tiheyksissä. Sen sijaan ThermoWood – käsiteltyjen koekappaleiden tuore – ja kuivatiheyksien muutos oli pienin. Koska kuusen lujuusominaisuudet heikkenivät olennaisesti lämpötilan ylittäessä 200 °C oli oletuksena, että WTT – käsittely (170 °C) antaisi paremmat tulokset verrattuna ThermoWood – käsittelyyn (212 °C). Tutkimuksen perusteella kannattaa edelleen käyttää ThermoWood – käsiteltyä puuta, koska kantavissa rakenteissa keskitytään puutavarassa kimmomoduuli – lukuarvoihin. Kimmomoduulien lujuussuhde ThermoWoodin eduksi oli jopa 11,65.</p>	
Asiasanat (avainsanat)	
Sivumäärä 60	Kieli suomi
URN	
Huomautus (huomautukset liitteistä) 1 4th European Conference on Wood Modification, 2009. Proceeding 2 Arviot taivutustestien koekappaleiden taipumista	
Ohjaavan opettajan nimi Aavakallio Timo	Opinnäytetyön toimeksiantaja Mikkelin ammattikorkeakoulu Oy/YTI-palvelut

DESCRIPTION

 MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences		Date of the bachelor's thesis 7.5.2010
Author(s) Virkkunen Tuulia	Degree programme and option Wood technology	
Name of the bachelor's thesis The comparison of bending strength between two different kind of heat treatment by using spruce		
Abstract <p>This Bachelor's thesis was made for Mikkeli University of Applied Sciences and The Institute for Social Research (ISR). The task was to define heat treatment for spruce and its bending strength. The purpose was to find out what kind of treatment is suitable for using spruce as supporting exterior material.</p> <p>Two different types of heat treatment methods were compared. The first method, which is ThermoWood, used the temperature of 212 °C. The other method called as WTT (Wood Treatment Technology) used 170 °C. WTT method is a quite new treatment and it has been developed in Denmark.</p> <p>There were used two different batches of spruce: with ThermoWood- and WTT treatment. From both of the batches there were taken comparison pieces that were not treated. There were total of four bending wood batches. Dimensions of each test pieces were 20mm x 20mm x 400mm. In the bending test ThermoWood pieces appeared have better durability than WTT. Colour analysis was also made from the pieces. Results were quite similar. Pieces treated with WTT were a bit darker.</p> <p>Moistures of all batches were measured. To get the moisture measures, small test pieces were kept in a drying machine. Machines inner temperature was 103 °C, and pieces were drying 18 hours. Pieces were weighted before and after the drying. The moisture difference between ThermoWood treatment and untreated was 7,42 %, and the difference with WTT was 1,05 %. Therefore WTT pieces were more homogenous. The dry and wet densities of all four batches were also defined. Results of all four batches were quite even.</p> <p>Based on results we see that lower temperatures that were used in treatment (WTT) yielded a lower bending strength.</p>		
Subject headings, (keywords)		
Pages 60	Language Finnish	URN
Remarks, notes on appendices 1 4th European Conference on Wood Modification, 2009. Proceeding 2 The estimates of the results of the bending tests		
Tutor Aavakallio Timo	Bachelor's thesis assigned by Mikkeli University of Applied Sciences and The Institute for Social Research (ISR)	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	PUUN LÄMPÖKÄSITTELY	1
2.1	Yleistä puun lämpökäsittelystä	1
2.1.1	Puuaineen rakenne	2
2.1.2	Selluloosa	4
2.1.3	Hemiselluloosa	5
2.1.4	Ligniini	6
3	PUUN LUJUUSOMINAISUUDEN MÄÄRITYS	7
4	THERMOWOODKÄSITTELY	10
4.1	Lämpöpuun valmistus	10
5	WTT-KÄSITTELY	12
6	LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUKSIA	12
6.1	Lämpökäsittelyn yleisiä ominaisuuksia	12
6.2	Lahonkesto	13
6.3	Lahonkeston luokitus	14
6.4	Lujuusominaisuus	15
6.5	Kovuus	18
6.6	Tiheys	19
6.7	Tasapainokosteus	20
6.8	Mittapysyvyys	20
6.9	Lämmönjohtavuus	21
6.10	Biologinen kestävyys ja säänkesto	21
6.11	Värisävy	21
7	LÄMPÖPUUN TUOTELUOKITUS	22
7.1	Thermo-S luokka	22
7.2	Thermo-D luokka	23
7.3	Prosessin vaikutuksista puun ominaisuuksiin Thermo – S ja Thermo – D tuoteluokittain	23
7.4	Havu- ja lehtipuusahatavaran käyttökohteet	24
8	TUTKIMUSMENETELMÄT JA MATERIAALIT	25

8.1	Lämpökäsittely Salonsaarella	26
8.2	Taivutustestauksessa käytetty standardi	27
8.3	Taivutustestauksessa käytetty laite	28
8.4	Taivutuskappaleiden valmistus	29
8.5	Värin määrittäminen	29
8.6	Kosteuden määrittäminen	30
8.7	Tiheyden määrittäminen	31
9	TUTKIMUS ERI LÄMPÖTILOISSA KÄSITELLYN KUUSEN TAIVUTUSLUJUUDESTA	31
10	TUTKIMUSTULOKSIA	34
10.1	Taivutuslujuuden testaukset	34
10.2	Pintavärianalyysi	42
10.3	Koekappaleiden kosteudet	46
10.4	Tiheydet	47
11	TULOSTEN ANALYSOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET	48
11.1	Taivutuslujuudet	48
11.2	Värianalyysi	51
11.3	Kosteudet	54
11.4	Tiheydet	55
12	POHDINTA	56
	LÄHTEET	
	LIITTEET	
	1 4th European Conference on Wood Modification, 2009. Proceeding	
	2 Arviot taivutustestien koekappaleiden taipumista	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on kahden eri tavoin lämpömodifioidun kuusen ominaisuuksien vertailu. Menetelminä käytetään ThermoWood – menetelmää, jossa lämpötilana on 212 °C ja toisena menetelmänä käytetään Heat Treatment (WTT), jossa lämpötilana on 170 °C. Työn toimeksiantajana on Mikkelin ammattikorkeakoulu Oy/YTI – palvelut (YTI). Tutkimus liittyy myös Petteri Torniaisen tutkimukseen SLU:ssa (Svenska Lantspruk Universitet) ja LTU:ssa (Luleå Tekniska Universitet).

Lämpökäsiteltyä kuusta käytetään ulkorakentamisessa esimerkiksi ulkoverhouksissa. Lämpökäsittelyssä puun lujuusominaisuudet heikkenevät jo merkittävästi yli 200 °C:ssa. Työssä selvitetään lämpökäsittelyn kuusisahatavaran taivutuslujuutta. Tavoitteena on löytää sopiva käsittelylämpötila, jotta saataisiin selville, missä lämpötilassa ja millä menetelmällä lujuusominaisuudet olisivat edullisimmat.

Olellaisia etuja ovat lahonkeston lisääntyminen ja vastaavasti kosteuselämisen väheneminen. Eri lämpötiloilla voidaan myös vaikuttaa tuotteen väriin olennaisesti. Korkeammat lämpötilat värjäävät luonnollisesti puun tummemmaksi. Lämpökäsittelyn etuna voidaan pitää myös sen ekologisuutta.

Tässä työssä käytetään pohjana esitutkimusraporttia: kuusen taivutuslujuuden muutos alle 200 °C:n lämpökäsittelyssä. Tutkimuksen suorittivat Mikkelin ammattikorkeakoulun puutekniikan opiskelijat Riina Pylvänäinen ja Tuulia Virkkunen YTI:n toimeksiannosta huhtikuussa 2009.

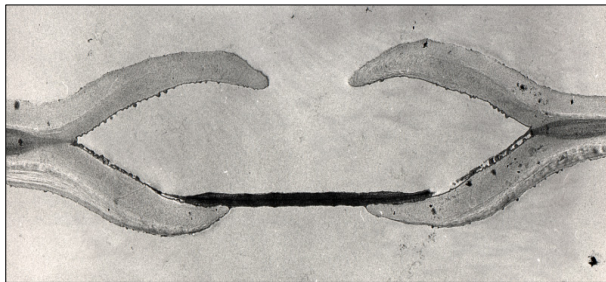
2 PUUN LÄMPÖKÄSITTELY

2.1 Yleistä puun lämpökäsittelystä

Lämpökäsittely voidaan jakaa lämminilmakuivaukseen (lämpötila < 100 °C), kuuma-kuivaukseen ja miettoon lämpökäsittelyyn (100 – 200 °C) sekä rajuun lämpökäsittelyyn (> 200 °C). Kuivauksessa puusta poistuu kosteutta. Puun lujuusominaisuudet kasvavat merkittävästi alle 30 % kosteuksissa. Puun soluissa tapahtuu kemiallista hajoamista. Lämpötilaa nostettaessa puun väri tummuu. Kosteuden poistuminen edelleen

jatkuu. Myös pihkaa alkaa poistua. Puun soluissa (hemiselluloosa) ja ligniinissä (liima-aine) tapahtuu pehmenemistä. Puussa alkaa tapahtua haurastumista ja iskusitkeyden alenemista. Yli 200 °C:n lämpötilassa puun väri jatkaa tummumista. Myös solujen sekä liima-aineiden hajoaminen kiihtyy. Puun hauraus ja painohäviö lisääntyvät, josta johtuu lahonkestävyyden parantuminen. Yli 230 °C:n lämpötiloissa puun haurastuminen on jo hyvin huomattavaa. Puun käyttökohteiden kannalta haurastumista tapahtuu jopa liikaa. (Möller ja Otranen 1999, 18.)

Rengashuokosten sulkeutumisesta johtuen (kuva 1) veden imeytyminen soluun vähenee merkittävästi. Puusolussa tila on palautumaton. Lämpöpuukäsittely perustuu tähän ilmiöön. Lämpöpuun kastuessa, sen paino ei siten kasva yhtä paljon kuin käsittelemättömän puun (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)



KUVA 1 Männyn rengashuokonen sulkeutuneena (aspiraatio)

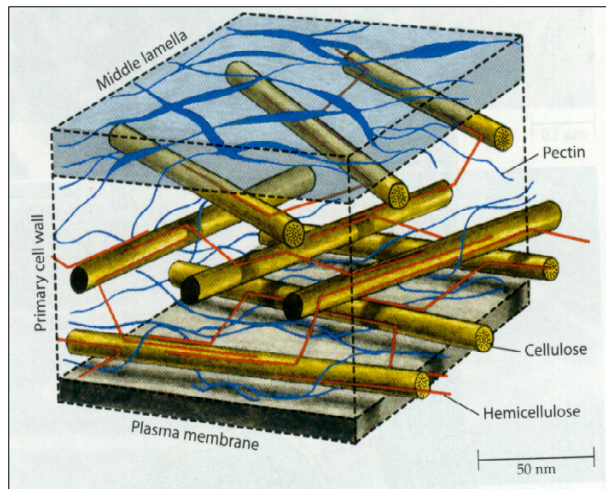
(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).

2.1.1 Puuaineen rakenne

Puun kemiallinen koostumus on monimutkainen. Sitä ei vielä täysin tunneta. Sitä on tutkittu kuitenkin runsaasti sellun, paperin ja muiden puunjalostustuotteiden valmistuksen yhteydessä. Luonnontilaisena soluseinän kemiallista koostumusta on vaikea tutkia. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)

Puusoluissa selluloosan osuus on 40 – 50 %. Hemiselluloosaa on 20 – 35 %. Pektiinistä vastaava osuus on 20 – 35 % (kuva 2). Pektiinit (mm galakturonaanit, galaktoosin ja arabinoosin polymeerit) ovat tyypillisiä keskilevyssä ja primaariseinässä. Ligniiniä puusoluissa on 15 – 35 %. Lisäksi puussa on erilaisia uuteaineita: kiteet (pii-, kaliumsuolat), hartsihapot, rasvat, kumi, flavonoidit, antosyaanit, polyfenolit, sokerit,

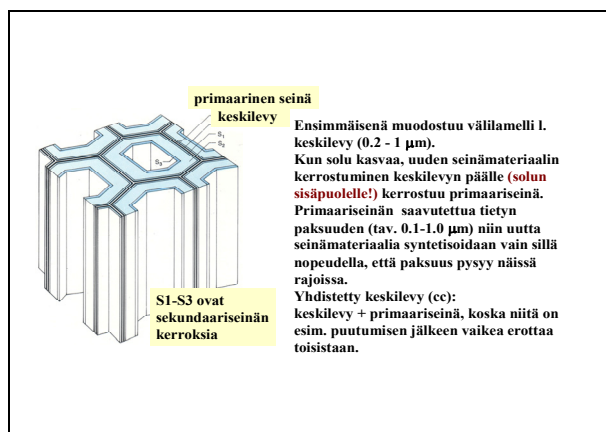
tärkkelys jne. Näiden osuus on noin 1 % pintapuussa ja 20 % sydänpuussa. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)



KUVA 2 Pektiini, selluloosa ja hemiselluloosa

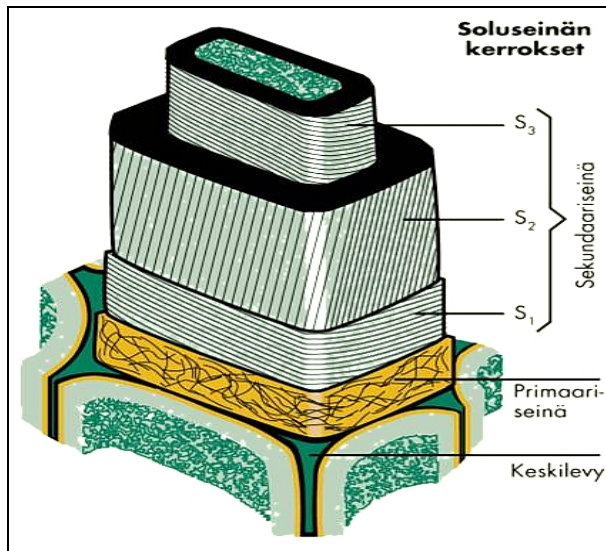
(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).

Puusolun rakentuminen esitetään kuvissa 3a) ja 3b). Puusolun muodostuminen alkaa keskilevystä. Vastaavasti viimeisenä muodostuu sekundääriseinä. Puuvartisilla kasveilla valta osa soluista on sekundääriseinäällisiä. Sen sijaan ruohovartisilla kasveilla sekundääriseinäällisiä soluja on pääasiassa tuki- ja johtosoluissa. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)



KUVA 3a) Kasvisolun seinä ja rakenne

(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).



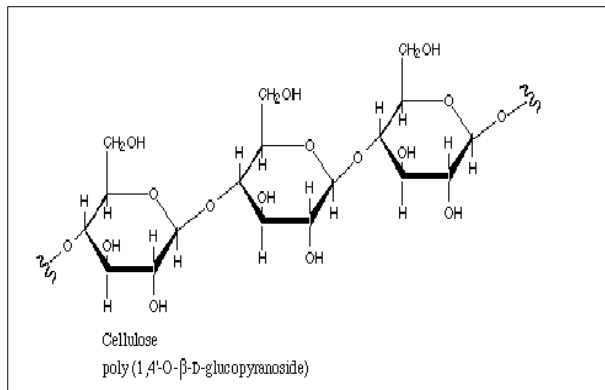
KUVA 3b) Soluseinän rakenne –sekundääriseinä

(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).

Puun kuivapainosta on jopa 95 % seinämateriaalia. Se antaa koko kasville sen lujuuden. Puun solujen ominaisuudet riippuvat soluseinän rakenteesta, sekä siitä kuinka eri kemialliset rakenneosat ovat siinä järjestäytyneet.(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede).

2.1.2 Selluloosa

Soluseinä rakentuu mm. selluloosasta (noin 40 – 50%), hemiselluloosasta, pektiinistä, ligniinistä. Näiden aineiden tuottamiseen kuluu suuri osa kasvin tuottamista hiilihydraateista. Soluseinän rakennusaineiden synteesi voi muodostaa 30 % tai enemmän solun hiilihydraattimetaboliasta. Seinissä on myös aromaattisia yhdisteitä (Chenopodiacea ei lignifioituneet soluseinät).(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.) Kuvassa 4 nähdään selluloosan kemiallinen rakenne ja sitoutuminen. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)



KUVA 4 Selluloosa

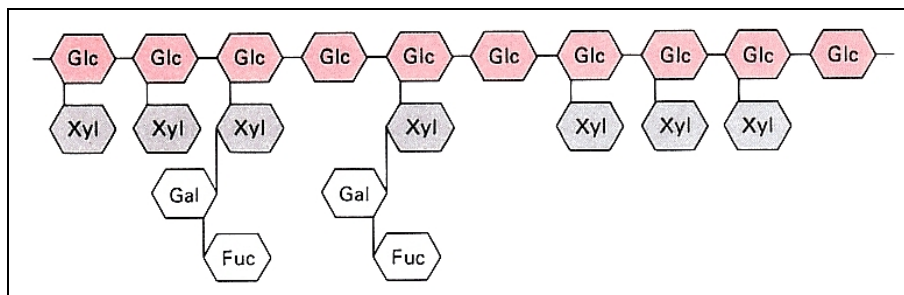
(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).

Selluloosa on maapallolla runsaimmin esiintyvä orgaaninen yhdiste. Se on hiilihydraatti ja se muodostaa 15 – 30 % primääriseinien kuivamassasta. Primääriseinissä sen osuus on jopa suurempi sekundaäriseinämässä. Selluloosa on soluissa mikrofibrilleinä, jotka muodostavat ketjuja vety-sidosten välityksellä.(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)

2.1.3 Hemiselluloosa

Hemiselluloosan prosenttiosuus on 25 – 35 % kuivapainosta eri puulajeilla. Hemiselluloosa (ksylaanit, glukomannaanit, mannaanit, ksyloglukaanit, kalloosi) voi muodostaa vetysidoksia mikrofibrillien kanssa (cross-linking glycans). Kaksisirkkaisten sekundaäriseinän yleisin hemiselluloosa on glukuroniksyylaani vastaavasti paljassiemensillä glukomannaani jne. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.) Kuvassa 5 nähdään, kuinka molekyylit ovat sitoutuneet toisiinsa.

(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)



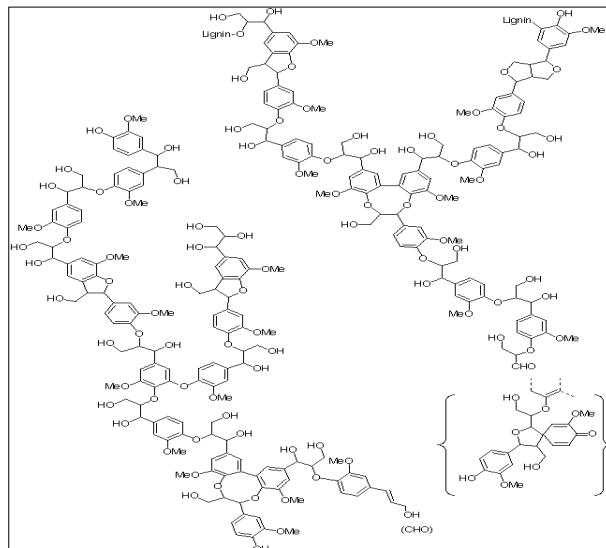
KUVA 5 Tyypillisen kukkivan kasvin soluseinän hemiselluloosamolekyylit

(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).

2.1.4 Ligniini

Ligniini on puun lujuutta lisäävä liima-aine. Se täyttää polysakkaridikuitujen välit ja liimaa kuidut toisiinsa. Sitä on kasvien puutuneissa osissa 15 – 35 % puuaineksen kuivapainosta. Havupuiden ligniiniosuus on 25 – 30 %. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)

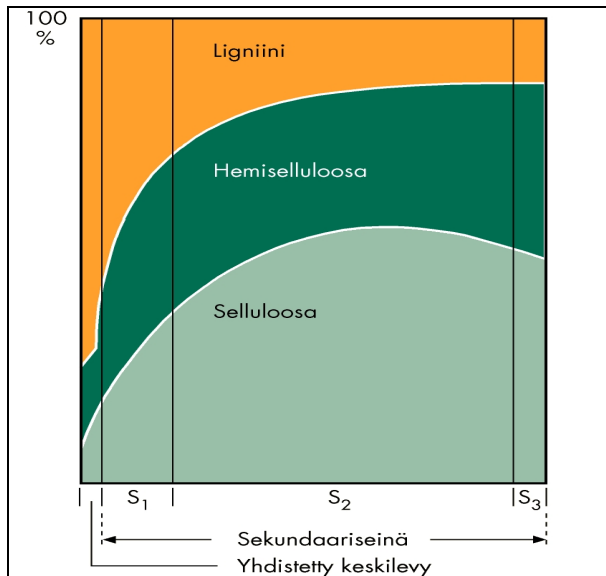
Ligniini liittyy selluloosaan hemiselluloosan välityksellä. Puun aineosista se kestää parhaiten lämpöä. Noin 150 °C:ssa ligniinissä tapahtuu jo ensimmäisiä muutoksia ja 280 – 500 °C:ssa se hajoaa (Möller ja Otranen 1999, 33.). Kuvassa 6 kuvataan havupuun ligniinin kemiallista rakennetta. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)



KUVA 6 Havupuun ligniini

(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).

Kuvassa 7 nähdään yhteenvetona puun päärakennusaineet. Selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin prosentuaaliset pinta - alakuvaajat. antavat havainnollisen käsitykset rakennusaineiden osuuksista eri soluseinäkerroksissa.



KUVA 7 Selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin pitoisuudet eri soluseinäkerroksissa

(The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.2010).

Yhteenvedona voidaan todeta, että kasvavissa soluissa selluloosa- ja hemiselluloosa-verkostot ovat vastuussa rakenteellisesta vahvuudesta. Hemiselluloosan tehtävänä on pitää mikrofibrillejä paikallaan. Huokosten kokoa kontrolloi pektiiniverkosto. Se kontrolloi myös makromolekyylien kuljetusta ja soluseinän varausta. (The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede.)

3 PUUN LUJUUSOMINAISUUDEN MÄÄRITYS

Lujuusopillisesti puusta tulee huomioida se, että sen ominaisuudet ovat erilaiset syiden, säteen ja tangentin suunnassa. Yleisesti voidaan todeta, että jännitys on suoraan verrannollinen venymään: $\sigma \approx \varepsilon$.

Jännitys lasketaan kaavasta:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Jännityksen dimensio on siis voima/pinta-ala.

$$M \frac{N}{m^2} = MPa = N / mm^2$$

(Pennala 1999, 15-16)

Jännityksen ja venymän välistä verrannollisuuskerrointa merkitään E :llä. Se on nimeltään kimmokerroin. Edelleen voidaan todeta yhteys: $\sigma = E\varepsilon$. Yhtälöä kutsutaan Hooken laiksi. Jännitys-venymäkäyrän lineaarisen osan kulmakerroin on E .
(Pennala 1999, 15-16.)

E :stä käytetään myös nimitystä kimmomoduuli. Se on erilainen puun syiden, säteen ja tangentin suuntaan. Kuitenkin vedossa, puristuksessa ja jännityksessä lukuarvot ovat samaa suuruusluokkaa. Kimmomoduuli osoittaa materiaalin jäykkyyden ja kuinka suuria taipumia palkkeihin syntyy eri kuormituksilla. Usein käytännössä puupalkkien käyttöä rajoittavat sallitut taipumat. Kimmorajaan asti muodonmuutos kappaleessa on palautuva. (Kärkkäinen 2004, 208.)

Laskukaava: $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$.

Kirjallisuusarvoja kimmokertoimille:

- mänty 12,5 GPa
- kuusi 13,4 GPa
- koivu 14,8 GPa

(Pennala 1999, 15-16)

Kuormituksen aiheuttaneet muodonmuutokset ovat suuruudeltaan tavallisesti erilaisia kappaleen eri kohdissa. Kun muodonmuutos on suurempi kuin kappaleen sisäiset vastustavat voimat, irtoavat kappaleen atomit tai molekyylit toisistaan ja kappale murtuu. Tässä kyseisessä kohdassa sanotaan kappaleen murtuvan (murtoraja). Tiivistetysti voidaan todeta, että lujuus ilmaisee sen jännityksen suuruuden, jolla kappale murtuu. (Pennala 1999, 25-26, 35.)

Kimmo- sekä murtoraja ovat jännityksiä. Vastaavasti venymät ovat kimmoisen venymä ja murtovenymä. Puuta puristettaessa käytetään mielummin venymän sijasta sanaa puristuminen. (Kärkkäinen 2004, 208.)

Laskukaavoja:

$$\text{painohäviö } \% = \frac{(m_{\text{ennen käsittelyä}} - m_{\text{käsittelyn jälkeen}}) \times 100}{m_{\text{ennen käsittelyä}}}$$

$$m = \text{massa} \quad [\text{kg}]$$

$$m_{\text{kuiva}} = \frac{100 \times m_k}{u + 100}$$

$$m_k = \text{puun paino ennen käsittelyä} [\text{kg}]$$

$$u = \text{puun kosteus} [\%]$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \text{jännitys} [N/mm^2]$$

$$F = \text{voima} [N]$$

$$A = [mm^2]$$

(Viitaniemi & Jämsä 1996, 28-29)

Taulukossa 1 on verrattu eri puulajien taivutus – ja puristuslujuuksia syiden suunnassa. Taivutuslujuudessa koivu on selkeästi mäntyä ja kuusta kestävämpää. Sen sijaan puristusvoimassa koivu ei ole kovinkaan paljoa parempi verrattuna havupuihin.

TAULUKKO 1 Taivutuslujuus ja puristuslujuus syiden suunnassa

Puulaji	Taivutuslujuus MPa	Puristuslujuus MPa
Kuusi	85,7	45,2
Mänty	85,8	47,5
Koivu	107,1	53,5
Rauduskoivu	113,9	-
Hieskoivu	104,1	-
Haapa	84,0	42,5

(Kärkkäinen 216,2004).

4 THERMOWOODKÄSITTELY

Tutkimusta puun lämpökäsittelystä on tehty jo kauan. Stamm ja Hansen Saksassa tekivät tutkimusta aiheesta 1930-luvulla. Vastaavaa tutkimusta teki Yhdysvalloissa White 1940-luvulla. Edelleen aiheen tutkimusta suorittivat saksalaiset Bavendam, Runkel ja Buro 1950-luvulla. (Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010.)

Kollman ja Schneider julkaisivat tuloksensa 1960-luvulla sekä Rusche ja Burmester 1970-luvulla. Suomessa, Ranskassa ja Alankomaissa tutkimustyötä on jatkettu 1990-luvulla. Kattavimmat ja tarkimmat tutkimukset aiheesta on tehnyt VTT Suomessa. Merkittävää tutkimustyötä on tehty myös YTI:ssä. (Puumerkki.ThermoWood – käsikirja.2010.)

VTT:n kehittämällä menetelmällä valmistetaan ThermoWoodia. Menetelmässä puumateriaali lämmitetään vähintään 180 °C:n, samalla puun suojaus tapahtuu höyryllä. Höyry vaikuttaa myös puun kemiallisiin muutoksiin. Käsittely on ympäristöystävällinen tapa suojata puuta. Muuttuvissa kosteusolosuhteissa puun käyttäytyminen on vakaampaa verrattuna käsittelemättömään puuhun. Myös lämmöneristysominaisuudet paranevat. Kun lämpötila nostetaan riittävän korkeaksi, tulee puusta myös lahonkestävää. Haittana on kuitenkin puun taivutuslujuuden heikkeneminen. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

4.1 Lämpöpuun valmistus

Lämpöpuun valmistusprosessi jaetaan kolmeen eri vaiheeseen. Puutavara käsitellään 185 – 230 °C:ssa. Valmistusprosessissa käytetään korkeaa lämpötilaa ja vesihöyryä. Siinä ei käytetä lainkaan kemikaaleja. Lämpökäsittely pienentää puun kosteuselämistä sekä parantaa puun lahon- ja säänkesto-ominaisuuksia. Korkeassa lämpötilassa poistuu myös pihkaa. Lämpöpuuyhdistys ry:n omistama EU-tavaramerkki on ThermoWood®.(Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

1. Lämpötilan nosto

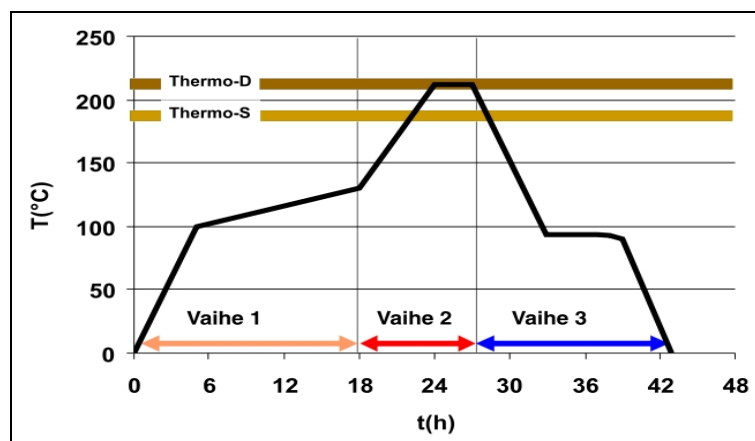
Lämpötila nostetaan nopeasti noin 100 °C:een, jonka jälkeen sitä nostetaan rauhallisemmin noin 130 °C:een. Puuraaka-aine voi olla joko tuoretta tai esikuivattua. Vesihöyry toimii suojakaasuna estämällä puun halkeilun sekä vaikuttaen puussa tapahtuviin kemiallisiin muutoksiin. Puun kosteusprosentti laskee lähes nolleen. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

2. Varsinainen lämpökäsittely

Varsinaisen lämpökäsittelyn ajaksi lämpötila on nostettu halutun käsittelyasteen mukaan 185 – 230 °C:een, minkä jälkeen se pidetään vakiona 2 – 3 tuntia. Vesihöyry toimii edelleen suojakaasuna estäen puun syttymisen sekä vaikuttaen puussa tapahtuviin kemiallisiin muutoksiin. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

3. Lämpötilan lasku ja kosteuden tasaannutus

Vesisumutuksen avulla lämpötilaa lasketaan. Puun kosteus tasaannutetaan käyttökohteen mukaan, tavallisimmin yli 4 %:n kosteuteen.(Lämpöpuu.2010). Lämpökäsittelyprosessi nähdään seuraavassa kuvassa 8.



KUVA 8 Lämpöpuun valmistusvaiheet

(Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010).

5 WTT-KÄSITTELY

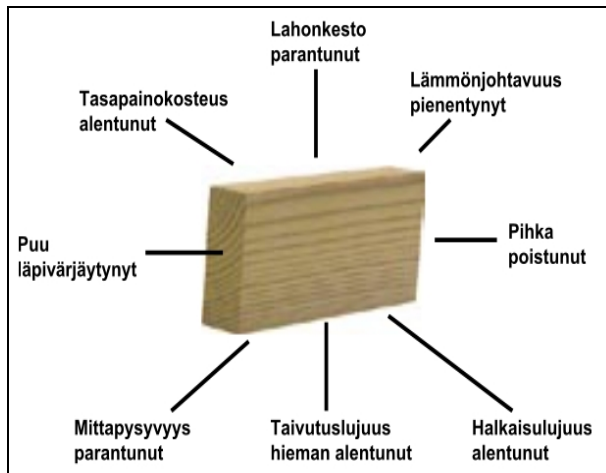
Mikkelin ammattikorkeakoulussa käydyn keskustelun perusteella keskusteltiin Petteri Torniaisen kanssa WTT-testauksesta. Freiburgissa, Saksassa on myös tutkittu lahonkesto-ominaisuuksia kyseisellä menetelmällä (julkaisuvuosi 2009, testit: ENV 807 ja EN 113). Tanskassa on kehitelty viime vuosina puun lämpökäsittelyä. Heidän toimesta on kaupallistettu uusi WTT-käsittely. Käsittelystä voidaan käyttää nimeä pressurized steam atmosphere (PS). Menetelmän kehittäjien mukaan WTT-menettelyssä 160 °C:n käsittely vastaa Thermowood luokkaa S (erityisesti havupuilla). Vastaavasti 170 °C:n käsittely vastaa Thermowood luokkaa D. Patenti (Wood Treatment technology) on tanskalaisten omistuksessa.

Prosessi suoritetaan ruostumattomasta teräksessä valmistetussa painesynterissä. Synterilin keskimääräinen täyttökapasiteetti on noin 10 m³. Käsittelyn alussa alipaine imetään pois, joka käytännössä tarkoittaa hapen poistamista olosuhteista. Käsittelyssä absoluuttinen alipaine on 0,3 baaria. Tällöin voidaan puhua alipaineesta. Lämmön noustessa annetaan paineen nousta ylipaineeksi. Käsittelyssä voidaan käyttää lämpötiloja 160 - 180 °C, jotka vastaavat kahta eri käsittelyä. Prosessi voidaan nostaa painetta aina 20 baariin asti ja lämpötilaa vastaavasti 210 °C.

6 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUKSIA

6.1 Lämpökäsittelyn yleisiä ominaisuuksia

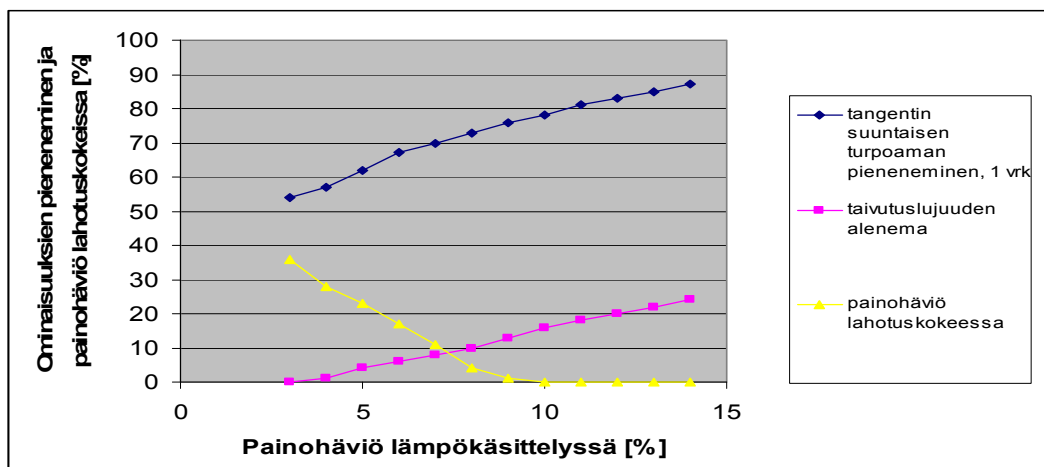
Lämpökäsittelyllä on joitakin kielteisiä mutta runsaasti myönteisiä vaikutuksia puun ominaisuuksiin. Puussa tapahtuvia muutoksia ovat: lahonkesto, lujuus, kovuus, tiheys, tasapainokosteus, mittapysyvyys, veden imeytyvyys, lämmönjohtavuus, biologinen- ja säänkestävyys sekä värisävy. Käsittelyominaisuudet on esitetty kuvassa 9. ((Puu-merkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)



KUVA 9 ThermoWood- käsittelyominaisuuksia puuhun

(Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010).

Kuvaajasta 1 nähdään, kuinka lämpökäsittely vaikuttaa kuusen erilaisiin ominaisuuksiin. Painohäviö lahotuskokeissa on ilmeinen. Myös taivutuslujuuden alenema kasvaa selkeästi. Tangentiaalinen puun turpoaminen on puun ominaisuuksissa hyvin hankala. Tangentiaalisen turpoamisen pieneneminen on siten myös huomattavaa.



KUVAAJA 1 Lämpökäsittelyn vaikutus kuusen ominaisuuksiin

(Viitaniemi & Jämsä 1996, 51).

6.2 Lahonkesto

Lahonkesto on yksi tärkeimmistä lämpökäsittelyn eduista. Lämpökäsitelty puu tarjoaa ekologisen vaihtoehdon painekyllästetyn puun rinnalle. Lahonkesto ei tarvitse käyttää myrkyllisiä kyllästeaineita. Myös sen hävittäminen on lähes myrkytöntä. Sitä voi käyttää polttopuuna samoin kuin käsittelemätöntä puuta. Tulee kuitenkin muistaa, että

jatkuvassa maa- ja vesikosketuksessa olevan puun tulee Suomessa edelleen täyttää A-luokan vaatimukset. Lahonkeston paranemisen on todettu johtuvan puuhun sitoutuneen vesimäärän ja hydroksyyliyhymien vähenemisestä sekä puun aineosien muuttumisesta vähemmän lahonalttiiksi.

Lahonkestoja voidaan arvioida suoraan myös painohäviön avulla. Mitä korkeampi lämpötila, sitä suurempi on painohäviö. Myös sienet aiheuttavat omalta osaltaan painohäviötä. Lämpökäsittelyssä tapahtuvan painohäviön ollessa yli 10 % lämpökäsittelyn puun ei ole todettu lahoavan.

Lahotuskokeena voidaan käyttää EN 113-pikalahotuskoetta. Testikappaleet sekä vastaavat käsittelemättömät koekappaleet asetetaan viljelymaljoihin. Altistuksessa käytettyjä sieniä ovat *Poria plasenta* (laakakääpä), *Coniophora puteana* (kellarisieni) ja *Gloephyllum trabeum* (saunakääpä). Kyseiset sienet ovat yleisiä esimerkiksi erilaisissa rakennusvaurioissa. (Möller ja Otranen 1999, 74–75.)

Tavallisesti lahottajasienet kasvavat puun kosteuspitoisuuden ollessa 30 – 60 %. Joidenkin sienten kohdalla kasvua tapahtuu jo alle 25 % -kosteuspitoisuudessa. Koska lämpökäsittelyillä puun tasapainokosteus on selvästi alhaisempi kuin käsittelemättömällä puulla, vähenee myös sienikasvun ja lahoamisriskin mahdollisuus. Lahottajasienten itiöiden on todettu kuolevan yli 100 °C:n lämpötiloissa. Siten jo kuuma-kuivaus tuhoaa lahottajasienten itiöt. Kuitenkin ympäröivän ilman mukana leijuu jo uusia itiöitä puuhun.

6.3 Lahonkeston luokitus

Lämpökäsittelyssä, lämpötilan ollessa 210 – 230 °C, saavutetaan yleensä AB-luokan painekyllästystaso tai hyvin lahoa kestävien puulajien lahonkesto EN 113 mukaisessa testissä. Luokkaan 2 lämpökäsittelyn puun työstettävyyttä säilyy vielä suhteellisen hyvänä. Tällöin myös lujuusominaisuudet riittävät tavallisimpiin käyttökohteisiin. Lahonkeston luokituksessa käytetään Standardia: EN 350-1 (1994) (Möller ja Otranen 1999, 76.)

Taulukossa 2 on luokiteltuna lahonkestit. Luokat jaetaan viiteen eri ryhmään.

TAULUKKO 2 Lahonkeston luokitus

Luokka 1, hyvin lahoa kestävä
<ul style="list-style-type: none"> • saavutettu maan yläpuolisiin käyttökohteisiin soveltuvilla havupuilla lämpökäsittelyluokassa 1 ($t \geq 230 \text{ °C}$) • lämpökäsittelyluokan 1 lahonkesto vastaa parhaimmillaan A-luokkaan painekyllästetyn männyn pintapuun lahonkesto (Huom. maan yläpuolisissa käyttökohteissa)
Luokka 2, lahoa kestävä
<ul style="list-style-type: none"> • saavutettu maan yläpuolisiin käyttökohteisiin soveltuvilla havupuilla lämmönkäsittelyluokassa 2 ($t \approx 210 - 229 \text{ °C}$) • käsittelyluokan 2 (luokan lämpötila-alueen yläpää) lahonkesto vastaa AB-luokkaan painekyllästetyn männyn pintapuun lahonkesto
Luokka 3, kohtalaisesti lahoa kestävä
<ul style="list-style-type: none"> • saavutettu maan yläpuolisiin käyttökohteisiin soveltuvilla havupuilla lämpökäsittelyluokassa 2 ($t \approx 210 - 229 \text{ °C}$) • • käsittelyluokan 2 (luokan lämpötila-alueen alapää) lahonkesto vastaa hyvin lahoa kestäviä puita • lehtikuusi parhaimmillaan
Luokka 4, jonkin verran lahoa kestävä
<ul style="list-style-type: none"> • saavutettu lämpökäsittelyluokassa 3 ($t \approx 195 - 209 \text{ °C}$) • käsittelyluokan 4 lahonkesto vastaa männyn sydänpuun tai lehtikuusen lahonkesto • männyn sydänpuu • lehtikuusi keskimäärin
Luokka 5, ei lahoa kestävä
<ul style="list-style-type: none"> • männyn käsittelemätön pintapuu • lehtipuut yleensä

(Möller ja Otranen 1999, 76).

6.4 Lujuusominaisuus

Tarkasteltaessa lämpökäsittelyn vaikutusta puun lujuuteen, käsitellään mm: taivutuslujuutta, puristuslujuutta, leikkauslujuutta, halkaisulujuutta sekä kiinnitysruuvien pitävyyttä.

Möller ja Otranen (1999) suorittivat koesarjat, joissa tutkittiin eri lämpökäsittelyasteiden vaikutusta puun lujuuteen. Taivutukset suoritettiin EN 408-standardin mukaisesti. Tutkimuksessa loppulämpötilat vaihtelivat 190 – 230 °C:n välillä. Loppulämpötilan pitoajat vaihtelivat 0,5 – 3 h välillä. Heidän mukaansa vaikutti siltä, että korkeissa lämpötiloissa männyn ja kuusen taivutuslujuus aleni jopa 20 %.(58-59.)

Alemmissä lämpötiloissa lujuus pieneni vähemmän, ollen 195 – 209 °C:ssa käsittelemättömän puun luokkaa. Alle 190 °C:ssa lämpökäsittely saattaa jopa parantaa puun taivutuslujuutta alentuneen tasapainokosteuden vuoksi. Viitaniemi ja Jämsä (1996) olivat havainneet, että muutos tapahtuu suoraviivaisesti lämpökäsittelyasteen suuruuden mukaan. Möller ja Otranen (1999) ovat osoittaneet YTI:n suorittamien kokeiden mukaan, että havupuiden taivutuslujuuden heikkeneminen kiihtyy 210 – 230 °C:n välillä Lehtipuilla muutos on vähäistä, ainoastaan koivun taivutuslujuus heikkenee 9 % 195 – 209 °C:n lämpökäsittelyssä. Tehdyissä mittauksissa käsittelemättömän koivun taivutuslujuuden keskiarvo oli hieman alhaisempi kuin kirjallisuudessa mainitaan. (Mts.59-60.)

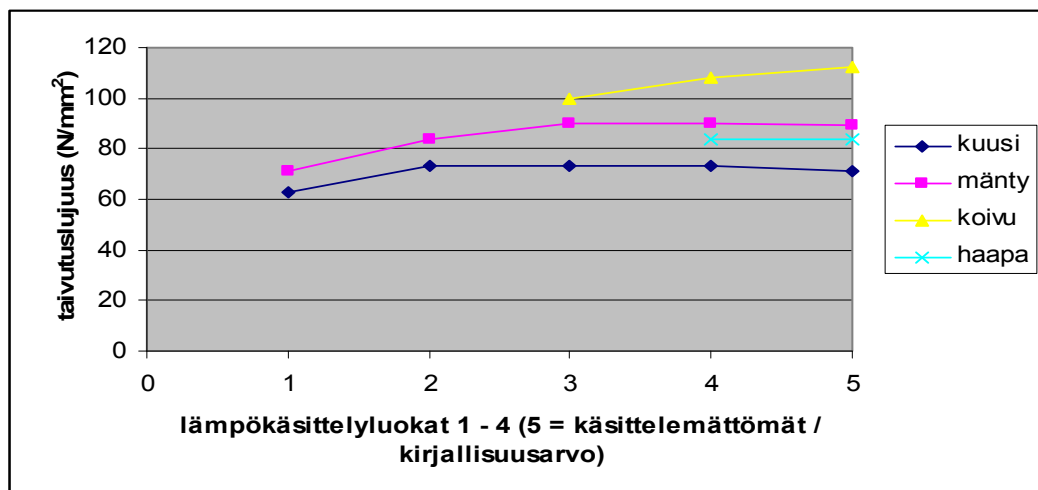
Taulukossa 3 nähdään, mitkä puulajit sopivat eri käsittelyluokkiin. Eri käsittelyluokkia on kaikestaan neljä. Luokitus jaetaan lämpötilaerojen mukaan. Luokassa 1 lämpökäsittely nostetaan jopa yli 230 °C:n. Neljännessä, alimmassa luokassa, lämpökäsittelyt suoritetaan alle 195 °C.

TAULUKKO 3 Käsittelyluokat

Käsittelyluokka	Käsittelyn lämpötila-alue (ilma)	Käsitellyt puulajit
Luokka 1	≥ 230 °C	Mänty, kuusi
Luokka 2	210....229 °C	Mänty, kuusi
Luokka 3	195....209 °C	Mänty, haapa, koivu
Luokka 4	≤ 195 °C	Haapa, koivu

(Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010).

Kuvaajasta 2 nähdään, kuinka kuusen lämpökäsittelyluokkien taivutuslujuudet pysyvät melko samoina. Suurin muutos tapahtuu koivun kohdalla.



KUVAAJA 2 Taivutuslujuuden muutos lämpökäsittelyssä

(Puun lämpökäsittely, 58).

Kantavissa rakenteissa lämpökäsiteltyä sahatavaraa ei kuitenkaan suositella käytettäväksi. Taivutuslujuuden heikentyminen on myös olennaisesti sidoksissa puuaineksen oksakohtiin. Lujuus on oksista johtuen muuta puuta alhaisempi. Myös oksien laadulla on vaikutusta puun taivutuslujuuteen. Kuolleet tai osittain kuolleet oksat heikentävät puun lujuutta enemmän kuin terveet oksat. ((Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010.)

Lämpökäsittely ei heikennä ThermoWoodin puristuslujuutta. Vaikutus voi olla jopa jossain määrin päinvastainen. Ääriarjoille kuormitettuna lämpökäsitellyllä puulla ei ole kuitenkaan samaa elastisuutta kuin käsittelemättömällä puulla. Myös puun tihey-

dellä on merkittävä vaikutus puristuslujuuteen. (Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010.)

Erittäin korkeassa lämpötilassa (230 °C) suoritettu lämpökäsittely pienentää leikkauslujuutta. Kuusen ja männyn säteen suuntainen leikkauslujuus pienenee 1 – 25 % ja vastaavasti tangentin suuntainen 1 – 40 %. Normaaleissa käsittelylämpötiloissa leikkauslujuuden pienentyminen on selkeästi vähäisempää. (Lampopuu.2010.)

Lämpökäsittely pienentää puun halkaisulujuutta käsittelylämpötilasta riippuen 30 – 40 %. Halkaisulujuuden määrittämisessä käytetään tavallisesti Shimazu AG-1000 kNE-aineenkoestuskonetta. Puutieteellisessä kirjallisuudessa mainitaan vain vähän halkaisulujuuden lukuarvoja. Varsin suuria eroja esiintyy myös eri testaajien välillä. Yleisesti voidaan todeta, että havupuilla halkaisulujuuden heikkeneminen on selkeämpää kuin lehtipuilla. Toisaalta testeissä lehtipuilla on käytetty alempia lämpötiloja. Käytännössä kiinnitysruuvien pitävyyteen vaikuttaa enemmän puun tiheyden vaihtelu kuin lämpökäsittely. Puun tiheyden ollessa alhainen on hyvä muistaa tehdä lämpökäsittelyyn puuhun kiinnitysruuvien esiporaukset ennen varsinaista kiinnitystä. (Lampopuu.2010.)

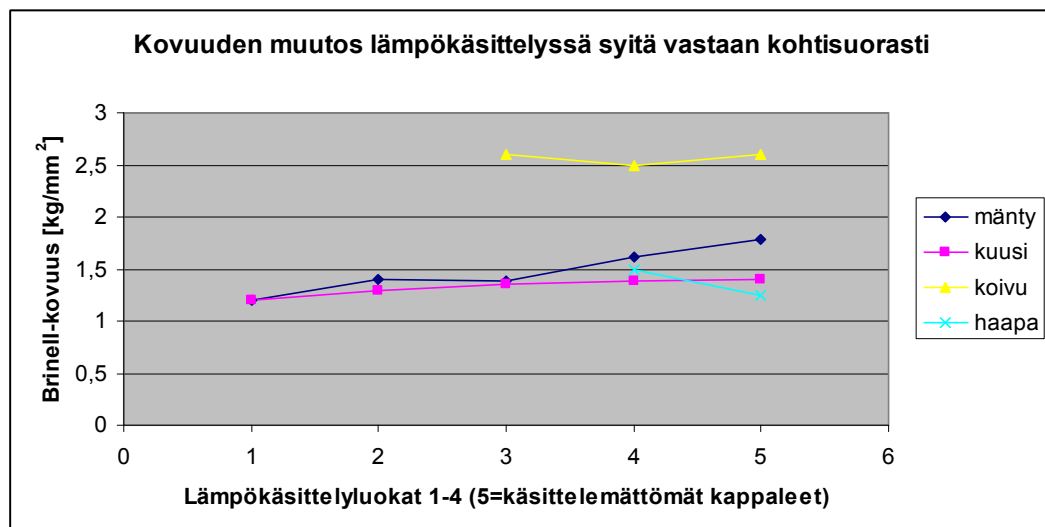
6.5 Kovuus

Puu on olemukseltaan epähomogeenista. Tällöin myös fysikaalisesti sen kovuuden mittaaminen on epämääräistä. Tähän ovat syynä mm. kevät-/kesäpuun erot, tiheysvaihtelut, pinta-/sydänpuuerot jne. Mittausmenetelmän aiheuttama virhe saattaa olla useita prosentteja. Brinell -kovuuden mittausta tapahtuu painamalla 100 kg voimalla halkaisijaltaan 10 mm kuulaa 10 – 15 sekunnin ajan kappaleen pintaa vasten. Näin syntyneen kuopan halkaisija mitataan kahdesta vastakkaisista suunnista. Brinell -kovuus saadaan määrittämällä halkaisijoiden keskiarvohalkaisija. Tulos on riippuvainen siten myös kokeen suorittajan tarkkuudesta. Kovuudentestauslaitteena käytetään usein AFFRI 250 DRM-konetta. (Möller ja Otranen.1999, 68-69.)

Brinell -kovuuskokeissa on saatu selkeimmät erot lämpökäsitteltyjen ja käsittelemättömien mäntytestikappaleiden välillä. Kuusi on käsittelemättömänakin pehmeää puuta

eikä lämpökäsittely heikennä tulosta paljoakaan. Koivulla saadut arvot pysyvät lähes samoina. Lämpökäsittelyn vaikutus puun kovuuteen on siis vähäistä. Sen sijaan suurempi merkitys kovuuteen näyttäisi olevan puun tiheydellä. (Puun lämpökäsittely 1999, 70.)

Kovuuden mittaukset tehdään syitä vastaan kohtisuorasti. Kuusen ja koivun kohdalla testitulokset (kuvaaja 3) näyttäisivät käyttäytyvän melko samoin (linearisesti).



KUVAAJA 3 Puun kovuuden muutos lämpökäsittelyssä

(Puun lämpökäsittely 1999, 70).

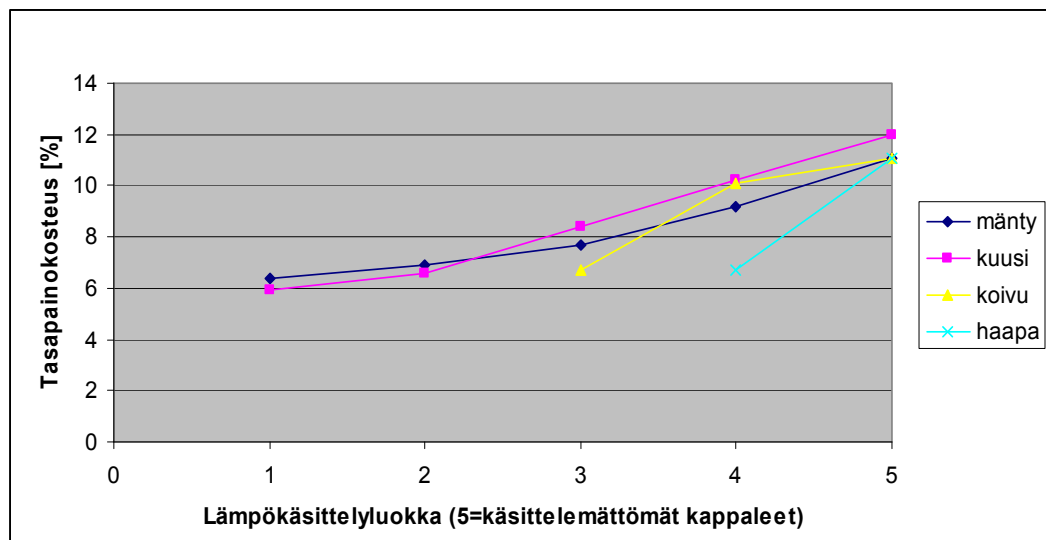
6.6 Tiheys

Tiheydellä tarkoitetaan kappaleen tilavuuspainoa (kg/m^3). Puun lujuus korreloi selkeästi sen tiheyteen. Lämpökäsittelyn pienentäessä puun tiheyttä, heikkenevät myös sen lujuusominaisuudet. Kuitenkin puun paino/lujuus – suhde pysyy käytännössä muuttumattomana. Määriteltäessä puun tiheyttä, mitataan testikappaleesta sen paino ja koko. Thermowood -käsitelty puu ei ole yhtä tiheää kuin käsittelemätön puuaines. Puu menettää painoaan lämpökäsittelyssä ja siinä tapahtuu massamuutoksia. Tiheys pienee käytettäessä korkeampia käsittelylämpötiloja. Testitulosten hajonta on kuitenkin yleensä melko suuri, koska luontaisestikin puun tiheysominaisuudet vaihtelevat. (Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010.)

6.7 Tasapainokosteus

Lämpökäsittely madaltaa puun tasapainokosteutta. Näin tapahtuu varsinkin korkeassa lämpötilassa. Tuolloin puun tasapainokosteus on jopa 40 – 50 % alhaisempi kuin käsittelemättömän puun. Tästä seuraa myös puun kosteuselämisen pieneneminen jopa 80 – 90 %. (Möller ja Otranen 1999, 36.)

Kuvaajasta 4 nähdään selkeästi lämpökäsittelyn madaltavan puun tasapainokosteutta. Luokkaan 1 lämpökäsittelyn männyn tasapainokosteus väheni noin 45 %. Vastaava muutos kuusella oli 50 %. Havupuiden tasapainokosteuden muutos hidastuu korkeammassa käsittelyasteissa. (Möller ja Otranen 1999, 36-37.)



KUVAAJA 4 Tasapainokosteuden muutos lämpökäsittelyssä

Olosuhteet: RH = 65 % ja t = 20 °C

(Puun lämpökäsittely, 37).

6.8 Mittapysyvyys

Lämpökäsittely heikentää veden imeytyvyyttä puuhun. Tulokset on saatu tekemällä puulle upotuskokeita. Kokeissa on todettu, että lämpökäsiteltyyn puuhun sitoutuu huomattavasti vähemmän vettä kuin käsittelemättömään puuhun. Tasapainokosteuden

alentumisen johdosta lämpökäsitellyn puun mittapysyvyys paranee olennaisesti. Lämpökäsitellyllä puulla sekä säteen että tangentin suuntainen turpoaminen kosteuden lisääntyessä voi olla 40 – 50 % pienempi kuin käsittelemättömällä puulla. Upotuskokeissa on todettu, että mitä suurempi lämpökäsittelyn painohäviö on, sitä vähäisempi on imeytynyt vesimäärä. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010).

6.9 Lämmönjohtavuus

Thermowoodin lämmönjohtavuus on 20 – 25 % alhaisempi kuin käsittelemättömän puun. Testiolosuhteet ovat olleet samat kummallekin. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

6.10 Biologinen kestävyys ja säänkesto

Laboratorio-olosuhteissa suoritettujen standardoitujen testien (EN 113, ENV 807) mukaan lämpökäsittely parantaa huomattavasti puun biologista kestävyyttä. ThermoWood soveltuu ilman kemiallista suojausta käytettäväksi standardin EN 335-1 luokkien 1 – 3 olosuhteissa. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

Myös lämpökäsitelty puu sinistyy ja homehtuu. Kuitenkin tartunnan ilmaantuminen tapahtuu hitaammin kuin käsittelemättömälle puulle ja vaikutuksetkaan eivät ole välttämättä yhtä suuria. (Möller ja Otranen 1999, 78).

Useimmat puulajit soveltuvat ThermoWoodin raaka-aineeksi. Puulajeittain optimoitu lämpökäsittelyprosessi asettaa raaka-aineelle erittäin tiukat laatuvaatimukset. Lämpöpuuyhdistys ry on määritellyt minimilaatuvaatimukset ThermoWoodin raaka-aineena käytettävälle mänty-, kuusi- ja lehtipuusahatavaralle. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

6.11 Värisävy

Lämpökäsitelty puu tummuu kauttaaltaan. Värimuutoksia tapahtuu runsaammin yli 100 °C:n lämpötiloissa. Puun pintaosa värjäytyy sydänosaa tummemmaksi. Tämä joh-

tuu hapen pääsystä käsittelyn aikana lämpökäsittelykammioon. Värin tummuus riippuu käytetystä lämpötilasta, ajasta ja höyrytyksestä. (Möller, Otranen.1999, 35.)

Sahatavaran varastointiaika- ja olosuhteet vaikuttavat lämpökäsittelyn jälkeiseen värisävyyteen. Esivarastointi auringonvalossa aiheuttaa tumman värisävyn lämpökäsittelyssä. Lämpökäsittelyä edeltävä kuivausprosessi vaikuttaa myös lopulliseen väriin. Jotta saadaan tasainen värisävy tuotteen pinnalle, tulee välirimojen olla kuivia. (Möller, Otranen 1999, 35.)

Luonnonolosuhteissa ThermoWoodin kosteuspitoisuus on noin puolet käsittelemättömään puuhun verrattuna. Ultraviolettisäteilyn aiheuttama pintahalkeilu on sillä vähäisempää kuin käsittelemättömällä puulla. Värin säilyttämiseksi siihen suositellaan pintakäsittelyä UV-suojan antavalla menetelmällä. UV-säteilyn johdosta ThermoWoodin alkuperäinen väri haalistuu. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

7 LÄMPÖPUUN TUOTELUOKITUS

Havu- ja lehtipuille on oma luokituksensa, koska niiden ominaisuudet poikkeavat selkeästi toisistaan. ThermoWood® käsittää kaksi yleistä tuoteluokkaa. Niiden nimet ovat Thermo-S ja Thermo-D. Tuoteluokituksessa korostetaan olennaisina ominaisuuksina kosteuselämistä, värinmuutosta ja biologista kestävyyttä. Tuoteluokitus on tarkoitettu käytettäväksi puutavaraa myyvissä rakennustarvikeliikkeissä. Loppukäyttökohteen mukaan asiakkaalle voidaan osoittaa tuoteluokituksen avulla oikean lämpökäsittelyasteen tuote. (Puumerkki.ThermoWood –käsikirja.2010.)

7.1 Thermo-S luokka

Thermo-S nimen S-kirjain tulee englanninkielisestä sanasta stability (vakaus, stabiilisuus, pysyvyys). Stabiilisuus on keskeinen tämän luokan ominaisuus, joka vaikuttaa tuotteen loppukäyttökohteisiin. Keskimääräinen kosteuseläminen on tangentin suunnassa 6 – 8 %. Se on standardin EN 113 mukaisesti luokiteltuna melko kestävä. Tällöin se lahonkestävyydeltään kuuluu luokkaan 3. (Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010.)

7.2 Thermo-D luokka

Thermo-D nimen D-kirjain tulee englanninkielisestä sanasta durability (kestävyys). Biologinen kestävyys on keskeinen tämän luokan ominaisuus, joka vaikuttaa tuotteen loppukäyttökohteisiin. Keskimääräinen kosteuseläminen on tangentin suunnassa 5 – 6 %. Se on standardin EN 113 mukaisesti luokiteltuna kestävä. Sen lahonkestävyysluokka on 2. (Puumerkki. ThermoWood –käsikirja.2010.)

7.3 Prosessin vaikutuksista puun ominaisuuksiin Thermo – S ja Thermo – D tuoteluokittain

Käsittelylämpötilat ovat yleensä havupuille 190 °C (Thermo-S) ja 212 °C (Thermo-D). Vastaavat lämpötilat lehtipuille ovat 185 °C ja 200 °C. Taulukoissa 4 ja 5 on näkyvissä lämpökäsittelyn vaikutukset puun eri ominaisuuksiin.

TAULUKKO 4 Havupuut (mänty ja kuusi)

	Thermo-S	Thermo- D
Käsittelylämpötila	190 °C	212 °C
Kestävyys	+	++
Dimensiostabiiisuus	+	++
Taivutuslujuus	ei muutosta	-
Värin tummuus	+	++

(Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010).

TAULUKKO 5 Lehtipuut (koivu ja haapa)

	Thermo-S	Thermo- D
Käsittelylämpötila	185 °C	200 °C
Kestävyys	ei muutosta	+
Dimensiostabiiisuus	+	+
Taivutuslujuus	ei muutosta	-
Värin tummuus	+	++

(Puumerkki. ThermoWood –käsikirja. 2010).

7.4 Havu- ja lehtipuusahatavaran käyttökohteet

Yleisessä Thermowood -tuoteluokituksessa havu- ja lehtipuille on oma lämpökäsittelyasteisiin perustuva luokituksensa. Käsittelylämpötilat on määritetty optimoiden loppukäyttökohteen edellyttämät vaatimukset. Seuraavissa taulukoissa on luetteloitu havu- ja lehtipuusahatavaran suositeltavat käyttökohteet. Thermo-S -tuoteluokan sahatavaraa käytetään enemmän sisätiloihin kun taas Thermo-D -tuoteluokan sahatavara kestää paremmin ulkokäytössä.

Taulukoissa 6 ja 7 on eritelty sahatavaran käyttökohteita. Thermo –D –tuoteluokan puutavara sopii paremmin ulkokäyttöön ja Thermo –S –luokan puutavara sen sijaan paremmin sisäkäyttöön.

TAULUKKO 6 Thermo-S -tuoteluokan sahatavaran käyttökohteita

Thermo-S Havupuut	Thermo-S Lehtipuut
- rakennekomponentit	- sisustukset
- sisustukset, kuivat tilat	- kiintokalusteet
- kiintokalusteet, kuivat tilat	- huonekalut
- huonekalut	- lattiat
- puutarhakalusteet	- saunan rakenteet
- saunan lauteet	- puutarhakalusteet
- ikkuna- ja ovirakenteet	

(Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010).

TAULUKKO 7 Thermo-D – tuoteluokan sahatavaran käyttökohteita

Thermo-D Havupuut	Thermo-D Lehtipuut
<ul style="list-style-type: none"> - ulkoverhous - ulko-ovet - ikkunaluukut - ympäristörakenteet - sauna- ja kylpyhuonesisustukset - lattiat - puutarhakalusteet 	Käyttökohteet kuten luokassa Thermo-S. Haluttaessa tummaa värisävyä käytetään luokan Thermo-D -tuotteita.

(Puumerkki. ThermoWood – käsikirja.2010).

8 TUTKIMUSMENETELMÄT JA MATERIAALIT

Lämpökäsittelylaitteistoon kohdistuu suuria rasituksia. Lämpökäsittely vaatii korkeita lämpötiloja, maksimissaan 240 °C. Lämpötilanvaihtelut sisä- ja ulkoilman kanssa aiheuttavat lämpölaajenemista. Laajeneminen aiheuttaa rasituksia esimerkiksi laitteiston puhallinakseleiden rakenteisiin. Myös kuivausprosessissa käytettävä ilman korkea kosteuspitoisuus sekä lievä ylipaine aiheuttavat ongelmia. Laitteiston sisäpinnoilta tapahtuva kosteusvuoto saattavat kostuttaa eristemateriaaleja, jolloin niiden eristyskyky heikkenee.

Helmikuussa 2010 (Arvidsjaur, Ruotsi) noudettiin Mikkeliin tutkimusta varten kuusi-puuerä, joka oli käsitelty WTT-menetelmällä. Sahatavaran dimensio oli 47 mm x 150 mm. Puusahatavaran käsittely oli suoritettu Ruotsissa tammikuussa. Käsittelylämpötila oli 170 °C. Prosessin aika oli ollut 24 tuntia. Puun lähtökosteus oli 18 %. Käsiteltyjä koekappaleita oli 30. Vastaavia vertailukappaleita (käsittelemätön/referenssi) oli kymmenen.

Työssä verrataan kahta eri lämpömodifiointikäsitelyä. Materiaalina käytetään kuusta. WTT-menetelmällä (160 °C) käsitellyt kuuset (36 kpl) noudettiin Ruotsista helmikuussa. Mikkelin Salonsaaren Nardi -lämpökäsittelylaitteistolla käsitellyt kuuset sai-

vat ThermoWood –käsittelyn (212 °C). Tässä testissä käytettiin kotimaista kuusta. Puutavaran käsittely suoritettiin huhtikuussa. Kummankin eri käsittelyn vertailukappaleet olivat käsittelemätöntä kuusta. Tavoitteena oli löytää sopiva käsittely kuuselle, jotta sen kesto-ominaisuudet eivät kärsi. Yli 200 °C:n lämpökäsittelyissä puun lujuusominaisuuksien on todettu selkeästi heikentyvän.

8.1 Lämpökäsittely Salonsaarella

Lämpökäsittely tapahtui maaliskuussa 2010, Mikkelin Salonsaarella sijaitsevalla Nardi – lämpökäsittelylaitteistolla (kts. kuva 10). Laitteiston valmistusvuosi on 1994. Uunin päivitys on tehty vuonna 2000, jolloin sen ohjelma ja ohjausjärjestelmä uusittiin.

Lämpökäsittelyuunin tilavuus on noin 1 m³. Uunin pituus on 1,8 m. Laitteisto käsittää kaksi puhallinta, neljä puun lämpötila-anturia (2/puoli), kaksi kuivalämpötila-anturia (1/puoli), kaksi märkälämpötila-anturia (1/puoli), höyryn kehittimen ja kahdeksan puun kosteusanturia. Kosteusanturit eivät ohjaa prosessia, eivätkä ne ole tavallisesti ole käytössä laitteiston ohjausjärjestelmässä.

Kuvassa 10 puukeskukselta noudettu kuusipuuerä on lastattu lämpökäsittelyuuniin. Kuvassa nähdään hiukan lämpökäsittelyuunin sisärakenteita. Sähköiset anturit ovat: lämpö-, kosteus- ja kuiva-antureita. Keskellä on kieroilmapuhallin. Takaseinässä voidaan nähdä höyrypoistoluukku.



KUVA 10 Kuusisahatavara Salonsaaren Nardi -lämpökäsittelyuunissa

(Aavakallio, Timo 13.4.2010).

Kuvassa 11 on Ruotsista noudettu kuusi- ja koivupuutavaraerä. Ylempänä on kuusi ja vaaleat välissä ovat käsittelemättömät kuusivertailukappaleet. Leveämpi sahatavara on koivua. Molemmat lämpökäsitellyt puulajit ovat WTT –käsiteltyjä.



KUVA 11 Ylimpänä ruotsalainen WTT -käsitelty kuusi

(Aavakallio, Timo. 13.4.2010).

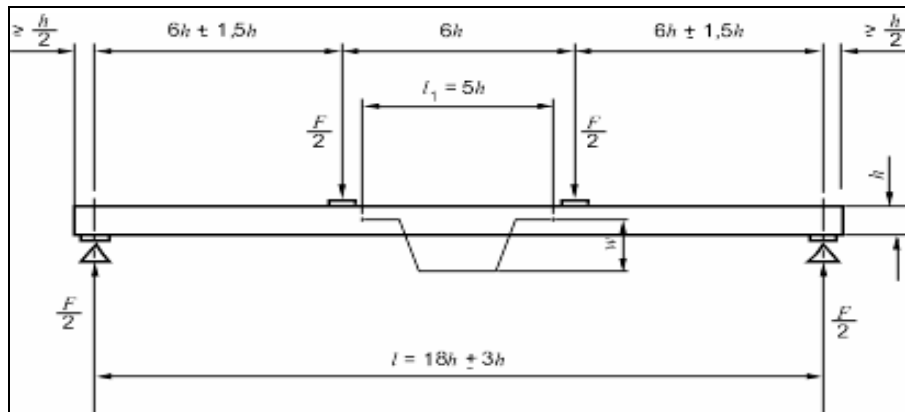
Sahatavaran työstöissä käytettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun puuntyöstökoneita (tarkkuuspyörösaha, oikohöylä ja tasohöylä). Koe-eristä määritettiin väri Minolta Chroma meter CR-210 laitteella. Mittauksia otettiin jokaisesta koekappaleesta kolmesta eri kohdasta. Dimensioiden mittauksessa käytettiin työntö- ja rullamittaa. Kappaleiden painot mitattiin. Näin saaduilla lukuarvoilla määritettiin kappaleiden tiheydet. Koekappaleita säilytettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun hallissa (20 °C, Rh 40 %).

8.2 Taivutustestauksessa käytetty standardi

Taivutustestaukset suoritettiin nelipistetäivutuksena. Standardeina käytetään Suomen standardoimisliiton SFS-EN 408 standardia. Kyseisen standardin on Metsäteollisuus ry vahvistanut 9.8.2003. Standardissa on määritelty puurakenteet, rakenteellinen sahatavara ja liimapuu aineellisilta ja mekaanisilta ominaisuuksiltaan suomalaisiksi kansalliseksi standardiksi.(SFS-Standardisointi.)

Kuvassa 12 on tarkat kansainväliset ohjeet tehtävässä käytetystä nelipistetäivutuksesta. Taivutuskappaleen dimensiot ja aineenkoestuslaitteen antureiden etäisyydet tulevat

selkeästi esille. Ohjeet käytettävistä voimista (puulajeittain) sekä testausnopeuksista tulevat selville Standardista 408.



KUVA 12 Taivutuskokeen suoritus standardin SFS-EN 408 mukaisesti
(European Committee for standardization 2003. EN 408:2003 E)

8.3 Taivutustestauksessa käytetty laite

Taivutukset on suoritettu käyttämällä Mikpolis Oy:n sekä Mamk:n yhteiskäytössä olevalla Shimadzu – aineenkoestuslaitteella (ks. kuva 11). Laitteen hankintavuosi on 1995. Sen tuotenumero on 25092778 ja sen käyttämä teho on 6 kW. Puuraaka-aineen testauksessa käytettiin kiilaistukkaa (50 kN). Piirturina on AR-6422. (Mikpolis. 2010.)



KUVA 13 Staattiset, Veto-, puristus- ja taivutustestaukset
(Mikpolis.Konelaboratorio.2010).

8.4 Taivutuskappaleiden valmistus

WTT-menetelmällä käsitelty kuusisahatavara noudettiin 23 - 25.2.2010 Pohjois- Ruotsista (Arvidsjaut). Koe-erässä oli 32 kappaletta sahatavaraa (dimensiot 47mm - 150mm). Alla olevassa kuvassa ovat kuusisahatavarat siten, että ylimmäiset ovat WTT -menetelmällä käsiteltyjä (tummat) ja keskimmäiset (vaaleat) ovat vastaavat vertailukappaleet. Kappaleet merkittiin WT1-WT32. Tutkimuksen vertailukappaleita oli 10 kpl. Kappaleet merkittiin W1-W10. Mamk:n katkaisusahalla kappaleet mitoitettiin noin metrin pituisiksi. Halkaisu suoritettiin vastaavasti halkaisuvannesahalla. Oikohöylällä suoritettiin ensimmäinen pinnan höyläys. Tasohöylällä höylättiin kappaleet 25mm:n paksuisiksi. Tämän jälkeen tarkkuuspyörösahalla sahattiin 25mm levyisiä testikappaleita, joista valittiin mahdollisimman suoria ja oksattomia kappaleita.. Tasohöylällä mitoitettiin taivutuskappaleiden leveydeksi 20mm ja korkeudeksi 20 mm. Vannesahalla kappaleet katkaistiin 400 mm pituisiksi.

Thermowood käsittelyyn tarvittava kuusisahatavara hankittiin Mikkelistä Puukeskukelta. Sahatavaran dimensiot olivat 45mm x 95mm. Katkaisusahalla sahattiin jokainen puutavara kolmeen osaan 1,8 m / kpl. Saaduista kappaleista suoritettiin lämpökäsittely 2/3:n. Lämpökäsiteltyjä kappaleita oli 64. Käsittely tapahtui kahdessa erässä. Taivutuskappaleiden dimensiot olivat samat kuin WTT -testauksessa (20mm x 20mm x 400mm). Sahatavarasta valittiin testattavaksi mahdollisimman hyviä ja tasalaatuisia kappaleita 32. Kappaleet merkittiin:T1-T32. Vertailukappaleita (kappaleiden merkintä1V-32V) oli 32 kappaletta (1/3).

8.5 Värin määrittäminen

Mikkelin ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa mitattiin Minolta Chroma meter CR – 210 (Japani 1988, kuva 14)laitteella. Ennen mittausta laite kalibroidaan valkoisella kalibrointilevyllä. Värimittaus toimii kolmiulotteisesti. Laitteella saadaan neljä eri lukua (L, a, b ja c). L vastaa kirkkautta asteikolla 0 (musta) -100 (valkoinen). Lukuarvo a kertoo värisävyn muutosta asteikolla vihreästä punaiseen. Vastaavasti b kuvaa muutosta sinisestä keltaiseen. Chroma (c) kuvaa värin syvyyttä. Värin suunta a (x-akseli) ja b (y-akseli) antavat arvoksi kulman H. Analyysit suoritettiin molemmista käsittelyistä (WTT ja Thermowood) koekappaleista Mittaukset suoritettiin 22.4.-

27.4.2010. Kyseiset mittaukset suoritettiin höylätyistä koekappalepinnoista. Laitteella otettiin jokaisesta pinnasta kolme mittausta. Näistä arvoista kone antaa keskiarvolukeman. Mittausarvoja otettiin jokaisesta koe – eristä (10 kappaletta / erä).



KUVA 14 Minolta Chroma meter CR-210 värianalyysilaitte

(WWW-kuvat. 29.4.2010).

8.6 Kosteuden määrittäminen

Koekappaleita säilytettiin Mamk:n puulaboratoriossa, jonka olosuhteet olivat 20 °C ja Rh (suhteellinen ilmankosteus) 40 %. Ruotsista toimitettu kuusisahatavara oli kyseisessä tilassa neljä viikkoa. Puukeskuksen vertailukappaleet olivat vastaavasti kaksi viikkoa ja ThermoWood -käsittelyt yhden viikon.

Koekappaleet tehtiin taivutustestauksessa käytetyistä koekappaleista. Näiden dimensiokappaleiden mitoitus suoritettiin käyttäen tarkkuuspyörösahaa. Kappaleiden dimensiot olivat 20mm x 20mm x 50mm.

Kyseiset koekappaleet punnittiin (26.-27.4.2010) YTI:n käyttämällä Sartorius -BP 3100P (ISO 9001) vaa'alla (tarkkuus 0,01g). Ensimmäinen paino (märkäpaino m_u) otettiin kappaleista ennen niiden laittamista Termaks – kuivausuuniin. Kuivausuunin lämpötilan oli 103 °C. Testikappaleet mitattiin standardien mukaisesti (min 18 h) uudelleen seuraavana päivänä. Näin saaduista mittauksista voidaan käyttää nimitystä kuivapaino (m_o).

Laskukaava:

$$\frac{m_u - m_o}{m_o} * 100 \% = \text{kosteus taivutettaessa}$$

8.7 Tiheyden määrittäminen

Tiheyksien määrittämisessä käytettiin koekappaleiden (20mm x 20mm x 50mm) märkäpainoa (m_u). Kyseinen arvo jaettiin kappaleen märkätilavuudella, joka saatiin yksinkertaisesti laskemalla testikappaleiden tilavuus (20x20x50). Yksikkötunnukseksi valittiin g/cm³.

Tiheyden laskukaavat:

$$\frac{m_u}{\text{märkätilavuus}} = T_1$$

$$\frac{m_o}{\text{märkätilavuus}} = T_2$$

9 TUTKIMUS ERI LÄMPÖTILOISSA KÄSITELLYN KUUSEN TAIVUTUSLUJUUDESTA

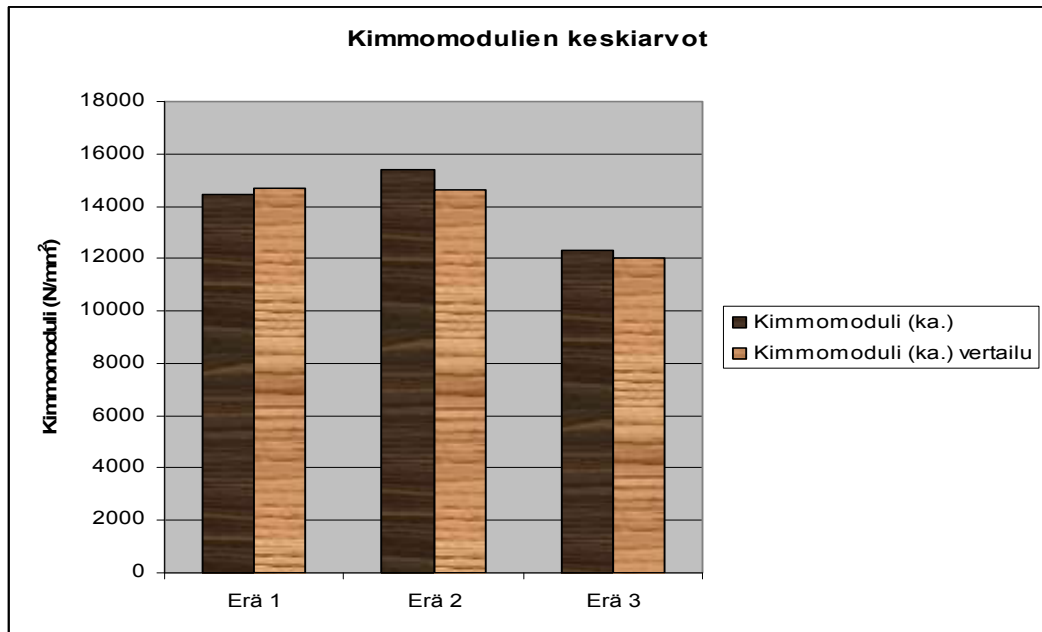
Mikkelin ammattikorkeakoulun puutekniikanopiskelijat Riina Pylvänäinen ja Tuulia Virkkunen suorittivat YTI palveluiden projekti-insinöörin Timo Aavakallion kanssa kuusen taivutuslujuuden testauksen keväällä 2009. Kuusisahatavaran käsittelylämpötilat olivat 160 °C, 180 °C ja 200 °C. Tutkimuksen tavoitteena oli saada tietoa, kuinka eri käsittelylämpötilat vaikuttavat kuusen taivutuslujuuteen. Vertailukappaleina olivat käsittelemättömät kappaleet, jotka oli halkaistu samasta kappaleista. Lämpökäsittelyt suoritettiin Mamk:n Nardi- lämpökäsittelyuunilla Mikkelin Salonsaarella. Koekappaleet tasaannutettiin ennen taivutuskokeita hybridi-kuivaamossa Mamk:n puupolilla. Laaduntarkastus suoritettiin silmämääräisesti kiinnittämällä huomiota koekappaleiden oksaisuuteen ja halkeiluun. Mamk:n konelaboratoriossa suoritettiin vetolujuustestaus. Testissä käytettiin standardia EN 408. Laitteena käytettiin Shimadzu Autograph AG-100 KN (1999) aineenkoestuskonetta. (Pylvänäinen ja Virkkunen. 2009.)

Tutkimuksessa oli käytössä kolme koe-erää. Koekappaleet valmisteltiin testausta varten sahaamalla ne 1-1,5 m pituisiksi ja merkitsemällä ne siten, että jokaisessa kappaleessa näkyi eränumero ja kappalenumero sekä käsittely. Lämpökäsittelyjä suoritettiin kolme kappaletta ja niiden kesto vaihteli 1-2 vrk. Vastaavasti jokaisen lämpötilan pitoaika kesti kaksi tuntia.. Käsittelylämpötilat olivat 160 °C (erä 1), 180 °C (erä 2) ja 200 °C (erä 3). Käsittelyjen jälkeen koekappaleet punnittiin. Kaikki lämpökäsittelyt ja puolet käsittelemättömistä kappaleista tasaannuttiin 20 °C lämpötilassa ilman suhteellisen kosteuden (Rh) ollessa 65 % hybridikuivaamossa (käsittelemätön u=12 %). Puolet käsittelemättömistä kuivattiin lämpökäsittelyjen keskimääräiseen kosteuteen (arviolta noin 5 – 8 %). Ennen taivutusta koekappaleet punnittiin. Taivutukset suoritettiin erissä siten, että jokaisessa erässä oli 60–80 koekappaletta. (Pylvänäinen ja Virkkunen.2009.)

Taulukoitujen tulosten perusteella tehdyistä kuvaajista 5 ja 6 voidaan todeta, että kimmomoduuli- ja jännitysarvot ovat suurempia erillä 1 ja 2 (160 °C ja 180 °C käsittely) kuin erällä 3 (200 °C). Tuloksista voidaan päätellä, että alle 200 °C:ssa käsitellyillä taivutuslujuusarvot ovat parempia kuin korkeammissa lämpötiloissa käsitellyillä kappaleilla. Toisaalta kuvaajasta 3 nähdään, että lämpökäsittelyillä kappaleilla on erästä riippumatta pienempi jännitys kuin vastaavilla vertailukappaleilla. (Pylvänäinen ja Virkkunen. 2009, 18.)

Tutkimustuloksissa havaittiin maksimijännitysarvojen heikkenevän oksaisella koekappaleella. Nämä tulokset tukevat yleistä käsitystä siitä, että oksat ja halkeamat näyttäisivät heikentävän puun taivutuslujuutta. Testauksessa todettiin myös, että käsittelylämpötilan ollessa 200 °C (koe-erä 3) testikappaleet näyttivät murtuvan keskeltä herkemmin tai jopa katkeavan. Matalammissa lämpötiloissa, 160 °C ja 180 °C, vastaavia havaintoja oli niukemmin. Vertailukappaleilla oksaisuus ei näyttäisi vaikuttaneen näkyvään murtumiseen/katkeamiseen yhtä paljon kuin lämpökäsittelyillä. (Pylvänäinen ja Virkkunen. 2009,19.)

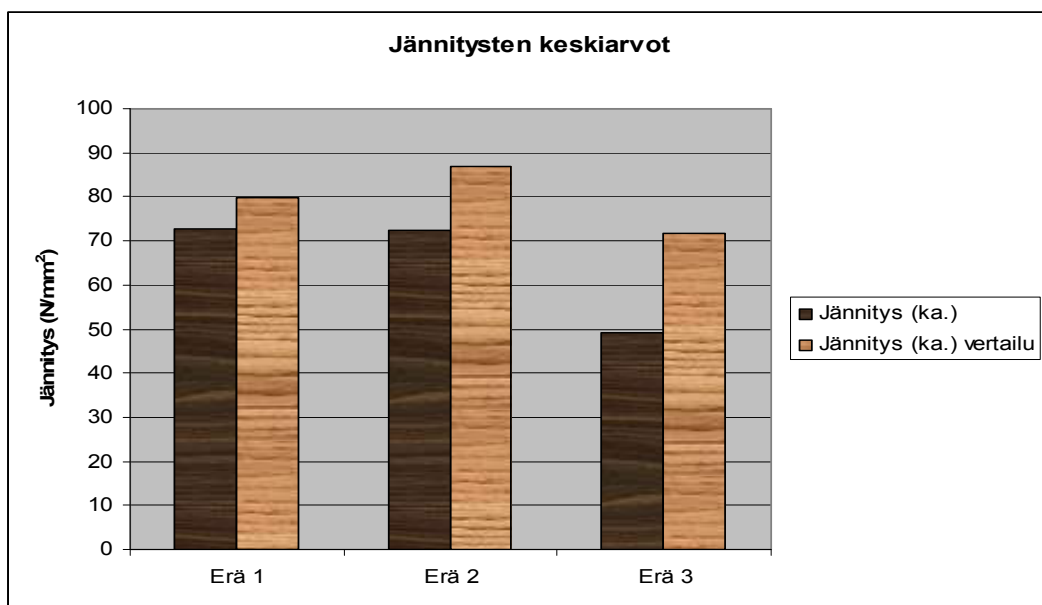
Kuvaajasta 5 todetaan, että 180 °C:n ja 200 °C:n lämpökäsittelyissä lämpökäsittelyt kuusitestikappaleet saivat paremmat kimmomoduuliarvot kuin käsittelemättömät. Sen sijaan matalassa lämpötilassa (160 °C) käsittelemättömät vertailukappaleet olivat parempia.



KUVAAJA 5 Kimmomodulien keskiarvot

(Pylvänäinen ja Virkkunen. 2009).

Jännitykset (taivutuslujuudet) olivat kuvaajan 6 perusteella kaikilla vertailukappaleilla paremmat. Matalissa lämpötiloissa erot olivat huomattavasti pienemmät. Erässä kolme ilmeisesti oksaisuus vaikutti myös vertailukappaleiden alhaiseen arvoon. Ero käsitel-
lyn ja käsittelemättömän koe – erän välillä kasvaa lämpötilan noustessa. Lämmön
noustessa heikkenevät myös käsiteltyjen koekappaleiden taivutuslujuudet selkeästi.



KUVAAJA 6 Jännitysten keskiarvot

(Pylvänäinen ja Virkkunen. 2009).

10 TUTKIMUSTULOKSIA

Tässä kohdassa on esitetty saadut mittaustulokset. Taulukoidut tulokset ovat seuraavassa järjestyksessä: taivutuslujuus, pintavärianalyysi, kosteus ja tiheys.

10.1 Taivutuslujuuden testaukset

Taivutustestaukset suoritettiin 21.–25.4.2010 Mikkelin ammattikorkeakoulussa Shimadzu –aineenkoestuskoneella. Alla olevista taulukoista nähdään koekappaleiden luettelointi sekä dimensiot. Kyseiset kappaleet olivat WTT – käsiteltyjä Ruotsissa. Taulukoista 8 – 14 nähdään taivutustestauksen numeeriset lukuarvot. Kyseiset arvot saatiin Trapezium – ohjelmalla.

Taivutuslujuus taulukoiden selitteet:

Unit	numero
Piece	kappale numerointi
Thickness	paksuus
Width	leveys
Lower Support	alaturkiväli
Upper Support	ylaturkiväli
Name	nimi
Elastic	kimmomoduuli (tässä: taivutuskimmomoduuli)
Max Force	maksimi voima
Max Disp	maksimi siirtymä (tässä: maksimi taipuma)
Max Stress	maksimi taivutuslujuus
Testing time	testaus aika
Parameter	tunnus, suure
Units	kappale

TAULUKKO 8 WTT – käsiteltyjen koekappaleiden numerointi ja dimensiot

Units	Pieces	WTT		Kuusi	
		Thickness	Width	Lower Support	Upper Support
		mm	mm	mm	mm
1	5WT	20	20	360	120
2	3WTA	20	20	360	120
3	4WTA	20	20	360	120
4	4WTB	20	20	360	120
5	17WT	20	20	360	120
6	27WT	20	20	360	120
7	9WT	20	20	360	120
8	8WT	20	20	360	120
9	6WT	20	20	360	120
10	11WT	20	20	360	120
11	29WT	20	20	360	120
12	17WT	20	20	360	120
13	1WT	20	20	360	120
14	4WTC	20	20	360	120
15	3WTB	20	20	360	120
16	14WT	20	20	360	120
17	12WT	20	20	360	120
18	10WT	20	20	360	120
19	7WT	20	20	360	120
20	15WT	20	20	360	120
21	24WT	20	20	360	120
22	30WT	20	20	360	120
23	28WT	20	20	360	120
24	32WT	20	20	360	120
25	22WT	20	20	360	120
26	18WT	20	20	360	120
27	19WT	20	20	360	120
28	20WT	20	20	360	120
29	29WT	20	20	360	120
30	23WT	20	20	360	120

TAULUKKO 9 WTT – käsiteltyjen koekappaleiden taivutustestaukset Mikkelin ammattikorkeakoulussa

Name	Elastic	Max Force	Max Disp	Max Stress	Testing time
Parameter	0,2–0,6 kN				
Units	N/mm2	kN	mm	N/mm2	Sec
1	11775,3	1,2985	11,45	58,4325	229
2	11373,4	1,2725	12,425	57,2625	248,5
3	10572,1	0,728	4,1625	32,76	83,25
4	0	0,5635	2,8	25,3575	56
5	10346,8	1,1435	7,96875	51,4575	159,375
6	11814,7	1,291	7,4625	58,095	149,25
7	10083,5	0,8915	6,55625	40,1175	131,125
8	11131,9	1,265	12,1	56,925	242
9	12853	1,2995	6,9125	58,4775	138,25
10	0	0,347	6,275	15,615	125,5
11	0	0,015	1,7125	0,675	34,25
12	10126,4	1,1415	12,0813	51,3675	241,626
13	12533,6	0,8485	4,0875	38,1825	81,75
14	10455,8	1,2345	13,9937	55,5525	279,874
15	12860	0,6635	3,0125	29,8575	60,25
16	14490,9	1,5375	8,1375	69,1875	162,75
17	11205,6	1,2915	14,9625	58,1175	299,25
18	10400	1,202	14,5	54,09	290
19	13088,9	1,437	14,0625	64,665	281,25
20	9150,24	1,101	12,775	49,545	255,5
21	11106,9	1,2075	12,8	54,3375	256
22	0	0,5835	3,94375	26,2575	78,875
23	12754,6	1,0975	5,65	49,3875	113
24	12180,2	1,3595	10,4188	61,1775	208,376
25	10827,1	1,4885	9,93125	66,9825	198,625
26	10947,9	0,6285	3,6125	28,2825	72,25
27	0	0,4215	2,8	18,9675	56
28	11324,3	1,415	15,6938	63,675	313,876
29	0	0,4975	2,6375	22,3875	52,75
30	11507,1	1,153	7,375	51,885	147,5
mean	11454,6	1,01413	8,41	45,636	168,2
maximum	14490,9	1,5375	15,6938	69,1875	313,876
minimum	9150,24	0,015	1,7125	0,675	34,25

TAULUKKO:10 WTT – vertailukoekappaleiden numerointi, dimensiot sekä taivutukset

		WTT		
	Thickness	Width	Lower Support	Upper Support
Units	mm	mm	mm	mm
1	20	20	360	120
2	20	20	360	120
3	20	20	360	120
4	20	20	360	120
5	20	20	360	120
6	20	20	360	120
7	20	20	360	120
8	20	20	360	120
9	20	20	360	120
10	20	20	360	120

Taivutukset

Name	Elastic	Max Force	Max Disp	Max Stress	Testing time
Parameter	0,2–0,6 kN				
Units	N/mm2	kN	mm	N/mm2	sec
1	12682,7	1,93500	16,6250	87,0750	332,500
2	11734,3	1,75700	15,0063	79,0650	300,126
3	8121,31	1,52200	15,6187	68,4900	312,374
4	13384,8	1,94375	14,1125	87,4688	282,250
5	14647,8	2,16875	15,5125	97,5938	310,250
6	10860,9	1,72500	15,1687	77,6250	303,374
7	14917,1	1,93500	16,3500	87,0750	327,000
8	14651,6	2,08000	16,0125	93,6000	320,250
9	11436,4	1,66900	14,0750	75,1050	281,500
10	10154,3	1,51100	12,4875	67,9950	249,750
Mean	12259,12	1,82465	15,0969	82,1093	301,937
Maximum	14917,1	2,16875	16,6250	97,5938	332,500
Minimum	8121,31	1,51100	12,4875	67,9950	249,750

**TAULUKKO 11 Käsittlemättömien ThermoWood – koekappaleiden taivutus-
testausnumerointi ja dimensiot**

Thermowood				Kuusi	
Units	Pieces	Thickness	Width	Lower Support	Upper Support
		mm	mm	mm	mm
1	5V	20	20	360	120
2	28V	20	20	360	120
3	21VA	20	20	360	120
4	29V	20	20	360	120
5	23V	20	20	360	120
6	25V	20	20	360	120
7	21VB	20	20	360	120
8	15V	20	20	360	120
9	26VA	20	20	360	120
10	6V	20	20	360	120
11	14V	20	20	360	120
12	31VA	20	20	360	120
13	19V	20	20	360	120
14	27V	20	20	360	120
15	12VA	20	20	360	120
16	12VB	20	20	360	120
17	32V	20	20	360	120
18	22V	20	20	360	120
19	10V	20	20	360	120
20	11V	20	20	360	120
21	3V	20	20	360	120
22	26VB	20	20	360	120
23	4V	20	20	360	120
24	9V	20	20	360	120
25	16V	20	20	360	120
26	24V	20	20	360	120
27	13V	20	20	360	120
28	31VB	20	20	360	120
29	16V	20	20	360	120
30	2V	20	20	360	120

TAULUKKO 12 Käsittelimättömien koekappaleiden taivutustestaukset

Mikkelin ammattikorkeakoulussa

Name	Elastic	Max Force	Max Disp	Max Stress	Testing time
Parameter	0,2–0,6 kN				
Units	N/mm ²	kN	mm	N/mm ²	Sec
1	12896,6	1,7995	12,075	80,9775	241,5
2	13708	1,853	18,025	83,385	360,5
3	12293,1	1,5935	13,7437	71,7075	274,874
4	13182,1	1,658	14,3813	74,61	287,626
5	13288,2	1,6855	16,3187	75,8475	326,374
6	10228,5	1,334	10,0625	60,03	201,25
7	11773,9	1,4535	13,3875	65,4075	267,75
8	11465,5	1,495	14,1125	67,275	282,25
9	13279	1,637	15,1688	73,665	303,376
10	14360,7	1,856	15,9312	83,52	318,624
11	10675,6	1,411	9,9875	63,495	199,75
12	12903,2	1,813	14,9188	81,585	298,376
13	14529,4	1,8125	15,425	81,5625	308,5
14	14558,6	1,7575	14,0812	79,0875	281,624
15	14441	1,7605	14,7687	79,2225	295,374
16	14859,7	1,76	15,1375	79,2	302,75
17	15629,7	1,855	15,275	83,475	305,5
18	13631,9	1,591	13,7	71,595	274
19	9940,12	1,325	11,575	59,625	231,5
20	12143,2	1,7915	14,5	80,6175	290
21	14263,7	1,8415	15,1125	82,8675	302,25
22	13599,7	1,669	15,2938	75,105	305,876
23	14187,9	1,693	16,875	76,185	337,5
24	12155,7	1,5605	14,45	70,2225	289
25	15007,6	1,79	13,725	80,55	274,5
26	13217,8	1,7525	14,075	78,8625	281,5
27	13152,3	1,523	15,4125	68,535	308,25
28	13081,5	1,862	14,625	83,79	292,5
29	14697,2	1,8495	15,3875	83,2275	307,75
30	10585,5	1,549	12,5125	69,705	250,25
mean	13124,6	1,67773	14,3348	75,498	286,696
maximum	15629,7	1,862	18,025	83,79	360,5
minimum	9940,12	1,325	9,9875	59,625	199,75

TAULUKKO 13 ThermoWood – käsiteltyjen koekappaleiden numerointi ja dimensiot

Thermowood				Kuusi	
Units	Pieces	Thickness	Width	Lower Support	Upper Support
		mm	mm	mm	mm
1	T5	20	20	360	120
2	T28	20	20	360	120
3	T21	20	20	360	120
4	T29	20	20	360	120
5	T23	20	20	360	120
6	T25	20	20	360	120
7	T27A	20	20	360	120
8	T15	20	20	360	120
9	T26	20	20	360	120
10	T6	20	20	360	120
11	T14	20	20	360	120
12	T31	20	20	360	120
13	T19	20	20	360	120
14	T27B	20	20	360	120
15	T12	20	20	360	120
16	T18	20	20	360	120
17	T32	20	20	360	120
18	T22	20	20	360	120
19	T10	20	20	360	120
20	T11	20	20	360	120
21	T3	20	20	360	120
22	T20	20	20	360	120
23	T4	20	20	360	120
24	T9	20	20	360	120
25	T16	20	20	360	120
26	T24	20	20	360	120
27	T31	20	20	360	120
28	T4	20	20	360	120
29	T2A	20	20	360	120
30	T2B	20	20	360	120

TAULUKKO 14 ThermoWood -käsiteltyjen koekappaleiden taivutustestaukset**Mikkelin ammattikorkeakoulussa**

Name	Elastic	Max Force	Max Disp	Max Stress	Testing time
Parameter	0,2–0,6 kN				
Kappale	N/mm2	kN	mm	N/mm2	Sec
1	15899,8	2,005	9,3625	90,225	187,25
2	14657,6	1,898	11,1687	85,41	223,374
3	11797	1,484	8,6125	66,78	172,25
4	12743,4	1,12	5,65	50,4	113
5	13473,6	1,1715	7,7875	52,7175	155,75
6	11131,5	1,434	8,3625	64,53	167,25
7	15566,6	1,5535	6,9	69,9075	138
8	12754,8	1,662	9,81875	74,79	196,375
9	14886,3	1,8555	9,75625	83,4975	195,125
10	13869,1	1,688	7,775	75,96	155,5
11	10049,3	0,935	5,6875	42,075	113,75
12	12612	1,5795	8,1375	71,0775	162,75
13	12473,7	1,6805	9,79375	75,6225	195,875
14	14950,8	1,702	8,13125	76,59	162,625
15	14741,3	1,7615	10,9438	79,2675	218,876
16	12410,1	1,6975	9,48125	76,3875	189,625
17	13634,7	1,5225	6,9	68,5125	138
18	10699,7	0,9035	5,325	40,6575	106,5
19	10485,6	1,201	7,675	54,045	153,5
20	17667,6	2,21625	10,2125	99,7312	204,25
21	13905,3	1,3985	8,8125	62,9325	176,25
22	13355,6	0,7975	3,6375	35,8875	72,75
23	15183,4	1,7895	10,0813	80,5275	201,626
24	12494,1	1,515	11,65	68,175	233
25	14273,7	1,6405	9,4625	73,8225	189,25
26	14071,9	1,421	6,3375	63,945	126,75
27	13780,2	1,43	7,075	64,35	141,5
28	14262,6	1,6295	8,78125	73,3275	175,625
29	11862,4	0,7665	3,925	34,4925	78,5
30	10619,5	0,6485	3,675	29,1825	73,5
Keskiarvo	13343,77	1,470242	8,030627	66,16087333	160,6125333
Maksimi	17667,6	2,21625	11,65	99,7312	233
Minimi	10049,3	0,6485	3,6375	29,1825	72,75

10.2 Pintavärianalyysi

Mikkelin ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa mitattiin Minolta Chroma meter – laitteella. Mittaukset suoritettiin 22.4.–27.4.2010. Kyseiset mittaukset suoritettiin höyryistä koekappalepinnoista. Laitteella otettiin jokaisesta pinnasta kolme mittausta. Näistä arvoista kone antaa keskiarvolukeman. Mittausarvoja otettiin käsitellyistä kappaleista 10/erä sekä vertailun vuoksi Puukeskuksen koekappaleista. Vertailukappaleista suoritettiin värimittaukset sekä Puukeskuksen että Ruotsista hankitusta sahatavarasta. Mittaustulokset ovat seuraavissa taulukoissa.

Taulukoissa 15 – 17 on luetteloitu saadut mittaustulokset. Tulokset on mitattu aluksi koekappaleiden lapepuolelta ja toinen mittaus kappaleen sydänpuolelta.

TAULUKKO 15 Vertailukappaleiden värimittaus**Vertailukappaleet
(pinta tai sydän)****(Puukeskus)**

nro	L	a	b	c
1	85,08	3,38	17,99	18,3
2	84,72	3,42	18,46	18,77
3	83,15	3,61	17,72	18,08
4	84,03	3,39	18,71	19,01
5	84,26	3,58	18,36	18,7
6	84,12	4,14	18,12	18,58
7	84,05	2,99	16,73	16,99
8	83,11	4,2	19,61	20,05
9	84,31	3,76	18,86	19,23
10	81,65	4,67	18,96	19,52
keskiarvo	83,848	3,714	18,352	18,723

**Vertailukappaleet
(pinta tai sydän)****(Ruotsi)**

nro	L	a	b	c
1	84,47	2,68	19,88	20,05
2	83,64	3,42	19,47	19,76
3	84,5	3,2	17,69	17,97
4	83,89	3,38	19,5	19,79
5	84,78	2,91	19,22	19,43
6	84,05	3,46	19,13	19,44
7	83,19	3,93	19,08	19,48
8	83,21	3,68	19,44	19,78
9	83,7	3,74	19,05	19,41
10	82,98	4,01	18,91	19,33
keskiarvo	83,841	3,441	19,137	19,444

(Minolta Chroma meter -värimittaus, huhtikuu 2010).

TAULUKKO 16 WTT – käsiteltyjen värimitaus

	WTT pinta			
nro	L	a	b	c
1	50,38	9,78	21,83	23,92
2	48,26	7,39	18,35	19,78
3	48,52	9,89	21,18	23,37
4	50,18	10,09	23,03	25,14
5	51,53	9,73	23,39	25,33
6	48,95	9,91	21,69	23,84
7	49,54	10,52	22,98	25,27
8	48,16	10,35	21,38	23,75
9	51,13	10,14	23,92	25,98
10	50,5	10,19	23,09	25,23
keskiarvo	49,72	9,8	22,08	24,16
	WTT sydän			
nro	L	a	b	c
1	45,56	10,28	20,02	22,5
2	48,78	10,34	22,63	24,88
3	49,76	10,01	22,2	24,35
4	46,45	10,4	20,19	22,71
5	47,97	10,53	21,08	23,56
6	49,25	10,46	22,8	25,08
7	47,12	10,49	21,66	24,06
8	46,81	10,01	20,21	22,55
9	46,29	10,96	21,32	23,97
10	50,55	10,03	22,06	24,23
keskiarvo	47,85	10,35	21,42	23,78

(Minolta Chroma meter -värimitaus, huhtikuu 2010).

TAULUKKO 17 ThermoWood – käsiteltyjen värimittaus**ThermoWoodkäsitelty värianalyysi**

	T pinta			
nro	L	a	b	c
1	50,23	9,04	21,96	23,74
2	47,67	8,74	19,77	21,61
3	44,87	9,39	19,69	21,81
4	51,76	8,94	22,12	23,85
5	51,69	9,22	22,21	24,04
6	48,21	8,97	20,5	22,37
7	49,3	9,59	21,12	23,19
8	50,72	9,58	21,52	23,55
9	51,03	9,01	21,09	22,93
10	53,31	8,97	22,44	24,16
keskiarvo	49,879	9,145	21,242	23,125
	T sydän			
nro	L	a	b	c
1	54,81	9,05	22,89	24,61
2	51,79	9,24	22,8	24,6
3	52,98	9,27	22,92	24,72
4	50,16	8,78	21,47	23,19
5	47,07	9,03	20,83	22,7
6	50,63	9,03	21,22	23,06
7	40,87	7,77	17,42	19,07
8	50,52	9,63	21,45	23,51
9	46,77	9,57	21,18	23,24
10	48,57	8,87	20,16	22,02
keskiarvo	49,417	9,024	21,234	23,072

(Minolta Chroma meter -värimittaus, huhtikuu 2010).

10.3 Koekappaleiden kosteudet

Kosteuksien määrittämisessä (taulukot 18 – 21) on käytetty testikappaleita, joiden dimensiot olivat 20mm x 20mm x 50mm. Tällöin voidaan todeta, että saadut kosteuspiitoisuudet vastaavat kosteutta taivutettaessa. Laskukaavassa on käytetty kappaleiden lähtöpainoa (20 °C ja Rh 40 %) sekä samojen kappaleiden kuivapainojen erotusta. Saatu tulos on jaettu edelleen kuivapainolla.

TAULUKKO 18 Vertailukappaleiden (WTT) keskiarvojen kosteus

Kosteuden määrittäminen	%
taivutettaessa	7,38

TAULUKKO 19 WTT – käsiteltyjen keskiarvojen kosteus

Kosteuden määrittäminen	%
taivutettaessa	6,33

TAULUKKO 20 Vertailukappaleiden (ThermoWood) keskiarvojen kosteus

Kosteuden määrittäminen	%
taivutettaessa	9,39

TAULUKKO 21 ThermoWood – käsiteltyjen keskiarvojen kosteus

Kosteuden määrittäminen	%
taivutettaessa	1,97

10.4 Tiheydet

Seuraavissa taulukoissa (22, 23) olevat tiheyden määritykset suoritettiin 27.4.2010, kun tiheyden määrittämiseen tarvittavat märkä- ja kuivapaino mittausarvot olivat käytössä. Vastaavat tulokset on myös esitetty kuvaajissa 7 -8. Tarkennukseksi vielä, että tiheys T_1 on mitattu tiheys märkäpainosta ja T_2 vastaavasti kuivapainosta.

TAULUKKO 22 Tiheyksien määritykset ThermoWood -koekappaleista

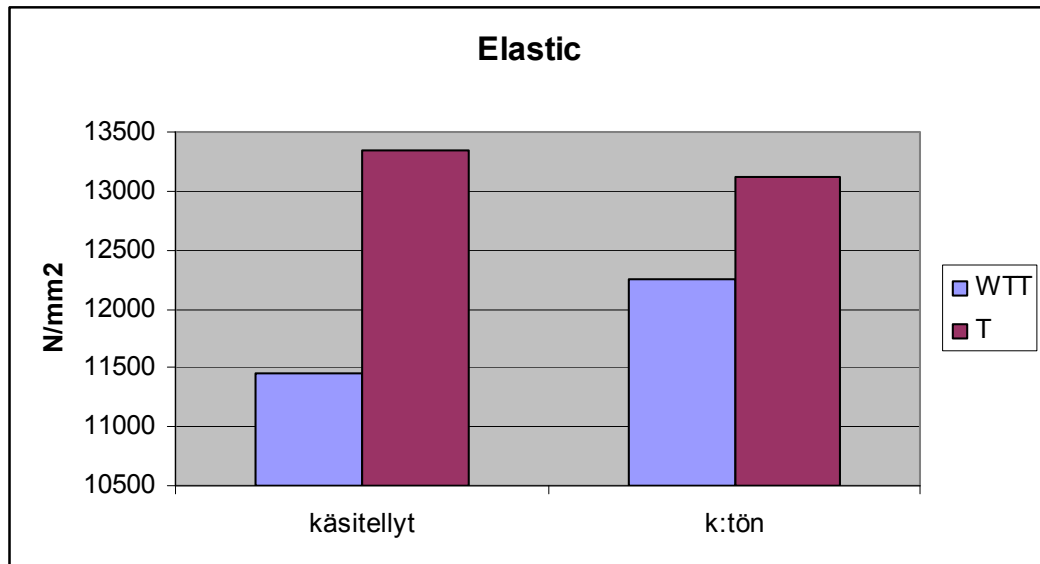
ThermoWood	
Tiheyden määrittäminen vertailukappaleista	
Tuoretiheys	
T ₁	0,460069 g/cm ³
Kuivatiheys	
T ₂	0,420569 g/cm ³
ThermoWood	
Tiheyden määrittäminen käsitellyistä	
Tuoretiheys	
T ₁	0,414519 g/cm ³
Kuivatiheys	
T ₂	0,406519 g/cm ³

TAULUKKO23 Tiheyksien määritykset WTT -koekappaleista

WTT	
Tiheyden määrittäminen	vertailukappaleista
Tuoretiheys	
T1	0,423255 g/cm ³
Kuivatiheys	
T2	0,39415 g/cm ³
WTT	
Tiheyden määrittäminen käsitellyistä	
Tuoretiheys	
T1	0,418048 g/cm ³
Kuivatiheys	
T2	0,393145 g/cm ³

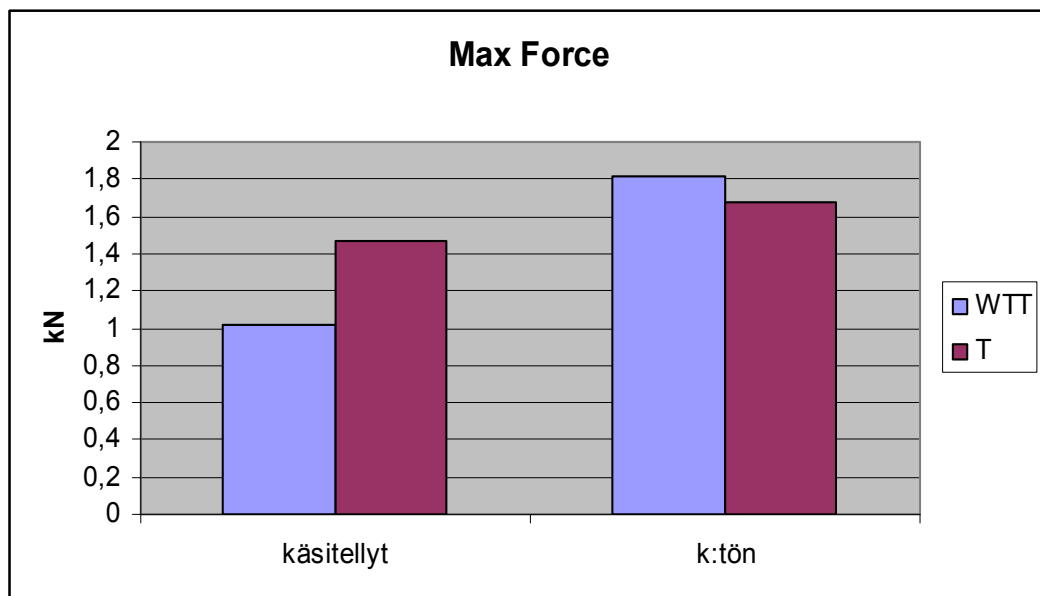
11 TULOSTEN ANALYSOINTI JA JOHTOPÄÄTÖKSET**11.1 Taivutuslujuudet**

Kuvaajasta 7 nähdään, että ThermoWood -käsittelyt koekappaleet ovat selkeästi elastisempia (kimmomoduuli saanut parhaimman arvon (13343,77 N/mm²). Sen sijaan WTT – käsittelyt koekappaleet ovat kimmomoduuliltaan matalimpia (11454,6 N/mm²). Ennen käsittelyä koekappaleet ovat lähes yhtä suuria. Mielenkiintoista on, että ThermoWood – käsittely on parantanut koekappaleiden kimmomoduulia. Se on saanut korkeimman arvon. Tarkastelussa on otettava huomioon koekappaleiden kosteudet taivutettaessa. WTT – vertailukoekappaleiden ja käsiteltyjen koekappaleiden kosteudet ovat melko samat (6,3 % /7,4 %), kuitenkin kimmomoduulit poikkeavat toisistaan selkeästi. Sen sijaan ThermoWood – vertailukoekappaleiden ja käsiteltyjen koekappaleiden kosteudet ovat hyvin erilaiset (9,4 % / 2,0 %).



KUVAAJA 7 WTT – koekappaleiden kimmomoduulit

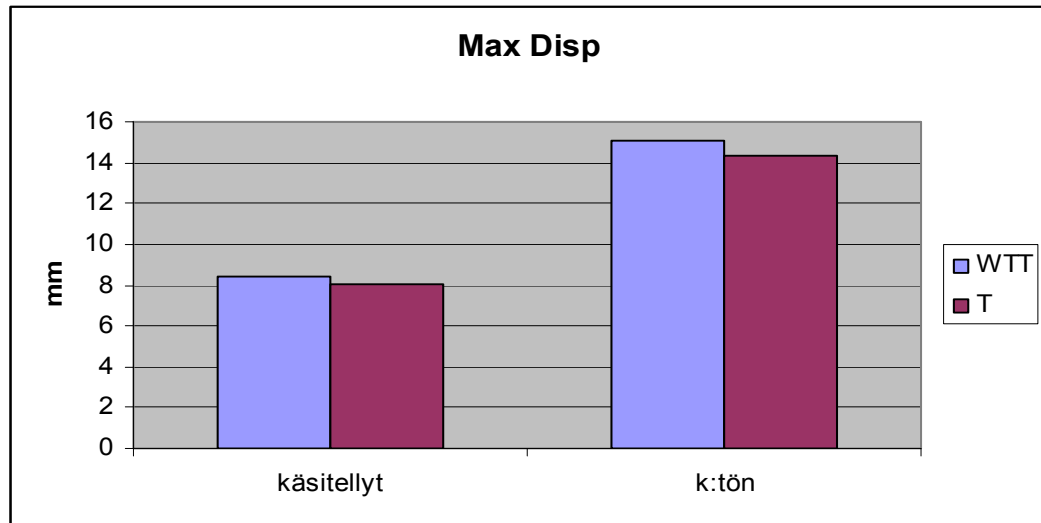
WTT:n käsittelemättömät koekappaleet ovat kestäneet taivutuksessa kovimman voiman (1,82 kN). Puukeskuksen materiaali on kestänyt hiukan huonommin (1,68 kN). Vaikka WTT:n käsittelemättömät koekappaleet olivat lähtötilanteessa parhaimpia, ovat ne käsittelyn jälkeen selkeästi huonontuneet (kuvaaja 8).



KUVAAJA 8 WTT -koekappaleiden taivutusvoimat

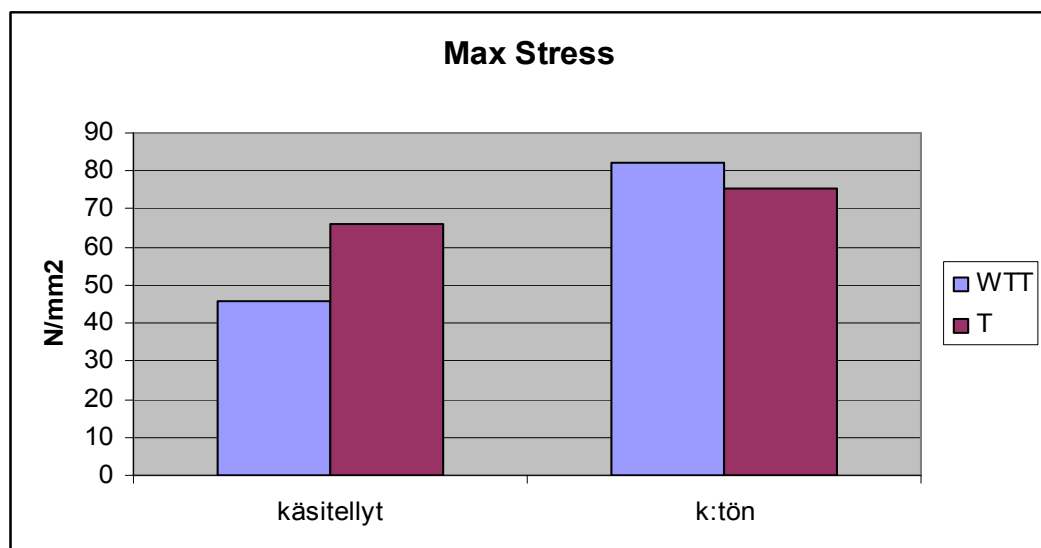
Taivutuksessa(käsittelemättömät koekappaleet ovat kohtisuorasti kestäneet parhaiten taipumaa (kuvaaja 9). Lähtötilanteessa ruotsalainen puumateriaali on taipunut eniten

(15,10 mm). WTT – käsitellyt koekappaleet ovat taipuneet nyt jopa hiukan enemmän (8,41 mm) kuin ThermoWoodin vastaavat koekappaleet (8,03 mm).



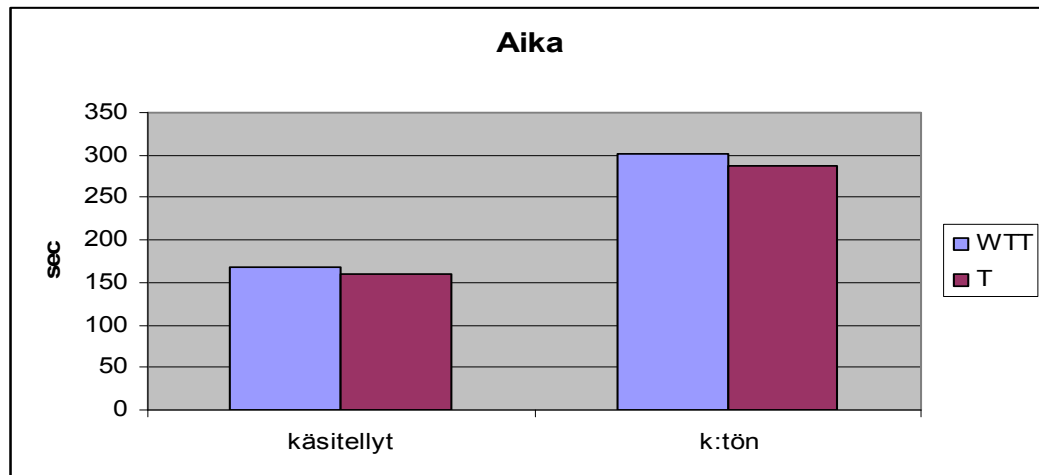
KUVAAJA 9 Pystysuora taivutusvenymä (mm)

Taivutuslujuuksissa (kuvaaja 10) voidaan huomata, että ThermoWood – käsitellyt koekappaleet ovat kestävämpiä (66,16 N/mm²) kuin WTT – käsitellyt (45,64). Sen sijaan WTT:n käsittelemättömät koekappaleet (82,11 N/mm²) ovat hiukan lujempia kuin vastaavat Puukeskuksen koekappaleet (75,5 N/mm²). Lämpökäsittelyssä WTT:n koekappaleet ovat menettäneet suhteessa lähtötilanteeseen enemmän lujuuttaan.



KUVAAJA 10 Koekappaleiden taivutuslujuudet

Kuvaajassa 11 nähdään selkeät erot taivutusajoissa. Käsittelemätön puu kestää taivutusta melkein kaksinkertaisen ajan.



KUVAAJA 11 Taivutusajat

11.2 Värianalyysi

Värianalyysissä saatiin vertailukappaleille (WTT / ThermoWood) suhteellisen samantyyppiset tulokset. L – arvot (83,85 / 83,84) olivat melko korkeita. Tämä tarkoittaa, että kappaleet olivat vaaleita.

Vastaavat L:n arvot olivat WTT – käsitellyillä ja ThermoWood -käsitellyillä koekappaleilla lähes samat (49,72 / 49,88). Näin huomataan, että kappaleiden numeraalinen arvo (vrt. vertailut) oli pienentynyt. Tällöin siis kappaleet olivat selkeästi tummuneet (lähestyttäessä lukua nolla, on värin kirkkaus lähempänä mustaa).

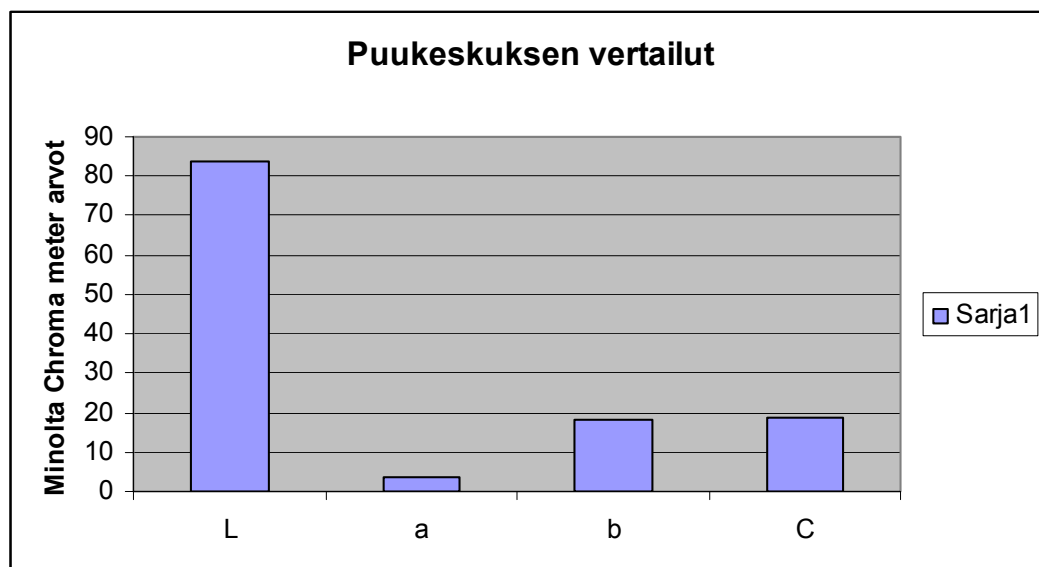
WTT – käsiteltyjen värimittauksen (pinta / sydän) L- arvot olivat: 49,87 ja 47,85. Tästä huomataan, että pinta oli hiukan vaaleampaa kuin sydän. Kyseinen seikka voi johtua itse lämpökäsittelyprosessista tai esimerkiksi siitä, että kyseiset kappaleet olivat myös kosteampia (6,33 %) kuin ThermoWoodin (1,97 %). Silmämääräisesti WTT – käsitellyt koekappaleet olivat selkeästi tummempia kuin ThermoWoodin käsittelemät. Kuitenkaan pintamittauksessa ei ollut suuriakaan eroja värin syvyysarvossa c (WTT 24,16 ja ThermoWood 23,13).

Värianalyysissä a – arvot WTT – käsitellyillä (pinta / sydän) oli 9,8 / 10,35. Pinta oli siten hiukan punaisempaa kuin sydän. Tai vastaavasti sydän oli hiukan punaisempaa. ThermoWood – käsiteltyjen vastaavat a:n arvot olivat 9,1 / 9,0, joten puuaines oli värjäytynyt varsin tasaisesti. Toisaalta ThermoWood – käsitellyt olivat hiukan vihreämpiä. Tämä voitiin havaita jo silmämääräisestikin.

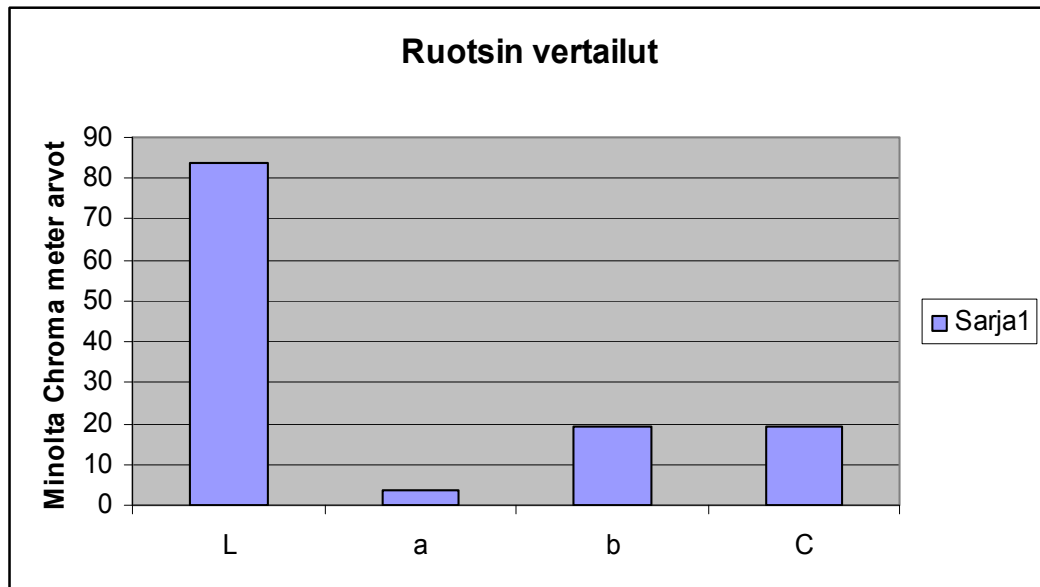
WTT – käsiteltyjen värimittauksen (pinta / sydän) b – arvot olivat: 22,08 / 21,42. Pinta oli siten hiukan keltaisempaa kuin sydän. ThermoWood – käsiteltyjen vastaavat b:n arvot olivat 21,24 / 21,23. Voidaan todeta, että puuaines oli värjäytynyt varsin tasaisesti.

Värianalyysin c – arvot olivat WTT – käsitellyillä (pinta / sydän) 24,16 / 23,78. Väriin syvyys oli siten hiukan suurempi pinnassa. ThermoWoodin vastaavat luvut olivat: 23,13 / 23,10. ThermoWoodin puuaines oli värjäytynyt väriin syvyysanalyysissä tasaisesti. WTT – käsitellyt olivat siten pinnaltaan hiukan ThermoWood – käsiteltyjä värikylläisempiä.

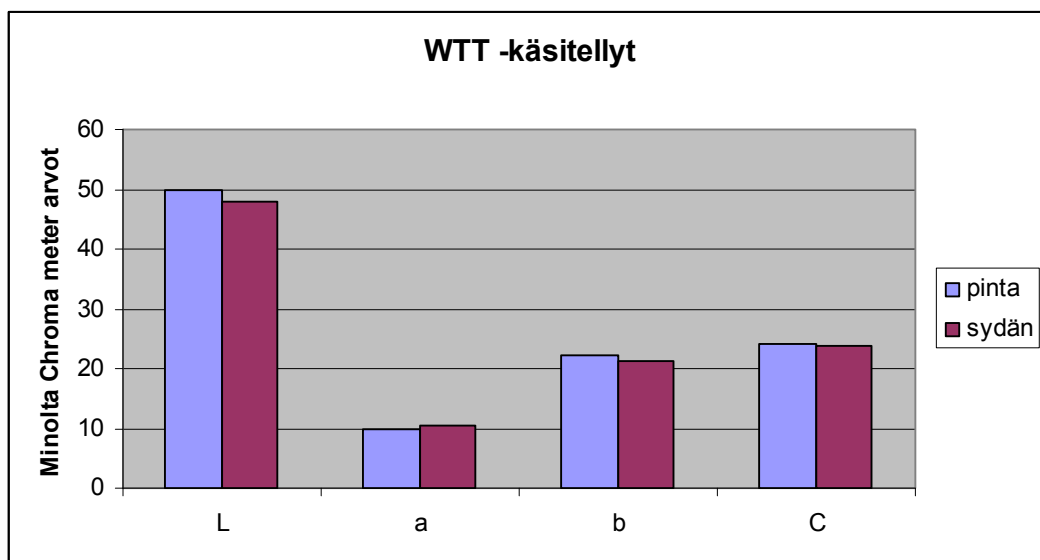
Seuraavissa kuvaajissa 12–15 ovat vastaavat lukuarvot esitetty pylväsdiagrammeina. ThermoWoodin värjäytymisen tasaisuus havaitaan selvästi.



KUVAAJA 12 ThermoWood – vertailukappaleiden värianalyysi

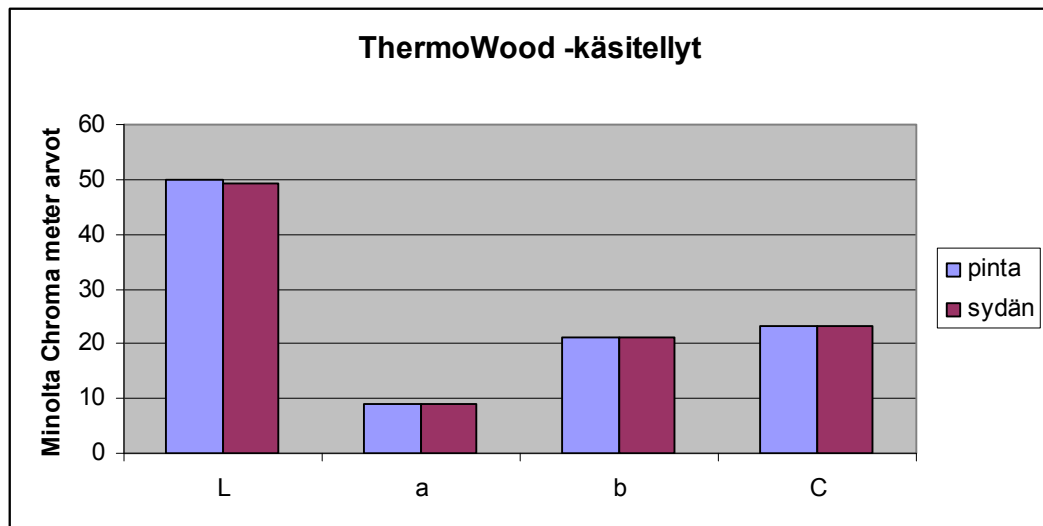


KUVAAJA 13 WTT – käsiteltyjen vertailukappaleiden värianalyysi



KUVAAJA 14 WTT – käsiteltyjen värianalyysi

Kuvaajassa 15 voidaan nähdä, että värisävyt olivat lähes yhtä tummat käsitellyillä, vaikka käsittelylämpötiloissa oli selkeä ero.



KUVAAJA 15 ThermoWood – käsiteltyjen värianalyysi

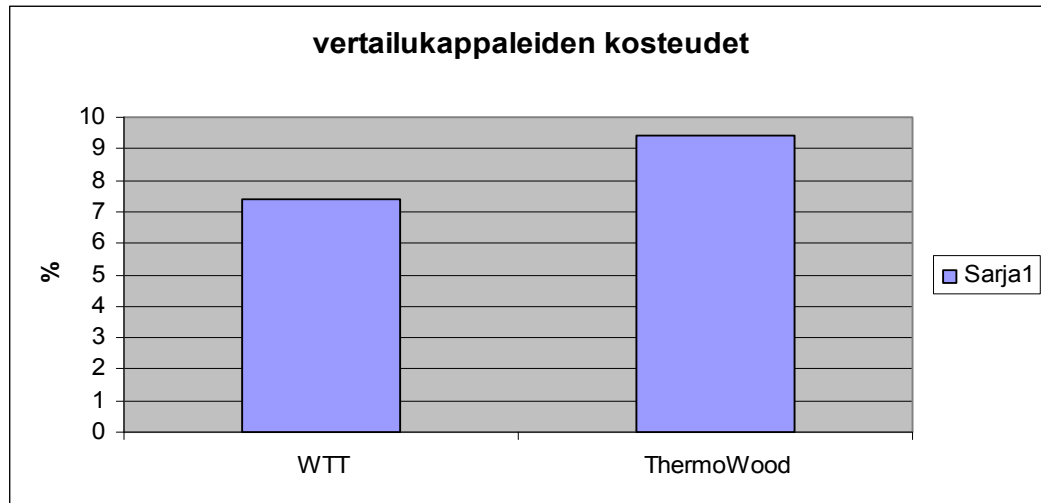
11.3 Kosteudet

WTT – vertailukoekappaleet olivat kuivempia kuin ThermoWoodin (7,38 % / 9,39 %). Vastaavasti kuivauskäsittelyn jälkeen (18 tuntia ja 103 °C) olivat ThermoWoodin käsitellyt koekappaleet huomattavasti kuivempia kuin WTT- käsitellyt (1,97 % / 6,33 %).

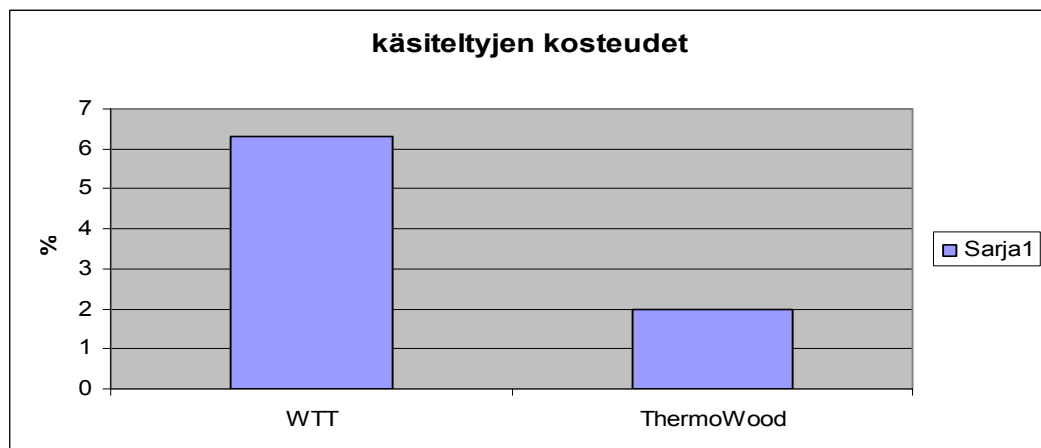
Asiaan on voinut vaikuttaa useampikin seikka. WTT – käsittely oli tapahtunut Ruotsissa tammikuussa ja ThermoWood – käsittely Mikkelissä huhtikuussa. Tästä johtuen jo ajallinen eroavaisuus tulee ottaa huomioon. Myöskään varmaa tietoa ei ole nyt käytössä, kuina WTT – koekappaleita oli säilytetty Ruotsissa. Selvää kuitenkin on, että WTT:n puuainees oli nyt tehdyissä testeissä kuivempaa kuin sen vertailukappaleet. Yllättävän suuri ero syntyi ThermoWoodin vertailu -ja käsiteltyjen koekappaleiden välillä (erotus 7,42). ThermoWood – käsitellyistä koekappaleista poistui siis runsaammin vettä sekä muita aineita. Toisaalta myös lähtötilanteessa ne olivat jo kosteampia kuin WTT – käsitellyt koekappaleet. ThermoWood (212 °C) tasapainokosteus kyseisissä olosuhteissa oli noin 4 – 5 %, joten se oli käsittelyn jälkeen vielä hieman liian kuivaa.

Alla olevissa kuvaajissa (16,17) on esitetty koetulokset pylväsdiagrammeihin. ThermoWood -käsiteltyjen veden menetys on ollut runsas. Toisaalta WTT – testauksen arvot olivat tasaisemmat. Yhteenvedon voidaan todeta, että ThermoWood – testeissä tapahtui suurempi muutos kuin WTT:n. Tämä on myös prosessiero. ThermoWood –

käsittelyssä puu kuivuu lähes absoluuttisen kuivaksi, kun WTT – prosessissa ei ylipaineen vuoksi kosteutta poistunut puusta.



KUVAAJA 16 WTT – ja ThermoWood – kosteuserot vertailukappaleilla



KUVAAJA 17 WTT – ja ThermoWood – kosteuserot käsitellyillä

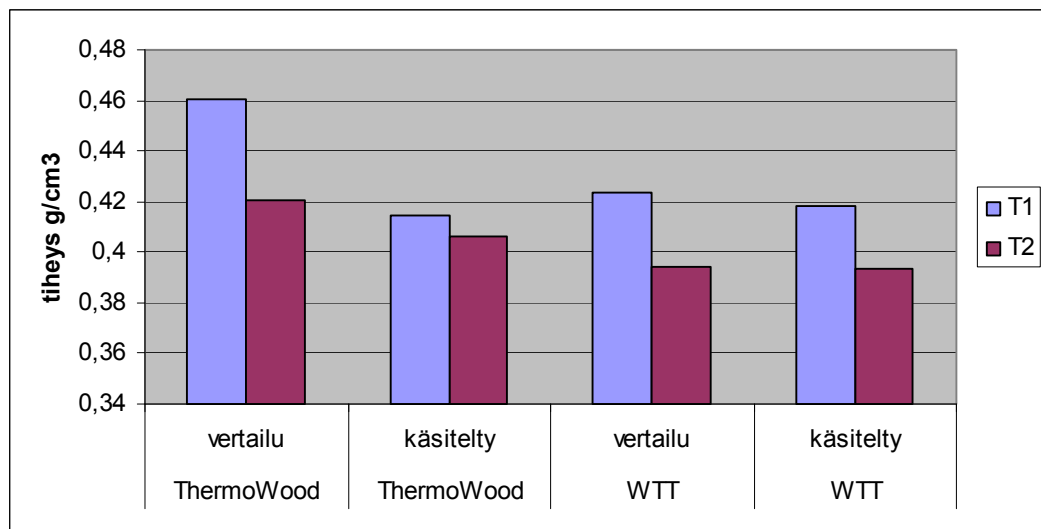
11.4 Tiheydet

Tiheyksistä määriteltiin erikseen T_1 ja T_2 -arvot. Ensimmäisen määrittelyssä käytettiin laskukaavassa dimensiokappaleiden märkäpainoja. Vastaavasti jälkimmäisessä käytettiin kappaleiden kuivapainoja. Kaikki testikappaleet punnittiin ennen ja jälkeen kuivausuunikäsittelyä (103 °C). Testikappaleet olivat tuolloin absoluuttisen kuivia.

WTT – käsiteltyjen koekappaleiden (vertailu / käsitellyt) T_1 – tiheydet olivat samaa luokkaa: 0,42 g / cm³. Myös niiden vastaavat T_2 -arvot olivat samat: 0,39 g / cm³.

ThermoWood – vertailukappaleiden T₁ – tiheys sen sijaan oli 0,46 g / cm³, kuin ThermoWood – käsiteltyjen vastaavat arvot olivat 0,41 g / cm³. ThermoWood – käsiteltyjen T₂ – vertailukappaleista oli 0,42 g / cm³. ja vastaava arvo käsitellyistä oli 0,41 g / cm³.

Kuvaajassa 18 nähdään, että pienin muutos tiheyksissä tapahtui ThermoWood – käsitellyillä koekappaleilla. Koetulosten tiheydet jakautuvat 0,39 g / cm³ - 0,46 g / cm³ välille.



KUVAAJA 18 ThermoWood -koekappaleiden tiheydet

ThermoWood – koekappaleiden kosteus on pienin, joten tämän vuoksi tiheyksissä ei ole suurta eroa. ThermoWoodin kuivatiheydestä voidaan päätellä, että sen prosessissa on poistunut muutakin ainetta kuin vettä. Siinä on tapahtunut painohäviötä enemmän kuin WTT – prosessissa.

12 POHDINTA

Taivutustestien tekeminen oli aika työlästä. Itse testauslaitteiden käyttö ei ollut kovin vaikeaa. WTT – käsitellyn kuusen selkeästi huonommat mittaustulokset yllättivät. Sen sijaan kyseisen käsittelyn tuoma kaunis värisävy miellytti. ThermoWood – käsitelty kuusi oli silmämääräisesti vaaleampaa kuin WTT:n.

ThermoWoodin saamat kimmomoduuli – mittaustulokset olivat myös odotettua paremmat ja vastaavasti WTT:n odotettua huonommat. Näin siitä syystä, että ThermoWoodin käsittelylämpötila on korkeampi (212 °C) kuin WTT:n (170 °C). Tulevissa testauksissa kannattaisi ehkä vertailla WTT – käsiteltyjä koekappaleita keskenään, koska nyt niiden saamat kosteudet olivat melko samanlaiset.

Voidaan todeta, että ruotsalainen kuusisahatavara oli varsin hyvää verrattuna suomalaisen kuuseen ennen käsittelyä. Sen sijaan WTT – käsittely heikensi koekappaleiden taivutuslujuutta selvästi enemmän kuin ThermoWood – käsittely.

ThermoWood – käsittely osoittautui testauksissa varsin tasalaatuiseksi. Tehtävän aseteluna oli löytää mahdollisimman hyvä lämpökäsittelymuoto kuuselle, jossa sen lujuusominaisuudet olisivat parhaat. Tämän tutkimuksen mukaan ThermoWood – käsittely on selkeästi parempi. Edelleen pohdittaessa, käyttääkö ThermoWood – käsiteltyä kuusta rakenteissa vai WTT – käsiteltyä, on vastaus varsin ilmeinen. Rakentamisessa kiinnitetään huomio varsinkin sahatavaran kimmomoduuli – lukuarvoihin. Nyt voidaan verrata ThermoWood – käsiteltyä ja WTT – käsiteltyä kuusisahatavaraa kimmomoduulien osalta. Suhde on $(13343,77 \text{ N/mm}^2 / 11454,6 \text{ N/mm}^2)$ 1,16 ThermoWoodin eduksi. Tulee kuitenkin huomioida näiden kahden eri lämpökäsittely – prosessien kosteuserot, joilla voisi olettaa olevan merkitystä nyt saatuihin kimmomoduulien tuloksiin.

Taivutustestaukset suoritettiin Shimadzu – aineenkoestuskoneella, johon testin lähtösäätö voimalle asetettiin välille 0,2–0,6 kN. Tästä johtuen, WTT – käsiteltyjen koekappaleiden mittaustulosta voidaan hiukan tarkentaa. Koe – erän kappalemäärä oli 30. Kimmomoduulien osalta kuudessa testikappaleessa saadaan nolla tulos, joka vaikuttaa keskiarvoon huomattavasti. Kuitenkin kyseisillä kuudella kappaleella on ollut jonkinlaista elastisuutta, mutta ne ovat jääneet alle 0,2 kN ja tuloksiin ne kirjautuvat nollana.

Kuusen lujuusominaisuudet heikkenevät olennaisesti lämpötilan kohotessa yli 200 °C:n ja WTT – käsittely suoritettiin 170 °C:ssa. Näin olisi voitu olettaa, että WTT – käsittely olisi antanut selkeästi paremmat tutkimustulokset kuin nyt tapahtui. Toisaalta kuusen taivutuslujuus ei ole kovinkaan korkea, verrattuna muihin puulajeihin. Kärkkäinen kirjassaan Puutieteen perusteet (2004, 216) esittää kuusen taivutuslujuusarvoksi vain 85,7 Mpa. Kun esimerkiksi koivun kohdalla vastaava arvo on 107,1 MPa.

Lämpökäsittely – prosessit suoritetaan korkeissa lämpötiloissa ja varsin nopeasti. Tulevaisuudessa olisi mielenkiintoista tehdä lämpökäsittelytestausta pidemmällä prosessiajoilla. Nyt suoritetussa ThermoWoodin – prosessissa tasaannutus jäi liian vähäiseksi höyrykehittimen häiriön vuoksi.

LÄHTEET

Aavakallio, Timo 2010. Projektipäällikkö. YTI. Mikkeli. Henkilökohtaisia tiedonantaja huhtikuussa 2010

Kärkkäinen, Matti 2003. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Karisto Oy.

Lämpöpuuyhdistys Ry. Hyvä tietää lämpöpuusta. WWW-dokumentti. <http://rakentaja.fi/pdf/puuinfo/lampopuu.pdf> 004332200510111504_Thermofi.pdf. Päivitetty 26.8.2005. Luettu 4.1.2010.

Lämpöpuuyhdistys Ry. RTF-dokumentti. TheWood käsikirja. 2004. http://www.thermowood.fi/data.php/200401/914711200401161255_TWkasikirja.pdf Päivitetty 13.1.2004. Luettu 12.2.2010.

Lämpöpuuyhdistys ry. WWW-dokumentti. Tuoteluokitus. <http://www.thermowood.fi/index.php?anonymous=thermofin>. Ei päivitystietoja. Luettu 20.1.2010.

Mikpolis Oy. Materiaalitekniikka. WWW-dokumentti. <http://www.mikpolis.fi/vtk/capability.php?id=1&language=en>. Ei päivitystietoja. Luettu 19.1.2010.

Minolta Chroma meter CR-210. Värianalyysi. WWW – kuvat. http://labstuff.eu/images/product_images. Ei päivitystietoja. Luettu 29.4.2010.

Möller, Otranan 1999. Ympäristötekniikan instituutin julkaisuja 4. Mikkeli:YTI

Pennala, Erkki 1999. Lujuusopin perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.

Puumerkki. ThermoWood –käsikirja. WWW-dokumentti. http://www.fi/files/103/TW_kasikirja.pdf. Päivitetty 13.1.2004. Luettu 10.12.2009.

Pylvänäinen ja Virkkunen. Esitutkimusraportti. Mamk. Huhtikuu 2009.

Standardi. Biologinen kestävyys. (EN 113, ENV 807)

Standardi EN 350-1 1994. Lahonkeston luokitus. Ei päivitystietoja. Luettu 19.1.2010.

SFS-Standardisointi. WWW-dokumentti. F:\standardi\SFS-Standardisointi.mht.Kansainväliset nelipistetäivutusohjaat.Ei päivitystietoja. Luettu 19.1.2010.

The Plant Cell. WWW-diasarja. <http://cc.oulu.fi/~ssaarela/ksb4.ppt.html>. Ei päivitystietoja. Luettu 22.1.2010.

The Plant Cell / Soluseinä. Solubiologian luennot 2003, kasvitiede. <http://www.slidefinder.net/K/ksb4/10160305>. Ei päivitystietoja. Luettu 23.1.2010.

Torniainen, Petteri. Reseace ingenjöö. Swedish University of Agricultural Siences. Henkilökohtainen tiedonanto 12.4.2010

Viitaniemi, Pertti & Jämsä, Saira 1996. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. Espoo: VTT Offsetpaino.

A Novel Economic Large-scale Production Technology for High-quality Thermally Modified Wood

Wim Willems

FirmoWood Nederland BV, Metaalweg 9, 5804 CG Venray, The Netherlands [email:
willems@houtdrogerij.nl]

Keywords: Hygroscopic equilibrium, pressure autoclave, production technology, shrinkage stress, thermally modified wood

ABSTRACT

A modified and expanded version of Burmester's technique for thermal treatment of wood in a pressure autoclave is presented here. Using a simple and accurate control strategy, the wood is kept near hygroscopic equilibrium with its surroundings during the entire treatment cycle. Treatment-induced internal wood stresses and associated wood degrade are thus minimized. The autoclave is completely closed during the treatment cycle and is by definition devoid of emissions of volatile organic substances. Consequently, reactive volatiles stay available for re-incorporation into the wood matrix, for the purpose of optimizing both strength properties and biological durability, achieved at moderately high temperatures between 160 and 190 °C. The technique is suitable for economic large-scale industrial production of high-quality thermally modified timber. The first plant using this technology has commenced operation in the Netherlands.

INTRODUCTION

The effects of heat treatment on wood are known for almost a century, but their large scale industrial application has waited until the emergence of interest in environmentally benign means of wood preservation, two decades ago. Thermally modified timber was envisioned to become an important alternative for CCA-treated wood and very durable natural wood species, but is today mainly found in lesser demanding applications, utilising its appealing appearance (darkened colour) and reduced moisture swelling property, with a limited degree of biological durability enhancement. Judged from the scope of technical possibilities with thermal modification and its environmental profile, the present market size might be expected to be much larger than it actually is. The inhibiting factors for substantial market growth are analysed in the next section. Then, a novel production technique is presented which is specifically designed to diminish these inhibitors.

COMMERCIAL CONSIDERATIONS

Wood modification treatments upgrade wood as a raw material into a new raw material with one or more improved properties. The added value of this transformation must outweigh the costs to create it. The business case for thermally modified wood has to cope with a number of difficulties, imposed by the high quality requirements on the input material, the competition by alternative raw materials and the high production, development and marketing costs. High-value markets, *e.g.* the wall cladding market, have been found for heat treated high-quality natural wood species, providing the basis

for a growing wood heat treatment industry. Beneath these niche markets, there are huge volume markets, wherein thermally modified timber could compete technically, but not yet economically. A choice for adding extra value by adjacent conversion of relatively too expensive thermally modified timber into finished products would not fundamentally improve the business case for the heat treatment. For a more sound approach to open new markets for thermally modified timber, one might try taking a route via a process improvement requiring input material of a less stringent quality. Such an attempt is undertaken and described in the next section.

TECHNOLOGICAL CONSIDERATIONS

Wood moisture content

The presence of moisture in wood presents great difficulties in heat treatment. During the heat treatment cycle, steam pressure and moisture gradients in wet wood can cause severe structural damage. The usual way to reduce this problem is to carefully dry the wood to a low moisture content at a sufficiently low temperature before exposing it to the high-temperature regimes in the heat treatment cycle (Johansson 2006, Boonstra *et al.* 2006). In all heat treatment processes known to the author, wood will eventually reach a high temperature oven dry state, where shrinkage stresses due to the structural anisotropy and inhomogeneity of wood reach a maximum (Cheng *et al.* 2007). Conversely, if the oven dry state could be avoided in the heat treatment cycle, a lower threshold on input timber quality can be used – with an important economic advantage. Following this premise, a novel heat treatment technology is introduced.

Hygroscopic equilibrium

Using the principles of kiln drying, wood can be brought in a hygroscopic equilibrium with its environment: for any given wood species at a given temperature there is a water vapour pressure in equilibrium with its moisture content, i.e. which avoids drying. In the temperature range for pre-dried (*ca.* 12% MC) wood modification the required water vapour pressures for hygroscopic equilibrium are well above atmospheric pressure and must be contained in a pressure autoclave.

Thermal modification

The system of pre-dried wood, interacting with pressurized superheated steam, has been shown (Burmester 1973) to produce chemical reactions in carbohydrates and lignin, giving the characteristic properties of thermally modified timber. Moreover, the typically used temperatures in pressurized steam environments, 160-190 °C (Tjeerdsma *et al.* 1998), are about 50 °C lower than with dry heating (Weiland & Guyonnet 2003) at the same level of modification. The pressurized steam offers therefore the possibility of multiple simultaneous functions: to establish a hygroscopic equilibrium, to lower the treatment temperature and/or to shorten the production time. These three functions all contribute to the economy of the process, but are mutually dependent and must be optimized for each treatment schedule dedicated for a particular wood species.

Closed system

Keeping the system gas-tight during the heat treatment has the advantage of having no volatile organic emissions during production time and keeping reactive volatiles available for repolymerization reactions.

Process Reactor

First, consider a 2.0 m diameter fast-opening door jacketed pressure autoclave, heated with temperature controlled oil circulating through the heating jacket. The timber (a 20 mm stickered timber stack 1.20m x 1.20m x 6m) and a suitable quantity of liquid water are put in the inner pressure compartment, which is evacuated to about 0.1 bar (abs). Then it is slowly heated allowing equilibration between the wood moisture content, the water and the vapour. This setup is an enlarged version of Burmester's classical experiment. It has several limitations on this large scale, like a very slow heating and equilibration rate, a lacking active water vapour pressure control, and virtually no means of keeping equilibrium during the evolution of the modification reactions as well as during the heating and cooling trajectories. Nevertheless, early experiments at a temperature of 180 °C using this simple setup showed very promising biological durability EN113 and ENV807 test results on European wood species fir, spruce, pine, beech, ash and oak, but with poor (casehardened) structural properties (Ohnesorge *et al.* 2008) as a result of uncontrolled excursions from hygroscopic equilibrium during the treatment cycle.

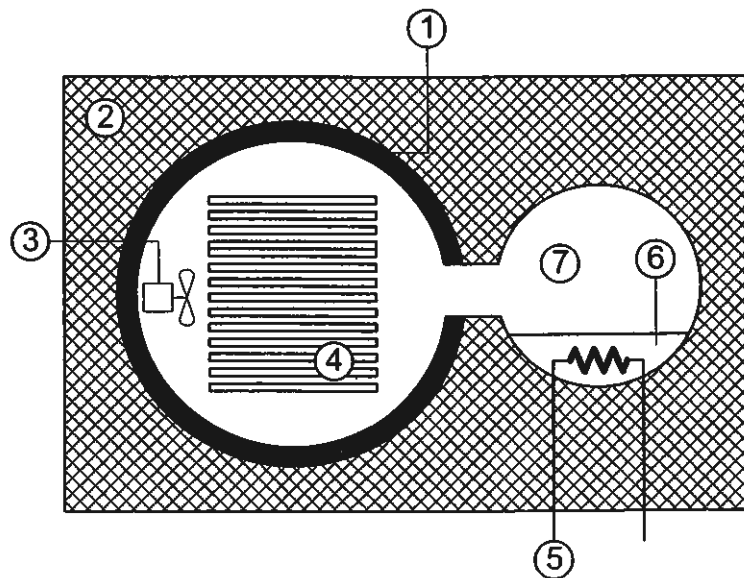


Figure 1: Schematic drawing of the Firmolin® technique. 1=heating jacket of pressure autoclave, 2=thermal insulation, 3=fan, 4=timber stack, 5=heating element, 6=water reservoir, 7=water vapour.

The next generation setup (Figure 1) consists of two connected pressure compartments (Willems 2008) and has recently been built and tested in the Netherlands. The left wing compartment is the just described jacketed autoclave with the same cross-sectional dimensions, extended to 13.5 m length and equipped with a heavy duty fan for vapour circulation. The right wing compartment is a temperature controlled, directly heated water reservoir. This setup provides a fast and accurate control of both vapour temperature T_{vap} and water vapour pressure, via the heating jacket temperature and the water reservoir temperature T_{res} respectively. From the $(T_{\text{vap}}, T_{\text{res}})$ set of temperatures the relative humidity (RH) of the vapour can be calculated (Eqn. 1).

$$\text{RH}(\%) = (P_{\text{sat}}(T_{\text{res}}) / P_{\text{sat}}(T_{\text{vap}})) \times 100 \quad (1)$$

where RH is the relative humidity and $P_{\text{sat}}(T)$ is the saturated water vapour pressure at a given temperature T . In the 2-compartment setup heat treatments can be performed under fully controlled climatic (T_{vap} , RH) conditions. This heat treatment technology has been patented and given the name Firmolin®, the contraction between the Latin words *firmo*- (strong, durable) and *-lin*, abbreviated from *lignum* (wood).

DISCUSSION

During the heat treatment several physical and chemical transformations are taking place in wood, which have an effect on its hygroscopicity as well as the moisture content (MC). Both changes cannot be quantitatively captured *on-line*, which makes the control of MC unfeasible. Instead, the measured wood temperature and the RH of the surrounding vapour are controlled via the process temperatures (T_{vap} , T_{res}), whilst the MC is allowed to self-adapt to the shifting hygroscopic equilibrium. Since the initial MC is ca. 12% and the hygroscopic equilibrium changes smoothly, both the magnitude and the rate of MC-changes remain acceptably low.

By performing the thermal modification of wood at a suitable MC in hygroscopic equilibrium, continued drying to the oven dry state is evidently avoided. The question that must be addressed here is whether it *should* be avoided, apart from the prospect that it diminishes wood degrade losses. Concerns might be risen whether certain chemical reactions in the later stages of the modification process, the dehydration and cross-linking reactions, will sufficiently develop. To shift the reaction equilibria towards the dehydration and condensation products, the removal of water (a co-product) might be required. On the other hand, in batch reactors for the production of furfural (a dehydration product) from xylan hemicellulose, condensation type loss reactions occur in a saturated steam environment up to 200°C (Zeitsch 2000). In steam treated lignin at 185 to 220 °C depolymerization and repolymerization reactions are taking place simultaneously (Li *et al.* 2007). They show that the repolymerization reactions eventually prevail, producing stable carbon-carbon cross-links between lignin units, again in a saturated steam environment. These results indicate that there is no necessity to perform heat treatments in the oven dry state.

Although process optimization efforts are ongoing, some statements about economy of the Firmolin®-technology can already be made. The pressure equipment needed for this technology requires a slightly larger capital investment (treatment volume based) in comparison to dry heating thermal modification kilns. During the treatment cycle wood releases water as well as some polluting organic substances, which are added to the water reservoir. After each treatment cycle excess water must be decanted and properly disposed of, which is a cost component. Against the extra costs there are decisive cost-reducing factors: shorter treatment time, lower treatment temperature, less wood degrade, lower quality requirements on input material.

CONCLUSIONS

It is beneficial to perform thermal modification treatments on pre-dried wood in hygroscopic equilibrium with superheated steam by using a dedicated pressure autoclave. Such a process is less dependent on timber of the best available quality. The presented Firmolin®-technology offers a fast and accurately controlled process to perform this type of heat treatments. Its economic figure promises opportunities in new

REFERENCES

- Boonstra, M.J., Rijdsdijk, J.F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., van Acker, J. and Stevens, M. (2006). Microstructural and physical aspects of heat treated wood. (2006). Part 1. Softwoods. *Maderas. Ciencia y tecnologia*, **8**, 193-208.
- Burmester, A. (1973). Einfluß einer Wärme-Druck Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **31**, 237-243.
- Cheng, W., Morooka, T., Wu, Q. and Liu, Y. (2007). Characterization of tangential shrinkage stresses of wood during drying under super-heated steam above 100 °C. *Forest Products Journal*, **57**, 39-43.
- Johansson, D. (2006). Influences of drying on internal checking of spruce (*Picea abies* L.) heat-treated at 212°C. *Holzforschung*, **60**, 558-560.
- Li, J., Henriksson, G. and Gellerstedt, G. (2007). Lignin depolymerization/ repolymerization and its critical role for delignification of aspen wood by steam explosion. *Bioresource Technology*, **98**, 3061-3068.
- Ohnesorge, D., Tausch, A. and Becker, G. (2008). Hygro-thermally treated timber – An alternative to wood preservation? Presented at: *58th WEI-IEO Congress*. Lausanne, Switzerland.
- Tjeerdsma, B.F., Boonstra, M.J., Pizzi, A., Tekely, P. and Militz, H. (1998). Characterization of thermally modified wood: reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **56**, 149-153.
- Weiland, J.J. and Guyonnet, R. (2003). Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **61**, 216-220.
- Willems, W.P.M. (2008). *International patent application*. Publication No. WO 2008/079000 A1.
- Zeitsch, K.J. (2000). *The Chemistry and technology of furfural and its many by-products*. Sugar Series **13**, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

LIITE 2(1).

ThermoWood - vertailukappaleiden taivutuskuvaukset

1 =5V	poikki
2 = 28V	keskellä sälö
3 = 21V	keskellä sälöjä, muutoin ehjä
4 = 29V	keskellä pieni sälö
5 = 23V	kummastakin taivutuspuisteestä sälöillä, suorasyinen ja oksaton
6 = 25V	katkesi osiin, pieni oksa, josta ei katkennut
7 = 21V	keskellä sälöjä, muutoin ehjä ja oksaton
8 = 15V	keskeltä poikki ei oksia
9 = 26V	vähän sälöjä, muutoin ehjä
10=6V	melko suora
11=14V	poikki, kolme pientä oksaa eivät vaikuttaneet
12=31VA	pieniä sälöä, muutoin ehjä
13=19V	keskeltä sälöillä, pieni oksa ei vaikuttanut
14=27V	keskellä sälö
15=12VA	keskellä sälöä ja kaksi pientä oksaa
16=12VB	murtui toisesta taivutuskohdasta, suorasyinen eikä oksia
17=32V	hiukan sälöä, ei poikki, suora ja oksaton
18=22V	hiukan sälöjä, yhtenäinen
19=10V	keskeltä murtui pala irti
20=11V	räpsähti rikki, pala irti, ei oksia
21=3V	ehjä, suorasyinen ja oksaton
22=26V	ehjä, suorasyinen

23=4V	ehjä
24=9V	toisessa taivutusasteessa pientä sälöä, muutoin ehjä ja oksaton
25=16V	keskeltä pieni tikku, joka kiinni, muutoin suora ja ehjä
26=24V	ehjä, suorasyinen, oksaton
27=13V	keskellä sälö, muutoin ehjä ja suora
28=31VB	täysin poikki, ei oksia
29=16V	hiukan taipunut keskeltä, muutoin ehjä
30=2V	keskellä sälöjä, ei oksia

LIITE 2 (2).

ThermoWood – käsiteltyjen taivutuskuvaukset

- | | |
|---------|---|
| 1 =T5 | keskeltä sälöinä, muutoin yhtenäinen |
| 2 =T28 | päästä asti lähes loppuun iso sälö, keskellä pieni oksa |
| 3 =T21 | pieni sälö kiinni, melko suora, oksaton |
| 4 =T29 | keskeltä loppuun sälö, suora, oksaton, yhtenäinen |
| 5 =T23 | halkeama keskellä kiinni, suora, oksaton |
| 6 =T25 | kaksi oksaa, isommasta räpsähti poikki |
| 7 =T27A | keskellä pieni sälö kiinni, suora, oksaton, napakka |
| 8 =T15 | keskellä sälö kiinni, suora, oksaton |
| 9 =T26 | päästä 1/3-levyinen sälö kiinni, suora, oksaton |
| 10=T6 | räpsähti, keskellä sälö kiinni, suora, oksaton |
| 11=T14 | täysin poikki 1/3-kohdalta, hauras, oksaton |
| 12=T31 | keskeltä poikki, sälöjä, hauras, suora, oksaton |
| 13=T19 | päästä ¼ sälö melkein koko kappaleen läpi, hauras, suora, oksaton |
| 14=T27B | pieni sälö keskellä, napakka, tiheäsyinen |
| 15=T12 | keskellä pientä kiinteää sälöä, suora, oksaton, napakka |
| 16=T18 | keskellä irtonaista sälöä, oksaton, nopeakasvuinen |
| 17=T32 | poikki päästä 1/3-kohdalta, sälöjä |
| 18=T22 | iso sälö keskellä, hauras, suora |
| 19=T10 | poikki sälömäisesti melko keskeltä |
| 20=T11 | keskellä sälöjä, kaksi pientä oksaa, yhtenäinen |
| 21=T3 | keskeltä sälömäisesti rikki oksan kohdalta, yhtenäinen |
| 22=T20 | keskeltä sälömäisesti rikki oksan kohdalta, yhtenäinen |

- 23=T4A päästä noin ½-väliin kiinteä pitkä sälö, suora
- 24=T9 keskellä kiinteää sälöä, hauras, hiukan lenko, yhtenäinen
- 25=16 räpsähti kahden oksan kohdalta, lenko, yhtenäinen
- 26=T24 yksi sälö säteen suuntaisesti ei keskellä olevien kahden oksan kohdalta
- 27=T31 täysin halki pitkittäin kesäpuun kasvukohdalta
- 28=T4B keskellä pientä sälöä, vinosyinen, ehyt, oksaton
- 29=T2A käytännössä poikki, toisesta taivutuskohdasta pystyyn murtuen
- 30=T2B ei aivan poikki, toisesta taivutuskohdasta pystyyn murutuen

LIITE 2 (3).
WTT – vertailukappaleiden
taivutuskuvaukset

- | | |
|--------|---|
| 1 =W9 | hiukan sälöä, räpsähti oksan kohdalta |
| 2 =W6 | suorasyinen, ehyt |
| 3 =W8 | keskeltä lähes poikki, sälöä runsaasti |
| 4 =W2 | yksi kiinni oleva sälö, suorasyinen, oksaton |
| 5 =W3 | yksi kiinni oleva sälö, suorasyinen, oksaton |
| 6 =W1 | sälö keskellä, ei oksien kohdalla, kaksi oksaa päissä |
| 7 =W5 | sälö kiinni, suorasyinen, ehjätkö |
| 8 =W10 | ei sälöjä, kaksi pientä oksaa |
| 9 =W7 | yksi kiinni oleva sälö, oksaton |
| 10=W4 | sälöinä keskeltä, yksi oksa päissä |

LIITE 2 (4).

WTT – käsiteltyjen taivutuskuvaukset

- 1 =WT5 sälöjä, ehjä kappale, yksi oksa
- 2 =WT3A ehjä, oksa päässä
- 3 =WT4A poikki, pihkataskun vierestä
- 4 =WT4B poikki pystysuorasti murtuen
- 5 =WT17 yksi sälö keskellä, yksi oksa keskellä, ehyt
- 6 =WT27 sälöä, päässä yksi iso oksa, yhtenä kappaleena
- 7 =WT9 sälöä, oksaton, yhtenä kappaleena
- 8 =WT8 sälöä, yhtenä kappaleena
- 9 =WT6 sälöä, yhtenä kappaleena
- 10=WT11 poikki, oksan kohdalta
- 11=WT29 yksi sälö kiinni, pystysuorasti murtuen, melkein poikki
- 12=WT25 ehyt, yksi oksa keskellä
- 13=WT1 ehyt
- 14=WT4C poikki, oksan kohdalta
- 15=WT3B sälöjä keskellä, oksaton
- 16=WT14 sälöjä toisessa taivutuspaässä
- 17=WT12 kiinteä sälö keskellä
- 18=WT10 iso kiinni oleva halkeama
- 19=WT7 ehyt, pieni halkio syyn suuntaisesti, ei rikki
- 20=WT15 lähes poikki keskeltä, oksaton
- 21=WT24 lähes poikki

- 22=WT30 lähes poikki, ei kuitenkaan keskellä olevan pihkataskun kohdalta
- 23=WT28 taipui
- 24=WT32 sälöjä paljon, taipui runsaasti
- 25=WT22 halki syynsuuntaisesti yli puolet, oksaton
- 26=WT16 runsaasti sälöjä, sisus tumma
- 27=WT19 poikki, hauras, oksaton
- 28=WT20 hiukan halkeamaa, ehyt, oksaton
- 29=WT26 poikki pystysuorasti, yhtenäinen
- 30=WT23 taipui