

Puun modifiointi lämpökäsittelyllä

Pertti Viitaniemi & Saila Jämsä

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-4523-0

ISSN 1235-0613

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1996

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 42, 02151 ESPOO
puh. vaihde (90) 4561, telekopio 456 4374, teleksi 125 175 vttin sf

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 42, 02151 ESBO
tel. växel (90) 4561, telefax 456 4374, telex 125 175 vttin sf

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 42, FIN-02151 ESPOO, Finland
phone internat. + 358 0 4561, telefax + 358 0 456 4374, telex 125 175 vttin sf

Technical editing Leena Ukskoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1996

Viitaniemi, Pertti & Jämsä, Saila. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä [Modification of wood with heat treatment]. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja - Publikationer 814. 57 s.

UCD 674.04:621.78:582.28

Keywords wood, heat treatment, temperature, swelling, shrinkage, strength, deterioration, fungi, microscopes, analyzing, painting, gluing, chemical properties, physical properties

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa tarkasteltiin puun lämpökäsittelyyn kohdistuneita aikaisempia tutkimuksia, kehitettiin lämpökäsittelyyn sopiva laitteisto sekä selvitettiin kokeellisesti suomalaisen männyn, kuusen ja koivun ominaisuuksien muuntuminen lämpökäsittelyn yhteydessä.

Lämpökäsittely tummentaa puun värin. Värin tummenemisesta ei seuraa välttämättä muiden ominaisuuksien muuttumisesta. Pitkillä käsittelyajoilla 180 °C:n lämpötilassa voitiin vaikuttaa puun elämisen pienemiseen, mutta ei lahonkeston parantumiseen. Vasta käsittely vähintään 220 °C:sen lämpötilassa 3 - 4 tunnin ajan nosti suomalaisen männyn, kuusen ja koivun lahonkestävyyden laboratorikokeissa hyvin lahoa kestävien puulajien tasolle. Lahonkestävyyden lisäksi lämpökäsittely vähentää homehtumisalttiutta.

Käsittelyolosuhteilla oli vaikutusta puun kosteuselämiseen. Mitä korkeampi käsittelylämpötila oli, sitä paremmat tulokset saavutettiin. Parhaimmillaan lämpökäsittely pienensi puun tasapainokosteutta 65 % RH:ssa noin 50 %. Tämän seurauksena myös puun kosteuseläminen pieneni jopa 80 - 90 %. Vaihtelevassa ilmankosteudessa ja syklisessä upotus-kuivauskokeessa lämpökäsittelyn näytteen kosteuseläminen oli noin puolet käsittelemättömään näytteeseen nähden.

Käsittely vaikuttaa puun taivutuslujuuteen. Taivutuslujuus heikkeni 0 - 30 % käsittelyolosuhteiden mukaan. Käytännössä taivutuslujuuden heikkeneminen jää 10 - 15 %:n tasolle, koska pitemmälle viedyllä lämpökäsittelyprosessilla ei enää saavuteta riittäviä etuja.

Lämpökäsittelyn puun mikroskooppisessa tarkastelussa havaittiin muutoksia soluseinissä. Muutokset olivat riippuvaisia lämpötilan lisäksi vaikutusajasta. Soluseinän vauriot alkoivat näkyä myöhemmin kuin värinmuutokset. Soluseinässä havaittiin pitkittäisiä halkeamia ja korkeimmissa lämpötiloissa (yli 220 °C) 6 - 8 tuntia käsitellyssä puussa oli soluseinissä murtumia.

Puun maalattavuuteen ja liimattavuuteen lämpökäsittely vaikutti siten, etteivät veden imeytymään perustuvat menetelmät toimi kunnollisesti. Tämä johtuu lämpökäsittelyn puun huonontuneesta kyvystä imeä vettä itseensä. Toisaalta puualustan modifiointi paransi pinnoitetun puun säänkestävyyttä.

Viitaniemi, Pertti & Jämsä, Saila. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä [Modification of wood with heat treatment]. Espoo 1996, Technical Research Centre of Finland, VTT Julkaisuja - Publikationer 814. 57 p.

UCD 674.04:621.78:582.28

Keywords wood, heat treatment, temperature, swelling, shrinkage, strength, deterioration, fungi, microscopes, analyzing, painting, gluing, chemical properties, physical properties

ABSTRACT

This study examined earlier research concerned with heat treatment, developed suitable equipment for heat treatment and experimentally clarified how the properties of Finnish pine, spruce and birch are modified by heat treatment.

Heat treatment darkens the colour of wood. However, it does not necessarily follow from this darkening that other properties have been modified. With long heat treatment times at temperatures up to 180 °C, it is possible to reduce the shrinkage and swelling of wood, but not to improve its resistance to rot. Laboratory tests indicate that raising the rot resistance of Finnish pine, spruce and birch to the level of highly rot-resistance species requires heat treatment for 3 - 4 hours at a temperature of at least 220 °C. In addition to improving the resistance to rot, heat treatment also reduces the susceptibility to fungal decay.

The treatment conditions had an effect on the shrinkage and swelling of the wood. The higher the treatment temperature, the better were the results obtained. At best, the heat treatment improved the equilibrium moisture content of the wood by about 50 per cent at 65 % RH. As a consequence of this, shrinkage and swelling of the wood was reduced by as much as 80 - 90 per cent. In variable relative humidity and in cyclical immersion / drying tests, the shrinkage and swelling of the heat-treated specimen was about half that of an untreated specimen.

The treatment has an effect on the bending strength of wood. The bending strength can fall by 0 - 30 per cent, depending on the treatment conditions. In practice the deterioration in bending strength does not exceed 10 - 15 per cent, because longer heat treatment processes no longer provide sufficient benefits.

A microscopic examination of heat-treated wood revealed changes in the cell walls. The changes are dependent on the temperature and length of the treatment period. Cell wall damage began to appear later than the colour changes. Longitudinal cracks were observed in the cell walls, and when treated for 6 - 8 hours at higher temperatures (over 220 °C) there were fractures in the cell walls.

Heat treatment has an effect on the painting and glueing properties of wood, with the result that methods based on water absorption do not work properly. This is due to the poorer ability of the wood to absorb water. On the other hand, the modification of a wood substrate improves its weather resistance when coated.

ALKUSANAT

Puun lämpökäsittelyn on todettu vaikuttavan puun kemialliseen rakenteeseen ja sitä kautta puun eri ominaisuuksiin. Menetelmää on hyödynnetty kansan keskuudessa jo pitkään mm. polttamalla aidanseipäiden pää karrelle, jolloin niiden maakosketukseen joutuvan tyviosan kestoikä kasvaa tuntuvasti.

Lämpökäsittelymenetelmän hyödyntämisessä on kuitenkin ollut tiettyjä vaikeuksia. Riittävän hyvän lopputuloksen saamiseksi joudutaan käyttämään hyvin korkeita lämpötiloja. Tällöin on suurena vaarana puutavaran syttyminen palamaan. Myös lämpövaikutuksen saaminen tasaisesti puun sisälle pinnan hiiltymättä on tuottanut vaikeuksia. Käsittely on heikentänyt puun lujuutta tehden siitä liian hauraan moniin käyttötarkoituksiin.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin lämpökäsittelyyn kohdistuneet aikaisemmat tutkimukset, kehitettiin lämpökäsittelyyn sopiva laitteisto ja selvitettiin kokeellisesti suomalaisen männyn, kuusen ja koivun ominaisuuksien muuntuminen lämpökäsittelyn yhteydessä.

Tutkimus on tehty 1992 - 1995 välisenä aikana VTT Rakennustekniikan puumateriaalitekniikan ryhmässä.

Tutkimuksen ovat rahoittaneet Teknologian kehittämiskeskus (TEKES), Suomen Puututkimus Oy, Valmet Paperikoneet Oy, Tikkurila Oy ja VTT.

Tutkimuksen vastuullisena johtajana on toiminut tutkimusprofessori Pertti Viitaniemi. Tutkimuksesta vastaavana tutkijana on toiminut tutkija Saira Jämsä. Lisäksi tutkimukseen ovat osallistuneet erikoistutkija Hannu Viitanen (lahotus- ja homekokeet), erikoistutkija Leena Paajanen (mikros- kooppiset analyysit), erikoistutkija Pirjo Ahola (pinta- käsittelykokeet), tutkija Kyösti Koskela (tilastolliset analyysit) ja tutkimusavustajat Pentti Ek ja Liisa Seppänen.

Tutkimusraportin ovat tarkastaneet professori Raimo Alen Jyväskylän yliopiston soveltavan kemian laitokselta ja dosentti Ilkka Pöyhönen Metsäteollisuus ry:stä.

Projektia on ohjannut johtoryhmä, johon kuuluivat
Kalevi Asikainen, Kaukas Oy
Pertti Hämäläinen, Puuinfo Oy
Olli-Pekka Nordlund, TEKES
Tero Paajanen, Teknologiaohjelmat
Ilkka Sarvimäki, Tikkurila Oy
Jan-Henrik Sievers, Valmet Paperikoneet Oy
Matti Tempakka, Otatech Oy
Seppo Vainio, Enso-Gutzeit Oy
Pertti Viitaniemi, VTT.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ALKUSANAT	4
1 JOHDANTO.....	9
2 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN KEMIAALLISIIN OMINAISUUKSIIN	10
2.1 KEMIAALLISET MUUTOKSET	10
2.1.1 Selluloosa.....	10
2.1.2 Hemiselluloosat	11
2.1.3 Ligniini.....	15
2.2 LÄMPÖTILAN JA KOSTEUDEN YHTEISVAIKUTUKSET	15
3 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN FYSIKAALISIIN OMINAISUUKSIIN	16
3.1 PUUN RAKENTEESSA TAPAHTUVAT MUUTOKSET	16
3.2 PAINOHÄVIÖ.....	17
3.3 PUUN LUJUUS	18
3.4 DIMENSIOSTABIILISUUS	19
3.5 TASAPAINOKOSTEUS JA SORPTIO	20
3.6 PINNAN OMINAISUUDET	23
3.7 PERMEABILITEETTI	24
3.8 TYÖSTÖ	24
4 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN BIOLOGISIIN OMINAISUUKSIIN	24
4.1 LAHONKESTÄVYYS.....	24
4.2 SÄÄNKESTÄVYYS.....	26
5 PUUN HAJOAMISTUOTTEET.....	26
6 SUOMALAISEN MÄNNYN, KUUSEN JA KOIVUN LÄMPÖKÄSITTELY	27
6.1 KOEJÄRJESTELY	27
6.1.1 Koemateriaali	27
6.2 LÄMPÖKÄSITTELYT	28
6.3 PUUMATERIAALIN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN	29
6.3.1 Koekappaleiden valmistus	29
6.3.2 Painohäviö.....	29
6.3.3 Dimensiostabiiisuus.....	30
6.3.4 Taivutuslujuus.....	31
6.3.5 Permeabiliteetti.....	32
6.3.6 Lahonkestävyys.....	32
6.3.7 Kenttäkoheet.....	33

6.3.8	Homeenkestävyys.....	33
6.3.9	Puun rakenteen analysointi mikroskoopilla ja SEM:llä	33
6.3.10	Liimaukset	33
6.3.11	Pintakäsittelykokeet	34
7	TULOKSET.....	34
7.1	LÄMPÖTILAN NOUSU PUUSSA.....	34
7.2	PUUN PAINOHÄVIÖ LÄMPÖKÄSITTELYSSÄ.....	35
7.3	LÄMPÖKÄSITTELYN PUUN KOSTEUSELÄMINEN.....	36
7.3.1	Veden imeytyminen ja puun turpoaminen 1:n ja 21 vrk:n vesiupotuksessa.....	36
7.3.2	Lämpökäsitteltyjen kuusi-, mänty- ja koivukappaleiden tasapainokosteus	39
7.3.3	Puun kosteuseläminen vaihtelevassa ilmankosteudessa	39
7.3.4	Puun kosteus ja turpoaminen syklisessä upotus- kuivauskokeessa	40
7.4	LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS TAIVUTUSLUJUUTEEN ..	41
7.5	PERMEABILITEETIN MUUTOS	43
7.6	LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN LAHOAMIS- JA HOMEHTUMISALTTIUTEEN	43
7.7	LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN MIKRORAKENTEeseen	47
7.8	LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN PINTAKÄSITTELYYN JA LIIMATTAVUUTEEN	50
8	TULOSTEN TARKASTELUA	51
	SYMBOLILUETTELO	8

SYMBOLILUETTELO

$\alpha_{r,t}$	turpoama säteen (r) tai tangentin (t) suunnassa
δp	taivutuslujuus
ASE	käsittelystä johtuva puun kosteuden tai turpoamisen pieneneminen
b	taivutuskappaleen leveys
$B_{v,t}$	käsittelemättömän puun kosteus tai turpoama
$C_{v,t}$	käsitellyn puun kosteus tai turpoama
h	taivutuskappaleen paksuus
L	taivutuskappaleiden jänneväli
$l_{r,t(\text{märkä})}$	kappaleen mitat säteen (r) tai tangentin suunnassa upotuskokeen jälkeen
$l_{r,t(\text{kuiva})}$	absoluuttisen kuivaksi punnitun kappaleen mitat säteen (r) tai tangentin suuntaan
$m_{\text{ennen käsittelyä}}$	puun kuivapaino ennen lämpökäsittelyä
$m_{\text{käsittelyn jälkeen}}$	puun kuivapaino lämpökäsittelyn jälkeen
m_{kuiva}	puun kuivapaino
m_k	puun märkäpaino ennen lämpökäsittelyä
$m_{\text{märkä}}$	puun märkäpaino ennen kosteusmäärittystä
m_o	koekappaleen kuivapaino ennen lahotuskoetta
m_{lk}	koekappaleen kuivapaino lahotuskokeen tai kosteusmäärittelyn jälkeen
m_{lm}	koekappaleen märkäpaino lahotuskokeen kosteusmäärittelyssä
P_{max}	voima murtorajalla
u	puun kosteus

1 JOHDANTO

Puun kuumentaminen yli 150 °C:n lämpötiloihin muuntaa useita puun fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Nostettaessa käsittelylämpötila selvästi yli 200 °C:n muutosten merkitys korostuu. Tällöin puun kosteuseläminen pienenee, biologinen kestävyys paranee, väri tummuu, puusta poistuu useita eri uuteaineita, se kevenee, tasapainokosteus laskee ja lämmöneristyskyky kasvaa. Samalla puun jäykkyys ja lujuusominaisuudet kuitenkin heikkenevät. Ominaisuuksien muuttuminen johtuu pääasiassa hemiselluloosien termisestä hajoamisesta.

Puun pääkomponentit selluloosa, hemiselluloosat ja ligniini hajoavat eri tavoin lämmön vaikutuksesta. Selluloosa ja ligniini hajoavat hitaammin ja korkeammissa lämpötiloissa kuin hemiselluloosat. Puussa tapahtuviin muutoksiin vaikuttaa lämpötilan lisäksi käsittelyaika.

Eri lämpötiloissa puussa tapahtuu seuraavia muutoksia (Pecina ja Paprzycki 1988):

0 - 100 °C	Vapaa ja sitoutunut vesi haihtuu.
100 - 150 °C	Puu hajoaa hitaasti, muodostuu ensimmäisiä hajoamistuotteita, vettä poistuu edelleen ja hiilihydraattien polymeeriketjujen katkeamisen ensimmäinen vaihe alkaa (initiaatio).
150 - 200 °C	Puu hajoaa edelleen, hiilihydraattien hajoaminen alkaa, kaasuja alkaa muodostua.
200 - 290 °C	Puu hajoaa, muodostuu vapaita happoja, hiilihydraatit hajoavat edelleen, ligniinin hajoaminen alkaa.
yli 290 °C	Puun hajoaminen jatkuu, puun pyrolyysi alkaa.

Hajoaminen voidaan havaita painohäviöistä. Lämpötilaan 150 °C saakka muutokset tapahtuvat hitaasti. Puu hajoaa nopeammin lämmön vaikutuksesta, jos läsnä on vettä tai höyryä (Stamm 1956). Hajoamisen aktivoitumisenergia on noin puolet pienempi kuivassa kuin kosteassa tilassa (Kollman ja Schneider 1964).

Etikkahappoa muodostuu puuta lämmitettäessä hydrolyysin seurauksena asetyloituneista hemiselluloosista. Vapautunut happo katalysoi hemiselluloosien hydrolyysiä liukoisiksi sokereiksi (Hillis 1975).

Lämpötila, käsittelyaika, koekappaleen koko, kosteus sekä ympäröivän ilman kosteus vaikuttavat puun hajoamisnopeuteen ja voimakkuuteen (Mitchell 1988).

Kemiallisissa reaktioissa, jotka tapahtuvat yli 190 °C:ssa, vapautuu lämpöä. Lämpö saattaa nostaa puun sisälämpötilan korkeaksi, minkä seurauksena puuhun muodostuu sisähalkeamia (Giebler 1983).

Lämpötila-alueella 260 - 290 °C tapahtuu puun kuivatislautuminen ja sen seurauksena puu palaa, jos happea on läsnä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää puun lämpökäsittelyn edellytykset ja kehittää menetelmät, joita käyttäen suomalaisesta sahatavarasta voidaan valmistaa elämätöntä ja biologisesti kestävää puutavaraa, joka soveltuu erityisesti ulkoverhouksiin, ikkunoihin ja muihin kosteusvaihteluille ja säälle alttiisiin käyttökohteisiin.

2 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN KEMIALLISIIN OMINAISUUKSIIN

2.1 KEMIALLISET MUUTOKSET

2.1.1 Selluloosa

Korkeassa lämpötilassa hemiselluloosan asetyyliryhmät reagoivat muodostaen etikkahappoa. Etikkahappo depolymeroi amorfisella alueella olevia selluloosan mikrofibrillejä. Happo hydrolysoi glukoosiyksiköitä yhdistäviä sidoksia pilkkoen selluloosaa pienemmiksi ketjuiksi. Korkea lämpötila ja korkea kosteus kiihdyttävät hapon muodostumista. Samalla puun lujuus (vetolujuus ja taivutuslujuus) heikkenee (Mitchell 1988, Hillis 1975).

Kuusesta eristetyn selluloosan molekyylipainon on todettu muuttuvan lämpökäsittelyssä (Fengel 1967). Molekyylipaino pysyi lähes vakiona 120 °C:seen saakka, minkä jälkeen se putosi nopeasti lämpötilan kasvaessa.

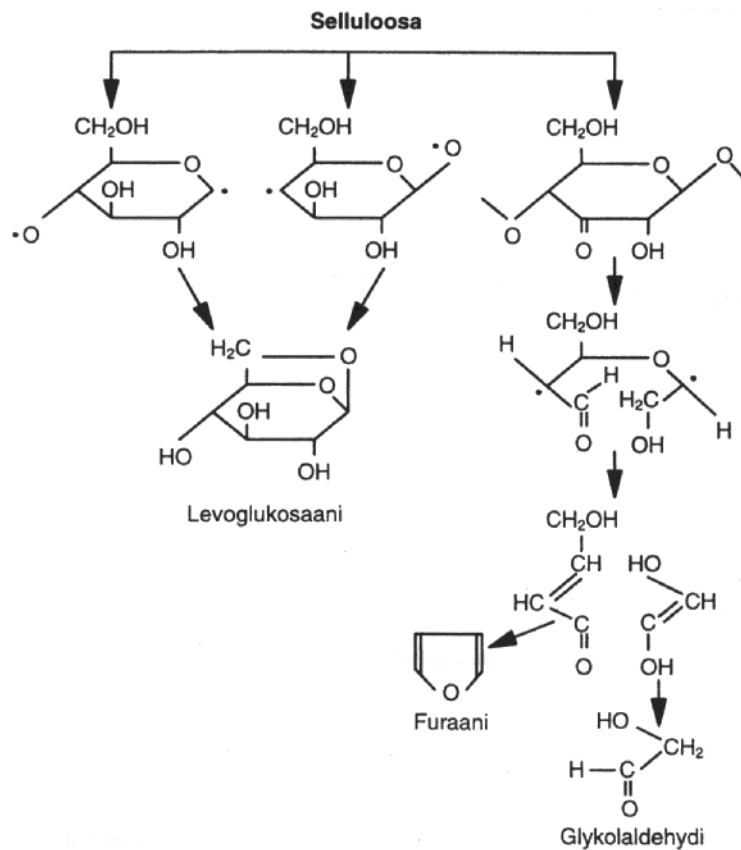
Roffael ja Schaller (1971) havaitsivat lämpökäsitellyn selluloosan kiteisyyden kasvavan lämpötila-alueella 120 - 160 °C, minkä jälkeen kiteisyys pieneni.

Yli 210 °C:n lämpötilassa selluloosan supramolekulaarisen rakenteen on todettu tuhoutuvan ja täysin amorfinen tila saavutettiin noin 270 °C:ssa (Taniguchi ja Nakato 1966).

Selluloosan termisessä hajoamisessa tapahtuu molekyyliketjujen katkeamisen lisäksi dehydratoitumis- ja hapettumisreaktioita (Fengel ja Wegener 1989). Ilmassa kuumentaminen saa aikaan hydroksyyliyhdyntien hapettumista karbonyyli- ja edelleen karboksyyliyhdyntiksi.

Lämmön vaikutuksesta tapahtuva puun värinmuutos liittyy siihen, kuinka paljon kaksoissidoksellisia yhdisteitä syntyy. Kyseiset yhdisteet ovat kromoforisia. Selluloosan polymeroitumisaste ja hydroksyyliyhdyntien määrän väheneminen vaikuttavat epäsuorasti värillisten yhdyntien muodostumiseen (Hillis 1975).

Kuvassa 1 on esitetty selluloosasta lämpökäsittelyssä syntyvien haihtuvien aineiden muodostumiskaavio. Haihtuvia aineita muodostuu yli 200 °C:n lämpötilassa. Tärkein hajoamistuote on levoglukosaani, mutta hajoamisessa syntyy myös furaania ja furaanin johdannaisia.

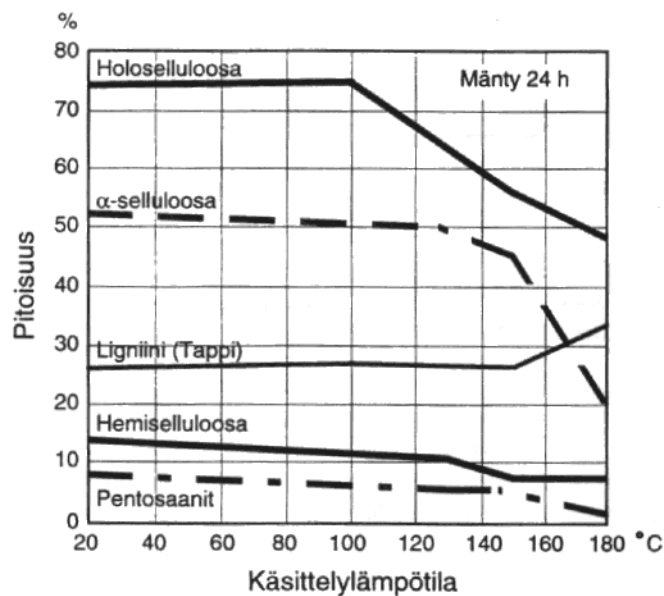


Kuva 1. Selluloosan hajoaminen lämpökäsittelyssä (Fengel ja Wegener 1989).

2.1.2 Hemiselluloosat

Kollman ja Fengel ovat osoittaneet, että lämpökäsiteltäessä puuta 100 - 180 °C:ssa, hemiselluloosat hajoavat (Kollman ja Fengel 1965). Kuvassa 2 on esitetty männyn ainesosien muuttuminen lämmön vaikutuksesta.

Hemiselluloosan ja selluloosan määrä alenee lämpötilan kasvaessa, mikä johtuu niiden hydrolysoitumisesta pienimolekyylisiksi sokereiksi kuten glukoosiksi ja ksyloosiksi. Kyseisten tuotteiden edelleen dehydratoituessa muodostuu esimerkiksi glukoosista levoglukosaania sekä 5-hydroksyyli-metyylifurfuraalia ja ksyloosista furfuraalia. Etikkahappo katalysoi hydrolyysiä. Holoselluloosan ja selluloosan suhteelliset osuudet muuttuvat voimakkaasti 180 °C:ssa. Hemiselluloosien suhteellinen osuus muuttuu vain vähän lämpötilavälillä 150 - 180 °C. Pentosaanien suhteellinen osuus pienee. 150 °C:ssa pentosaaneja on noin 8 % ja 200 °C:ssa noin 3 %. 210 °C:ssa on todettu pentosaanien suhteellisen osuuden laskeneen 25 %:lla alkuarvostaan (Kollman ja Fengel 1965).



Kuva 2. Männyn ainesosien muuttuminen eri lämpötiloissa 24 tunnin käsittelyn jälkeen (Kollman ja Fengel 1965).

Fengel (1966 b) on tutkinut lämpökäsitellyn kuusen polysakkarideja kuumaja kylmävesiuutolla. Kuusen polysakkaridien pääainesosat ovat glukoosi, mannoosi ja galaktoosi. Tämän lisäksi siinä on jonkin verran arabinoosia ja ksyloosia. Kylmävesiuutolla saadaan erotettua vesiliukoiset lyhytketjuiset polysakkaridit. Kuumavesiuutossa saatiin helposti hydrolysoituvat hiilihydraatit. Lämpökäsittelylämpötilan kasvaessa vesiliukoisten aineiden määrä kasvoi. Kuumavesiuutossa luokoisten aineiden määrä kasvoi 100 °C:n käsittelylämpötilan jälkeen, erityisen paljon liukoisia aineita muodostui käsiteltäessä puuta lämpötilavälillä 150 - 180 °C. Kylmävesiuutossa luokoisten aineiden määrä alkoi kasvaa, kun kappaleet käsiteltiin 120 °C:ssa.

Kylmävesiuutossa sokerien suhteet pysyivät vakioina, kun puun käsittelylämpötila oli alle 180 °C. 180 °C:ssa tehtyjen käsittelyjen jälkeen arabinoosin määrä väheni ja ksyloosin kasvoi. 200 °C:ssa käsitellyissä kuusikappaleissa arabinoosia oli vain vähän jäljellä ja glukoosin määrä oli kasvanut. Kuumavesiuutossa arabinoosia oli enemmän kuin kylmävesiuutossa. Käsittely lämpötila-alueella 150 - 200 °C vähensi arabinoosin määrää.

Ranskalaisessa tutkimuksessa (Dirol ja Guyonnet 1993) käsiteltiin puuta tyyppi-ilmakehässä 250 °C:ssa 10 (käsittely 1) ja 20 (käsittely 2) minuuttia (taulukko 1). Käsittelyssä vedyn ja hapen osuudet pienenevät ja hiilen osuus kasvoi. Ligniinin osuus kasvoi ja pentosaanien osuudet pienenevät.

Ranskassa on kuumennettu sahajauhoa 240 - 290 °C:ssa 30 minuuttia tyyppikaasussa. Lämpötilan kasvaessa hiilen massaosuus kasvoi ja hapen pieneni. Puun lievässä pyrolyysissä tapahtuu radikaalireaktioita, joissa hemiselluloosat ja ligniini hajoavat (Bourgeois et al. 1989 ja Bourgeois ja Guyonnet 1988).

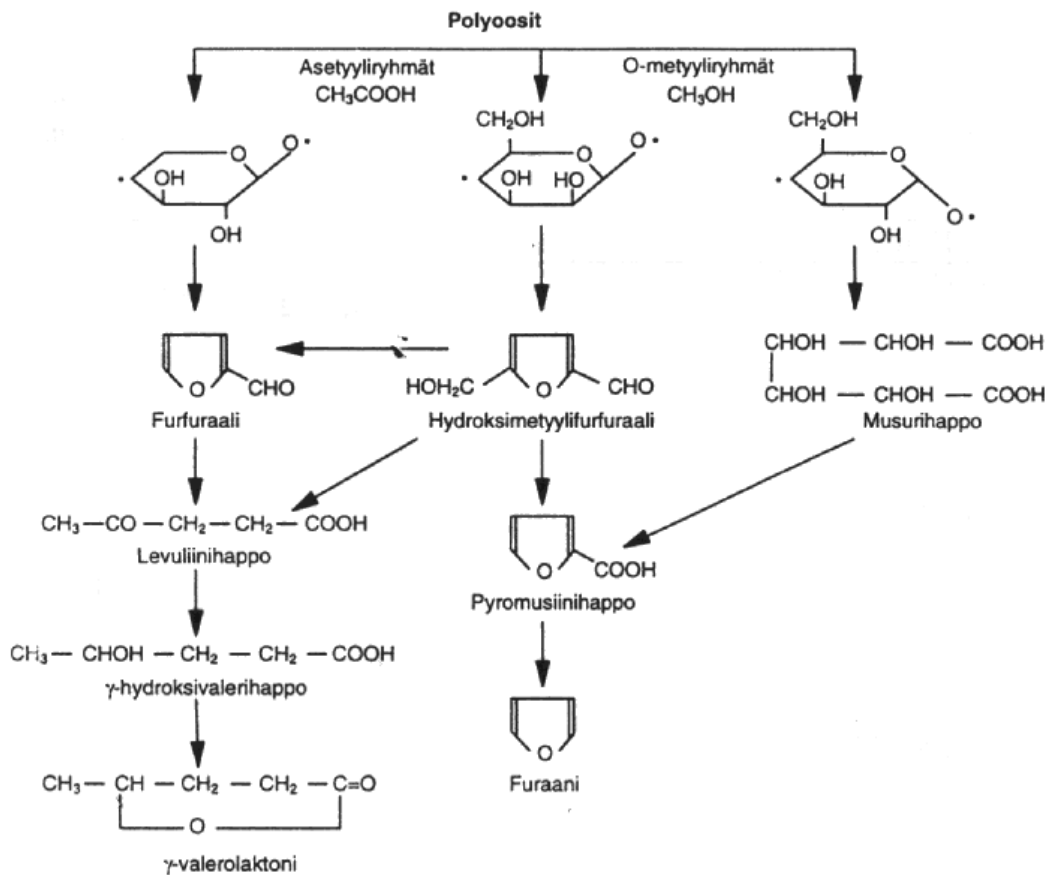
Taulukko 1. Lämpökäsiteltyjen ja käsittelemättömien kuusen, männyn ja poppelin C-, O- ja H-suhteet sekä ainesosien pitoisuudet (painoprosenttia alkuperäisestä näytteestä) (Dirol ja Guyonnet 1993).

Kuusi	Käsittelemätön	Käsittely 1	Käsittely 2
C	49,06	53,62	54,34
O	44,96	40,44	39,29
H	6,22	5,93	5,98
Uuteaineet	8,51	14,97	8,40
Ligniini	23,93	32,69	39,07
Pentosaanit	8,76	2,90	2,56
Mänty			
C	50,47	53,33	55,10
O	43,85	40,06	38,40
H	6,21	5,88	5,82
Uuteaineet	14,72	12,70	8,02
Ligniini	26,06	34,97	40,59
Pentosaanit	8,48	3,81	2,49
Poppeli			
C	47,47		
O	46,83		
H	6,26		
Uuteaineet	2,63	4,89	9,21
Ligniini	20,53	26,20	25,44
Pentosaanit	17,25	16,28	11,54

Lehtipuiden pentosaanit hajoavat herkemmin kuin havupuiden heksaanit (Kollman ja Fengel 1965). Lämpökäsittelyn vaikutus eri puulajeihin riippuu

hemiselluloosien tyypistä ja määrästä. Lehtipuissa on enemmän hemiselluloosaa ja vähemmän ligniiniä kuin havupuissa, jolloin ne hajoavat lämmön vaikutuksesta voimakkaammin kuin havupuut (Kollman ja Scheider 1964). O-asetyyliryhmillä on erittäin tärkeä osuus hemiselluloosan lämmönkestävyydessä. Mitä enemmän puussa on asetyyliiryhmiä, sitä herkemmin puu hajoaa. Asetyyliiryhmien hydrolyysituotteena vapautuu etikkahappoa. Pyökissä tapahtuu suurempia muutoksia kuin männnyssä ja männnyssä taas enemmän muutoksia kuin kuusessa.

Domburgin (et al. 1966) mukaan lehtipuiden ksylaanin hajoaminen alkaa lähellä 200 °C. Glykosidiset sidokset katkeavat. 225 °C:ssa molekyyli rakenne muuttuu täysin. Välillä 275 - 290 °C muodostuu dehydratoitumisen kautta furfuraalia (kuva 3). Termisen hajoamisen lopputuotteina esiintyy metanolia, etikkahappoa ja haihtuvia heterosyklisiä yhdisteitä (furaani, γ -valerolaktoni).



Kuva 3. Hemiselluloosan hajoaminen lämpökäsittelyssä (Fengel ja Wegener 1989).

2.1.3 Ligniini

Puun ainesosista ligniini kestää lämpöä parhaiten (Fengel ja Przyklenk 1970). Tutkiessaan kuusesta eristettyä ligniiniä Fengel ja Przyklenk jo tosin havaitsivat, että ensimmäiset muutokset ligniinissä tapahtuvat noin 150 °C:ssa. Käsiteltäessä kuusta 180 ja 200 °C:ssa 24 tuntia ligniinin metoksyylipitoisuuden on todettu laskevan (Kollman ja Fengel 1965).

Ligniiniin muodostuu yli 120 °C:n lämpötilassa C_α-aryylisidoksia (difenyylimetaanityyppinen kondensaatioreaktio) (Funaoka et al. 1990). Kuumennettaessa puujauhoa 220 °C:ssa havaittiin, että 40 % määrän ja 75 % kuivan puujauhon ligniinin ei-kondensoituneista yksiköistä oli muuttunut difenyylimetaanityyppisiksi yksiköiksi.

Ligniinin käsittelyn 175 °C:ssa on todettu saavan aikaan ligniinin kondensoitumista ja kondensaatioreaktioiden määrä kasvoi lämpötilan noustessa 240 °C:seen (Sergejeva ja Miljutina 1960). Lämpötila-alueella 260 - 280 °C ligniinimolekyylissä tapahtui muita muutoksia, joiden seurauksena sen hydrofiilisyyden laski.

2.2 LÄMPÖTILAN JA KOSTEUDEN YHTEISVAIKUTUKSET

Lämmön merkityksen on todettu olevan suuremman kosteassa kuin kuivassa puussa (Stamm 1956). Puun eri ainesosien pehmeneminen ja hajoaminen tapahtuu helpommin kosteassa kuin kuivassa tilassa. Esimerkiksi hemiselluloosien pehmenemislämpötila on kuivana 180 °C ja kosteana noin 20 °C. Vastaavat arvot ligniinille ovat 200 °C ja 90 °C.

Kyseisen ilmiön on todennut mm. Hillis (1975), jonka mukaan puu hajoaa huomattavasti nopeammin lämmön ja höyryn tai veden vaikutuksesta kuin jos puuta kuumennetaan kuivana. Kun puuta kuumennetaan vedessä tai höyryn avulla, muodostuu orgaanisia happeja, pääasiassa etikkahappoa, joka katalysoi hemiselluloosan hydrolyysiä liukoiksi sokereiksi.

Höyryesikäsittelyn on todettu vaikuttavan lehti- ja havupuiden hemiselluloosiin (Hsu et al. 1988). Käsittely hydrolysoi osittain hemiselluloosaa, mikä lisää huomattavasti puun puristettavuutta ja pienentää sisäisten jännitysten syntymistä. Lievä höyryesikäsittely (3 - 4 minuuttia, 1,55 MPa) pienentää lehtipuissa veteen liukenemattoman ksylaanin määrää ja havupuissa ksylaanin, glukomannaanin ja galaktaanien määrää. Hemiselluloosaketjujen katkeaminen ei vähennä puun lujuutta, mutta lisää huomattavasti sen puristettavuutta, pienentää jännitysten syntymistä ja pienentää palautumista. Korkeassa lämpötilassa hemiselluloosat pystyvät kulkeutumaan kuidun pinnalle, minkä seurauksena soluseinä pehmenee. Lisäksi oletetaan, että höyryssä käsitellyn puun ligniinillä on alempi keskimääräinen molekyylipaino, mikä puolestaan alentaa pehmenemispistettä. Höyrytyksessä puun väri tummenee.

Höyrytyksen merkitystä puun eri ainesosille on tutkittu melko paljon, mm. ligniinin höyrytys alle 215 °C:ssa katkaisee β -aryylieetterisidoksia (Funaoka et al. 1990). Kyseisten sidosten katkeamisen merkitystä massiivipuulla on kuitenkin toistaiseksi tutkittu liian vähän.

Toisaalta etenkin lehtipuiden kasvujännitysten poistamista höyryn avulla ja höyryn vaikutusta puun ominaisuuksiin on tutkittu lämpötila-alueella 100 - 150 °C (Hillis 1975). Tammen lujuuden on havaittu alenevan lineaarisesti höyrytysajan kasvaessa 120 °C:ssa (Thompson 1969). Tämän todettiin johtuvan hemiselluloosien ja selluloosan määrien vähenemisestä. Lujuus laskee nopeasti höyrytyslämpötilan kasvaessa (Teichgräber 1966). Soluseinässä tapahtuvat muutokset alkavat kerrosten S1- ja S2-rajapinnalta (Fillo ja Peres 1970).

3 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN FYSIKAALISIIN OMINAISUUKSIIN

3.1 PUUN RAKENTEESSA TAPAHTUVAT MUUTOKSET

Eri tutkimusten tulokset puun rakenteessa tapahtuvista muutoksista lämpökäsittelyn aikana ovat osittain ristiriitaisia, mikä kuvastaa että asiaa on tutkittu vähän.

Kuivuessaan puu kutistuu. Soluseinän mitat muuttuvat huomattavasti. Boutelje (1962) on mitannut kuusen soluseinän kevätpuun tilavuuskutistumaksi 26,5 % ja kesäpuulle 29,5 %. Tutkimuksen mukaan kutistuminen johtaa huokostilavuuden pienenemiseen kevätpuussa ja lisääntymiseen kesäpuussa. Korotetussa lämpötilassa tilavuuskutistuminen on suurempaa, koska aineita haihtuu puusta hajoamistuotteina. Haihtuminen on erilaista soluseinän eri kerroksissa. Erilainen kutistuminen aiheuttaa halkeamia ja murtumia. Halkeamia on havaittu S1- ja S2-kerrosten välillä.

Seborgin et al. (1953) tutkimusten mukaan lämpökäsitellyn puun tilavuuden pieneneminen johtuu soluonteloiden koon pienenemisestä ja aineiden haihtumisesta. Huokokset eivät muuta mittojaan siinä määrin kuin ontelot.

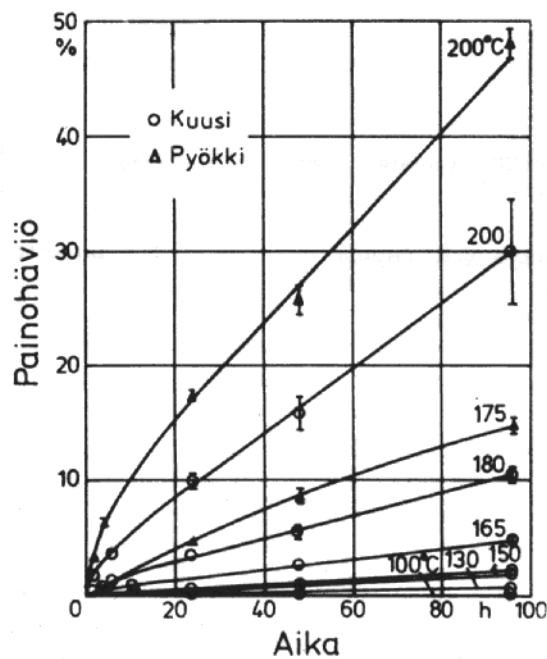
Fengelin (1966a) mukaan kuusen lämpökäsittely aiheuttaa muutoksia keskikerroksessa, rengashuokosten toruksessa ja kesäpuun S1-kerroksen siirtymisen paikaltaan. Kuusen lämpökäsittelyssä amorfiset aineet, jotka saostuvat rengashuokosten torukseen, pehmenyvät. Lämpötila-alueella 180 - 200 °C torukseen saostuneet aineet tulevat liuukoiksi etanoli-bentseeniseokseen ja uutettaessa edelleen torus jää kuin tyhjäksi onkaloksi.

Lämmön ja kosteuden vaikutuksesta koivun soluseinän rakenne löyheni S1- ja S2-kerrosten rajapinnalla, kun käsittelylämpötila oli 120 - 160 °C (Fillo ja Peres 1970).

3.2 PAINOHÄVIÖ

Puun painohäviöt lämpökäsittelyssä johtuvat sen pääkomponenttien, selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin, kemiallisista muutoksista sekä uuteaineiden häviämisestä. Puussa tapahtuvan hajoamisen voimakkuutta voidaan kuvata painohäviön avulla. Puussa tapahtuva painohäviö riippuu käsittelylämpötilasta ja -ajasta sekä ympäröivistä olosuhteista ja koekappaleiden koosta. Ruschen (1973b) mukaan kuusen lämpökäsittelyn aiheuttama painohäviö on huomattavasti pienempi työssä tai vakuumissa kuin ilmassa. Erot eri käsittelytapojen välillä tulevat selvemmin näkyviin käsittelyajan kasvaessa. Kuusikappaleilla (koko 25 mm x 25 mm x 480 mm) painohäviö 200 °C:ssa 24 tunnin käsittelyn jälkeen vakuumissa oli noin 4 % ja ilmassa noin 10 %.

Kuvassa 4 on esitetty lämpötilan ja käsittelyajan vaikutus kuusen ja pyökin painohäviöön, käsittely on tehty normaalissa ilmanpaineessa.



Kuva 4. Lämpötilan ja ajan vaikutus kuusen ja pyökin painohäviöön, käsittely on tehty normaalissa ilmanpaineessa (Rusche 1973b).

3.3 PUUN LUJUUS

Puun veto- ja leikkauslujuus pienenevät enemmän kuin puristuslujuus (Seborg et al. 1953). Lämpökäsittelyn yhteydessä tapahtuva puun lujuusominaisuuksien heikkeneminen on rajoittanut menetelmän kaupallistamista.

Kirjallisuuden mukaan stabilointiprosessia voidaan parantaa ja lujuuden heikkenemistä pienentää, jos käsittelyt tehdään suljetussa systeemissä inertissä kaasussa eikä hapen läsnäollessa (Seborg et al. 1953).

Ruschen (1973a) mukaan puun lujuusominaisuuksien heikkeneminen johtuu seuraavista tekijöistä: 1) painohäviöiden vaikutuksesta puulle lujuutta antavien ainekomponenttien määrät pienenevät 2) puukomponenttien molekyyliketjujen välinen verkkoutuminen pienenee ja 3) selluloosan polymeroitumisaste pienenee. Lujuuden heikkeneminen on sitä suurempaa, mitä suurempi puun painohäviö on. Painohäviö on noin 4,2 kertaa suurempi normaalissa ilmanpaineessa tehdyssä lämpökäsittelyssä kuin hapettomassa tilassa (Rusche 1973a).

Lämpökäsittelyn, kuivan kuusen vetomurtolujuus alenee vasta kun painohäviö on yli 0,01 % (Rusche 1973a). Painohäviön arvoilla 0,4 % ja 10 % oli vetomurtolujuus vastaavasti 86 % tai 38 % käsittelemättömän kappaleen lujuudesta. Puristuksessa lämpökäsittelyn kuusen murtolujuus aleni merkittävästi painohäviön ollessa yli 2 %. Lämpökäsittelyssä kuusen elastisuusmoduli aleni merkittävästi vasta, kun painohäviö oli yli 10 %

Douglas-kuusen (*Pseudotsuga menziesii*) ja valkokuusen (*Picea glauca*) lämpökäsittely alensi lujuutta (Troughton ja Rozon 1974). Koekappaleita käsiteltiin uunissa 200 °C:ssa 10 - 60 minuuttia tai kyllästetyllä 183-°C:sella höyryllä. Jo 10 minuutin käsittelyn jälkeen 200 °C:ssa oli Douglas-kuusen vetojännitys, vetovenymä ja murtumistyö pienentynyt 54, 39 ja 54 %. Kun kappaleita kuumennettiin kyllästetyssä höyryssä (käsittelyaika 10 minuuttia), Douglas-kuusen vetojännitys oli pudonnut noin 80 % käsittelemättömään koekappaleeseen verrattuna. Kyllästämätön höyry ei alentanut lujuuksia niin nopeasti kuin kyllästetty höyry. Korkeamman höyrynpaineen mukana tilaan tulee enemmän vettä, mikä saattaa aiheuttaa hydrolyysireaktioita.

Mitchell (1988) käsitteli pieniä koekappaleita 150 °C:ssa 1, 2, 4, 8 tai 16 tuntia ilmatiiviissä sylintereissä, jotka oli täytetty hapella, tyrellä tai ilmalla ennen sulkemista. Käsitellyistä kappaleista määritettiin taivutusmurtolujuus ja kimmomoduuli. Ominaisuudet yleensä heikkenivät käsittelyajan kasvaessa. Murtolujuuden ja kimmomoduulin pieneminen oli suoraan verrannollinen puun kosteuteen. Absoluuttisen kuiviksi (0 %) kuivattujen puiden kuumentaminen työssä tai ilmassa ei alentanut murtolujuutta oleellisesti. 12 %:n kosteuden omaavien puiden murtolujuus aleni 22 - 28 % ja tuoreiden puiden (kosteus yli 30 %) 37 - 40 %. Tuoreiden lämpökäsitteltyjen puiden kimmomoduulin pieneminen oli n. 14 kertaa

suurempi kuin kuivien kappaleiden. Kosteus todennäköisesti katalysoi hydrolyysireaktioita. Hapessa tehdyissä kokeissa kuivilla koekappaleilla oli murtolujuuden ja kimmomoduulin aleneminen huomattavasti suurempaa kuin ilmassa tai työssä.

FWD- (kosteus, lämpö ja paine) prosessilla 15 tuntia 150 °C:ssa käsitellyn männyn pintapuun puristuslujuus kasvoi 2 %, taivutuslujuus aleni 26 % ja iskutaivutuslujuus aleni 20 % (Burmester 1973). Kun koekappaleita käsiteltiin 9 tuntia 175 °C:ssa, männyn ja kuusen puristuslujuus kasvoi 7 %, männyn pintapuun taivutuslujuus aleni 24 % ja kuusen 27 %. Männyn iskutaivutuslujuus aleni 32 % ja kuusen 23 % (Burmester 1974).

3.4 DIMENSIOSTABIILISUUS

Lämmön vaikutuksesta tapahtuvan hemiselluloosien hajoamisen on todettu pienentävän puun vesihöyryn absorptiota ja turpoamista (Kollman ja Schneider 1963). Puun ainesosista hemiselluloosat imevät vettä eniten ja ligniini vähiten Lämpökäsitellyn puun turpoamisen pieneminen johtuu siitä, että hemiselluloosien osittain hajotessa hydroksyyliyhmiä määrä vähenee. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä nopeammin hemiselluloosat hajoavat.

Burmesterin ja Willen (1975) mukaan teakin pieni turpoaminen (pituussuuntaan 0,6 %, säteen suuntaan 3,0 % ja tangentin suuntaan 5,8 %, kun tiheys on 0,63 g/cm³) johtuu siitä, että se sisältää hyvin vähän hydrolysoituvaa hemiselluloosaa (noin 6 %) verrattuna pyökkiin tai tammeen, joissa molemmissa sitä on noin 20 %.

Lämpökäsittelyn avulla saavutetun puun dimensiostabiilisuuden paranemiseen vaikuttavat sekä lämpötila että käsittelyaika.

Burmesterin (Burmester 1973, 1975) mukaan FWD-prosessilla (kosteus, lämpö ja paine) käsitellyn puun optimikosteus ennen lämpökäsittelyä on 20 - 30 %. Lämpötila on 120 - 180 °C, paine 5 - 10 bar ja aika 5 - 15 tuntia. Optimiolosuhteissa männyn turpoama pieneni 55 % ja kuusen 52 %.

Giebler (1983) on kehittänyt FWD-prosessia edelleen siten, että kokeet tehtiin hapettomissa olosuhteissa. Käsitteilylämpötila oli 180 - 200 °C, kanto-kaasuna oli typpi tai hiilidioksidi. Paine oli 8 - 10 bar. Giebler on mitannut FDW-prosessilla käsiteltyjen pyökki-, mänty- ja kuusikappaleiden turpoamat 14 vuorokauden vesiliotuksen jälkeen. Tulosten mukaan puun eläminen vesiliotuksen jälkeen pieneni 50 - 80 %.

Dirol ja Guyonnet (1993) lämpökäsittelivät 250 °C:ssa typpi-atmosfäärissä kuusi-, mänty- ja poppelikappaleita. Käsitteilyaika oli 10 tai 20 minuuttia (käsittely 1 ja käsittely 2). Käsitteily alensi huomattavasti puun maksiturpoamaa (taulukko 2). Parantuneiden ominaisuuksien oletetaan johtuvan hemiselluloosien hajoamisesta.

Seborg et al. (1953) ovat tutkineet väliaineen ja painohäviön vaikutusta puun dimensiostabiilisuuteen. Kun painohäviö oli alle 20 %, pienten puukappaleiden hygroskooppisuuden aleneminen ja dimensiostabiilisuuden paraneminen olivat riippuvaisia painohäviöstä. Lämpökäsittelyn väliaineella ei tällöin ollut merkitystä.

Painohäviön ollessa yli 20 % väliaineella oli selvä vaikutus (Seborg et al. 1953). Suljetussa systeemissä kuumennettujen koekappaleiden ASE (elämisen pieneneminen käsittelemättömään kappaleeseen verrattuna) kasvoi painohäviön kasvaessa. Ilmassa kuumennettujen koekappaleiden ASE kasvoi ensin, mutta aleni huomattavasti painohäviön saavuttaessa 20 %.

Taulukko 2. Kuusen, männyn ja poppelin maksimiturpoamat (Dirol ja Guyonnet 1993).

Kuusi	Turpoaminen (%)		
	Säteen suuntaan	Tangentin suuntaan	Tilavuus
Käsittelemätön	5,46	11,17	17,60
Käsittely 1	1,99	3,51	5,79
Käsittely 2	1,73	2,84	4,81
Mänty			
Käsittelemätön	2,47	7,05	10,51
Käsittely 1	1,44	4,00	5,68
Käsittely 2	1,09	2,66	3,95
Poppeli			
Käsittelemätön	5,37	11,22	17,75
Käsittely	2,47	4,69	7,49

3.5 TASAPAINOKOSTEUS JA SORPTIO

Kollman ja Schneider (1963) käsitelivät männyn pintapuuta 70 - 200 °C:ssa 6 - 48 tuntia ilmatilassa. Kuvassa 5 on esitetty männyn pintapuun sorptioisotermit 24 tunnin lämpökäsittelyn jälkeen. Mitä korkeammassa lämpötilassa käsittely tehtiin, sen alhaisempi tasapainokosteus käsitellyillä kappaleilla oli. Käsittelyajalla oli myös merkitystä tasapainokosteuden alenemiseen.

Giebeler (1983) on käsitellyt kuusta ja pyökkiä 175 - 185 °C:ssa 2 ja 3 tuntia paineen ollessa 10 bar. Puun kosteus ennen käsittelyä oli 8 - 12 % ja käsittelyn jälkeen 4 - 6 %. Lämpökäsittelyn puun tasapainokosteus oli alhaisempi kuin vertailukappaleiden. Kuusella aleneminen oli 28 - 30 % 175 °C:n lämpötilassa ja 42 - 45 % 185 °C:n lämpötilassa tehdyissä käsittelyissä.

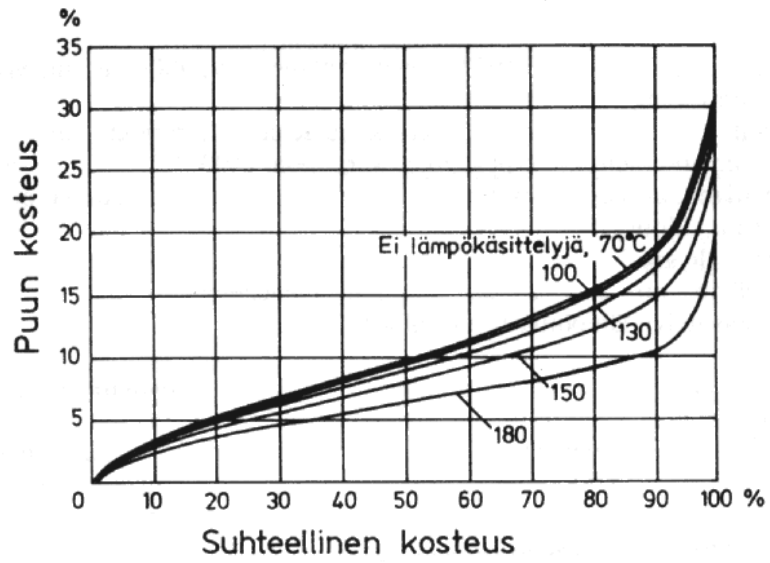
Kun puuta kuivataan 100 - 180 °C:n lämpötilassa, sen tasapainokosteus alenee 3 % ilmakehään verrattuna puuhun verrattuna puulajista riippumatta (Schneider 1973, Suematsu et al. 1980).

Schneider ja Rusche (1973) ovat tutkineet vesihöyryn imeytymistä (sorptiota) lämpökäsittelyihin kuusikappaleisiin. Kuvassa 6 on esitetty suhteellinen sorptiokäyrä, jossa kappaleiden sorptiota on verrattu käsittelemättömien koekappaleiden sorptioon (100 %). Käsittelyajan ja lämpötilan kasvaessa vesihöyryn imeytyminen pieneni. Ainoa poikkeus havaittiin silloin, kun kokeet tehtiin 200 °C:ssa. Noin 48 tunnin käsittelyn jälkeen hygroskooppisuus kasvoi uudelleen. Kun koekappaleiden painohäviö oli alle 2 %, sorption pieneneminen oli riippumaton lämpökäsittelyn lämpötilasta alueella 100 - 200 °C.

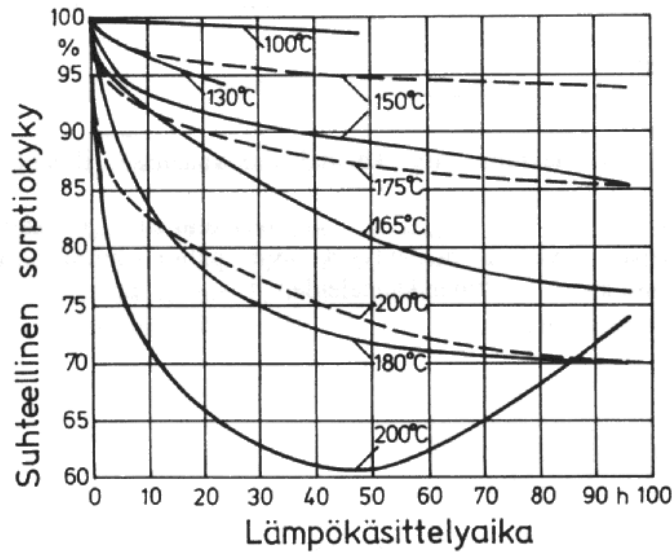
Böhner (1976) on tutkinut männyn pintapuun, pyökin ja tammen lämpökäsittelyn vaikutusta vesihöyrynläpäisevyyteen. Lämpötila oli 100 - 180 °C ja käsittelyaika 8 - 120 tuntia. Kokeet tehtiin normaali ilmanpaineessa, sekä työssä että vesihöyryssä. Lämpötilan kasvaessa vesihöyryn läpäisevyys pienenee säteen ja tangentin suunnassa. Pienenemiseen riittää suhteellisen lyhyt käsittelyaika.

Lämpökäsittely ilmatilassa sai männyn pintapuun vesihöyrynläpäisevyyden tangentin suuntaan alenemaan puoleen painohäviön ollessa noin 0,5 %. Suhteellinen läpäisevyys tangentin suuntaan oli pudonnut minimiin (noin 20 %:iin) painohäviön ollessa 10 %. Säteen suuntaisen suhteellisen läpäisevyyden minimi 50 % saavutettiin noin 7 %:n painohäviöllä. Typpi-ilmakehässä tehdyt kokeet antoivat lähes samat tulokset kuin ilmatilassa, vaikka työssä koekappaleiden painohäviöt olivat huomattavasti pienempiä kuin normaalissa ilmanpaineessa.

Lämpökäsittely kyllästetyn vesihöyryn kanssa aiheutti huomattavasti suuremman painohäviön kuin käsittely normaalissa ilmanpaineessa. Lämpökäsittelyn männyn pintapuun painohäviö oli pienempi kuin tammen ja pyökin. Höyryn kanssa kuumennettujen koekappaleiden vesihöyrynläpäisevyys ei pienentynyt niin paljon kuin normaalissa ilmanpaineessa kuumennettujen kappaleiden.



Kuva 5. Lämpökäsittelyn vaikutus männyn pintapuun sorptioisotermiin. Käsittelyaika 24 tuntia, käsittely tehty ilmassa (Kollman ja Schneider 1963).



Kuva 6. Kuusikappaleiden suhteellisen sorptiokäyrän riippuvuus lämpökäsittelyajasta ja lämpötilasta. Käsittely on tehty normaalissa ilmanpaineessa o-----o ja vakuumissa • • (Schneider ja Rusche 1973).

3.6 PINNAN OMINAISUUDET

Liimauksen ja pintakäsittelyn edellytyksenä on, että liima tai maali kostuttaa sopivasti liimattavan tai maalattavan pinnan. Pinnan ominaisuuksia voidaan tutkia kontaktikulmamittausten avulla. Jos kontaktikulma on suuri, nestepisara leviää huonosti kiinteän aineen pinnalla. Pieni kontaktikulma taas osoittaa, että neste leviää hyvin kiinteän aineen pinnalla.

Pecina ja Paprzycki (1988) ovat tutkineet lämpökäsittelyn vaikutusta puun pinnan ominaisuuksiin. He tutkivat mäntylastujen ominaisuuksia kontaktikulmamittauksen avulla. Käsittelemättömän puun kontaktikulman arvo oli alle 90° , mikä osoittaa, että puun OH-ryhmät reagoivat veden kanssa ja pintaa voidaan pitää hyvänä alustana jatkokäsittelyille. Lämpökäsitteltyjen puiden kontaktikulma oli yli 90° , mikä osoittaa pinnan hydrofobisuuden eli aineet eivät imeydy riittävän hyvin pintaan. Kontaktikulman suurin arvo saavutettiin 190°C :ssa. Lämpötilassa $190 - 200^\circ\text{C}$ käsitellyn puun pinnalla kontaktikulma aleni maksimiarvostaan, minkä oletetaan johtuvan puun pinnalle muodostuneista hydrofiilisistä hajomistuosotteista, jotka vaikuttavat pinnan ominaisuuksiin.

3.7 PERMEABILITEETTI

Permeabiliteetilla, jolla tarkoitetaan läpäisevyyttä, on erittäin tärkeä merkitys puun modifioinnissa, liimauksessa ja maalauksessa. Jos puu ei ole läpäisevää, siihen ei saada imeytettyä kemikaaleja tasaisesti.

Böhner (1976, 1977) on tutkinut lämpökäsittelyn vaikutusta männyn pintapuun, tammen ja pyökin läpäisevyyteen. Lämpökäsittely ilmassa lisäsi kuusen pintapuun permeabiliteettia pituussuuntaan. Permeabiliteetin kasvu oli sitä suurempaa mitä korkeampi käsittelylämpötila ja pidempi aika oli. Männyn pintapuun pituussuuntainen läpäisevyys kasvoi 7-kertaiseksi lämpötilan ollessa 180 °C ja ajan 120 tuntia. Kolmen tunnin lämpökäsittely 150 °C:ssa pienensi säteen suuntaista läpäisevyyttä noin 25 %. Vasta 1 536 tunnin käsittelyn jälkeen 150 °C:ssa suhteellinen läpäisevyys nousi (käsitelty näyte tai käsittelemätön näyte) 350 %:iin.

Japanilaista puuta (Zelkova serrata Makino) on käsitelty kuumassa savussa 150 - 200 °C:ssa 90 tuntia (Kanagawa et al. 1988). Tukin sisälämpötila pidettiin alle 100 °C:ssa. Permeabiliteetin todettiin kasvaneen lämpökäsittelyssä.

3.8 TYÖSTÖ

FWD- (kosteus, lämpö ja paine) prosessilla käsiteltyä puuta voidaan työstää kuten käsittelemätöntä puuta (Giebel 1983). Käsittely lisää puun haurautta, havupuilla tapahtuu työstössä murtumista ja leikkauslujuus pienenee.

4 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN BIOLOGISIIN OMINAISUUKSIIN

4.1 LAHONKESTÄVYYS

Lämpökäsittelyn puun lahonkeston paranemisen on todettu johtuvan puuhun sitoutuneen veden määrän vähenemisestä, hydroksyyliyhymien määrän vähenemisestä ja puun ainesosien muuttumisesta vähemmän lahonalttiiksi (Stamm ja Baechler 1960).

Dirol ja Guyonet (1993) ovat tutkineet 250 °C:ssa 10 ja 20 minuuttia lämpökäsiteltyjen kuusi-, mänty- ja poppelikappaleiden lahoamista. Käytetyt sienet olivat valko- ja ruskolahottajia. Lämpökäsiteltyjen puiden lahoaminen oli huomattavasti vähäisempää kuin vertailukappaleiden (taulukko 3). Lämpökäsiteltyjen puiden painohäviöt lahotuskokeessa olivat alle 1 %. Vertailukappaleiden lahotuskokeen painohäviöt olivat kuusella 15 - 24 %, männällä 0 - 36 % ja poppelilla 32 - 46 %. Testin loputtua

lämpökäsiteltyjen puiden kosteus oli huomattavasti alhaisempi kuin vertailukappaleiden.

Taulukko 3. Lämpökäsiteltyjen kuusi- ja mäntykappaleiden painohäviöt lahotuskokeessa, Bravery (1979) seulontamenetelmä (Dirol ja Guyonnet 1993).

Siени	Käsittely 1				Käsittely 2			
	Käsiteltyt näytteet		Vertailu näytteet		Käsiteltyt näytteet		Vertailu näytteet	
Kuusi	Painohäviö (%)	Kosteus (%)	Painohäviö (%)	Kosteus (%)	Painohäviö (%)	Kosteus (%)	Painohäviö (%)	Kosteus (%)
<i>Coniophora puteana</i>	0,0	52	22,04	60	0,68	54	23,81	60
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0,0	33	15,01	114	0,02	31	18,3	89
<i>Coriolus versicolor</i>	0,04	76	16,13	162	0,06	98	16,21	150
Mänty								
<i>Coniophora puteana</i>	0,0	59	36,02	75	0,0	50	34,76	73
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0,28	40	0,0	101	0,60	28	0,0	95
<i>Coriolus versicolor</i>	0,23	53	8,78	224	0,58	40	9,92	210

Buron mukaan lämpökäsittely puu ei lahoa, kun lämpökäsittelyssä puun painohäviö on yli 10 % (Buro 1955). Sitkakuusi ei lahonnut, kun lämpökäsittelyssä painohäviö oli 10 - 12 % (Stamm ja Baechler 1960).

4.2 SÄÄNKESTÄVYYS

Feist ja Sell (1987) ovat tutkineet FWD (kosteus, lämpö ja paine)-prosessilla käsiteltyjen kuusi- ja pyökkikappaleiden säänkestävyyttä. Käsittelylämpötila oli 175 - 195 °C ja kantokaasuna oli typpi. Lämpökäsittely paransi pyökin säänkestävyyttä käsittelemättömään puuhun verrattuna. Käsittely alensi kuusikappaleiden tasapainokosteutta, mutta puun säänkestävyys huononi. Lämpökäsittelyjen kuusikappaleiden syyt olivat nousseet pystyyn ja halkeamia oli enemmän kuin käsittelemättömissä kappaleissa. Kuullotteet olivat 14 kuukauden sääkokeiden jälkeen huonompia lämpökäsitteltyyn kuusen pinnalla kuin vertailukappaleiden.

5 PUUN HAJOAMISTUOTTEET

Ranskalaisessa tutkimuksessa (Dirol ja Guyonnet 1993) puuta käsiteltiin 250 °C:ssa typpi-ilmakehässä, jolloin 200 °C:ssa alkoi kehittyä välittömästi hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Nestefaasisissa oli vettä 21,5 %, etikkahappoa 7,5 %, metanolia 3,5 %, muurahaishappoa 5 % ja furfuraalia. Kaasuja ei enää kehittynyt 8 - 10 minuutin kuumennuksen jälkeen. Kaasuja muodostui noin 300 cm³ 100 g kuivaa puuta kohden.

FWD-prosessilla kolme tuntia 195 °C:ssa käsitellyistä kuusikappaleista on mitattu vapautuvan 3 % metanolia, 8 % etikkahappoa ja 3 % furfuraalia (Giebeler 1983).

Puun pyrolyysi alkaa lämpötila-alueella 270 - 280 °C. 380 °C:n lämpötilaan saakka puusta tislautuu etikkahappoa, metanolia, tervaa sekä kaasumaisia tuotteita (Brocksiepe 1976). Kuumennettaessa puuta 400 °C:ssa oli puuhiilen osuus 33 - 41 %, etikkahapon osuus 3 - 7 %, metanolin osuus 1,5 - 2,5 %, tervan osuus 11 - 19 %, ja 15 - 17 % oli ei-kondensoituvia kaasuja (Laxamana 1971).

Haihtuvat aineet erotettiin toisistaan tislaamalla (Brocksiepe 1976). Alkoholifraktiossa oli metanolia 45 %, asetonia 7 %, metyyliasetaattia 5 %, asetaldehydiä 3 % sekä pienempiä määriä allyylialkoholia, metyyliformiaattia, furaania ja furfuraalia. Puusta öljyyn liukeneva osa koostui etikka-, propioni- ja butaanihapoista. Tervassa havaittiin kresolia, guajakolia, muita fenoleja ja fenolieettereitä. Fenolisia yhdisteitä muodostuu pääasiassa ligniinistä ja muista aromaattisista yhdisteistä (Fengel ja Wegener 1989).

Yli 500 °C:ssa käsitellyistä puista vapautuvien kaasujen todettiin olevan vetyä, metaania, hiilimonoksidia ja hiilidioksidia (Fengell ja Wegener 1989).

6 SUOMALAISEN MÄNNYN, KUUSEN JA KOIVUN LÄMPÖKÄSITTELY

6.1 KOEJÄRJESTELY

6.1.1 Koemateriaali

Käytetty puumateriaali oli keinokuivattua US-laatuista mänty-, kuusi- ja koivulautaa. Laudan dimensiot olivat: paksuus 22 mm, leveys 100 mm ja pituus 1500 mm. Laudat olivat pintapuuta.

Laudoista määritettiin tiheys ja kosteus Finnomoist-mittarilla. Kokeisiin valittiin sitten arpomalla koekappaleet. Kuusikappaleiden tiheys oli 430 - 470 kg/m³, mäntykappaleiden tiheys oli 455 - 579 kg/m³ ja koivukappaleiden 495 - 655 kg/m³.

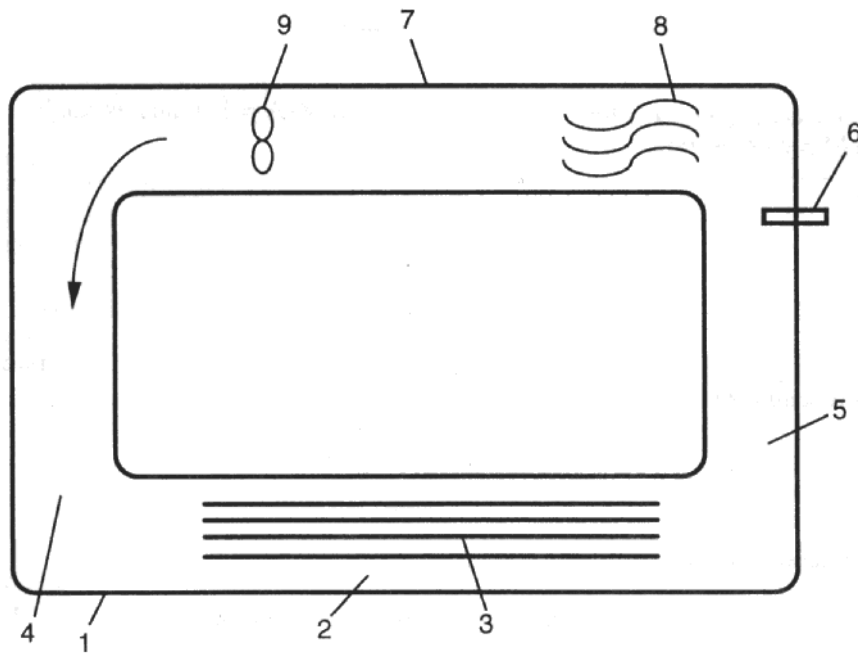
Ennen lämpökäsittelyä lautoja tasaannutettiin 65 %:n suhteellisessa kosteudessa. Kuusilautojen kosteus ennen koetta oli keskimäärin 14 - 15 %, mäntykoekappaleiden kosteus oli noin 11 % ja koivukoekappaleiden noin 10 %.

Vertailumateriaalina oli käsittelemätön puu. Paineekyllästetty kuusi, mänty ja koivu olivat vertailuna lahotuskokeissa ja vesiupotuskokeissa. Kuusikappaleet kyllästettiin eri kokeiden vaatimina valmiiksi sahattuina koekappaleina, koska kuusi kyllästyy huonosti, eikä tehoaineen imeytymä ole tasainen koko kuusilaudassa. Puut kyllästettiin tyhjö-painemenetelmällä 2-prosenttisella CCA-liuoksella (Kemwood K33 C, neste). Tehoaineen K33 C:n määrä oli 20,7 g/l. Kyllästyksen koeohjelma: 1) alkutyhjö 60 minuuttia, maksimi 2) paine 12 bar 1 h 30 minuuttia 3) lopputyhjö 30 minuuttia, maksimi.

Kuusen lämpökäsittelyssä oli 7 rinnakkaista lautaa, joista tutkittiin 5 laudan ominaisuuksia. Laudoista poimittiin pois isoimman ja pienimmän tiheyden omaava. Rinnakkaislaudat lämpökäsiteltiin samalla kertaa. Käsittelemättömiä ja painekyllästettyjä vertailukappaleita oli 10 kpl. Koivu ja mäntylautoja oli 8 rinnakkaista. Käsittelemättömiä vertailulautoja oli 15 kappaletta ja painekyllästettyjä vertailulautoja 15 kappaletta. Pintakäsittelykokeissa rinnakkaisia lautoja oli 3 - 6 kpl.

6.2 LÄMPÖKÄSITTELYT

Kokeet tehtiin VTT:n puulaboratorioon (nykyinen VTT Rakennustekniikka) rakennetulla lämpökäsittelylaitteistolla (kuva 7). Laitteisto käsittää vaipan (1) ja ympäröivän uunin (2), johon koekappaleet (3) sijoitetaan. Uuniin on yhdistetty ilman tulo- (4) ja poistokanavat (5), joiden kautta uunin läpi johdetaan kostea ilma. Poistokanavaan (5) on tällöin yhdistetty höyryn syöttöputki (6), jolla uunista poistettavaan ilmaan voidaan syöttää lisää vesihöyryä. Suljetun kierron muodostamiseksi tulo- ja poistokanavat on yhdistetty puhallin- ja lämmityskanaviston (7) kumpaankin päähän. Kanaviston läpi kulkeva ilma kuumennetaan sähkövastuksilla (8) haluttuun lämpötilaan ja johdetaan puhaltimen (9) kautta uunin tulokanavaan (4). Ilman kiertosuunta laitteistossa on ilmoitettu nuolella. Uunin ilmannoisuus on 3 m/s. Tilassa olevan höyryn lämpötila oli keskimäärin 99,8 °C.



Kuva 7. VTT:n lämpökäsittelylaitteisto (laitteiston osat, vrt. teksti)

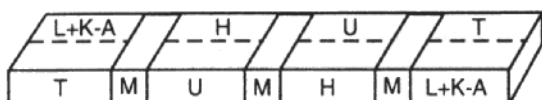
Puukappaleisiin asennettiin lämpötila-anturit. Anturit olivat 15 cm:n etäisyydellä koekappaleen päistä kappaleen paksuussuunnassa keskellä. Sisään tulevan ja ulos menevän ilman lämpötilat mitattiin.

6.3 PUUMATERIAALIN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN

6.3.1 Koekappaleiden valmistus

Jokaisessa lämpökäsittelyssä oli 7 - 8 rinnakkaista lautaa, jotka lämpökäsiteltiin samalla kertaa.

Lämpökäsiteltyjen ja vertailulautojen permeabiliteettimittausten jälkeen lautojen molemmista lappeista ja syrjistä höylättiin 2 mm. Jokaisesta laudasta sahattiin kahdesta kohdasta koekappaleet eri ominaisuuksien määrittämiseen. Paloittelukaavio on esitetty kuvassa 8.



T = taivutus, U = upotus, H = home, L = laho, K-A = kemialliset analyysit ja M = mikroskooppinäyte

Kuva 8. Koekappaleiden paloittelukaavio.

6.3.2 Painohäviö

Koekappaleista määritettiin lämpökäsittelyn aiheuttama painohäviö puun kuivapainosta. Koekappaleet punnittiin ennen käsittelyä ja käsittelyn jälkeen. Koekappaleista otettiin myös kosteusnäytteet ennen käsittelyä ja käsittelyn jälkeen. Näin pystyttiin laskemaan puun painohäviö kuivaan puuhun nähden.

Lämpökäsittelyn aiheuttama puun painohäviö laskettiin kaavasta

$$\text{painohäviö \%} = \frac{(m_{\text{ennen käsittelyä}} - m_{\text{käsittelyn jälkeen}}) \times 100}{m_{\text{ennen käsittelyä}}}, \quad (1)$$

missä m on puun kuivapaino ennen käsittelyä tai käsittelyn jälkeen.

Kuivapaino laskettiin kaavasta

$$m_{\text{kuiva}} = \frac{100 \times m_k}{u + 100}, \quad (2)$$

missä m_k on puun paino ennen käsittelyä ja u on kosteus.

Puun kosteus % (u) laskettiin kaavasta

$$u = \frac{(m_{\text{märkä}} - m_{\text{kuiva}}) \times 100}{m_{\text{kuiva}}}, \quad (3)$$

missä

$m_{\text{märkä}}$ on puun paino

m_{kuiva} on puun paino absoluuttisen kuivana.

6.3.3 Dimensiostabiilisuus

Koekappaleen koko oli 20 mm (säteen suunta) x 20 mm (tangentin suunta) x 100 mm (pituus). Koekappaleet kuivattiin 102 °C:ssa ja punnittiin. Säteen ja tangentin suuntaiset mitat otettiin kolmesta kohdasta digitaalisella mikrometrillä.

1. Uputuskoe 20-asteisessa vedessä

Koekappaleiden päät suojattiin PU-massalla. Kaikkien koesarjojen absoluuttisen kuivat koekappaleet upotettiin 20-asteiseen veteen. Liotuksen jälkeen koekappaleet nostettiin vedestä ja niiden pinta kuivattiin imupaperilla, minkä jälkeen kappaleet punnittiin ja mitattiin. Koekappaleet punnittiin ja mitattiin 1 vuorokauden ja 21 vuorokauden vesiliotuksen jälkeen.

Tuloksista laskettiin puun kosteus sekä tangentin ja säteen suuntainen turpoama.

Puun kosteus % (u) laskettiin kaavasta

$$u = \frac{(m_{\text{märkä}} - m_{\text{kuiva}}) \times 100}{m_{\text{kuiva}}}, \quad (4)$$

missä

$m_{\text{märkä}}$ on puun paino

m_{kuiva} on puun paino absoluuttisen kuivana.

Puun turpoaminen laskettiin kaavasta

$$\alpha_{r,t} = \frac{l_{r,t(\text{märkä})} - l_{r,t(\text{kuiva})}}{l_{r,t(\text{kuiva})}} \times 100, \quad (5)$$

missä

$\alpha_{r,t}$ on turpoama (%) säteen (r) tai tangentin (t) suunnassa ja

$l_{r,t}$ on kappaleen mitat säteen tai tangentin suunnassa.

Käsittelyn vaikutus lämpökäsitellyn puun dimensiostabiiliteetin paranemiseen (ASE) laskettiin kaavasta

$$ASE = \frac{B_{v,t} - C_{v,t}}{B_{v,t}} \times 100, \quad (6)$$

missä

ASE on käsittelystä johtuva puun veden imemisen (=puun kosteuden) tai turpoamisen pieneneminen (%), $B_{v,t}$ käsittelemättömän puun kosteus tai turpoama, $C_{v,t}$ käsitellyn puun kosteus/turpoama.

2. Turpoaminen vaihtelevassa ilmankosteudessa

Lämpötilassa 230 °C 6 tuntia käsitellyt kuusikappaleet sekä lämpötiloissa 205 ja 230 °C 4,6 ja 8 tuntia käsitellyt mäntykappaleet ja lämpötiloissa 200 ja 220 °C 4,6 ja 8 tuntia käsitellyt koivukoekappaleet kuivattiin 102 °C:ssa. Tämän jälkeen niitä ilmastoitiin 20 °C:n lämpötilassa ja 65 %:n suhteellisessa kosteudessa 28 vuorokautta. Tänä aikana koekappaleet saavuttivat tasapainotilan, jossa mitat ja paino eivät muuttuneet. Tämän jälkeen kappaleet siirrettiin 45 %:n, 65 %:n ja 95 %:n kosteudesta toiseen kosteuteen. Tarkempi syklitys ilmenee tulosten yhteydestä. Kunkin vaiheen jälkeen kappaleet punnittiin ja niiden paksuudet ja leveydet mitattiin.

Mittaustuloksista laskettiin kunkin ilmastointijakson jälkeinen puun kosteus sekä tangentin ja säteen suuntainen turpoama kaavojen 3 - 5 avulla.

3. Syklinen upotus-kuivauskoe

Koesarjoina olivat kuusi, mänty ja koivu, joita käsiteltiin 230 °C:ssa 6 tuntia. Koekappaleiden päät suojattiin PU-massalla. Kuivatut kuusikoekappaleet upotettiin 20-asteiseen veteen 2 tunniksi. Tämän jälkeen ne siirrettiin lämpökaappiin 30 °C:seen 18 tunniksi. Ennen seuraavaa upotusta koekappaleita tasaannutettiin 4 tuntia 65 %:n suhteellisessa kosteudessa. Syklejä oli 8 kpl. Mänty ja kuusikappaleet upotettiin 20 asteiseen veteen 24 tunniksi. Tämän jälkeen ne siirrettiin lämpökaappiin 70 °C:seen 24 tunniksi. Syklitys kesti 10 päivää.

Mittaustuloksista laskettiin puun kosteus sekä tangentin ja säteen suuntainen turpoama tai kutistuminen.

6.3.4 Taivutuslujuus

Koekappaleet tasaannutettiin 65 %:n suhteellisessa kosteudessa. Taivutuslujuus määritettiin ns. kolmen pisteen taivutuksella saksalaisen normin DIN 52186 mukaisista koekappaleista. Koekappaleiden koko oli 20 mm x 20 mm x 360 mm. Jänneväli oli 300 mm. Taivutus tehtiin Fiskarsin aineenkoetuskoneella. Taivutuskappaleista määritettiin lisäksi kosteus.

Puukappaleiden taivutuslujuudet laskettiin kaavasta

$$\delta_p = \frac{3 \times P_{\max} \times L}{2 \times b \times h^2}, \quad (7)$$

missä

δ_p on taivutuslujuus (N/mm²),

P_{\max} voima murtorajalla (N),

L taivutuskappaleiden jänneväli (mm),

b taivutuskappaleen leveys (mm),

h taivutuskappaleen paksuus (mm).

Käsittelystä aiheutunut taivutuslujuuden muutos (%) laskettiin kaavasta

$$\text{Taivutuslujuuden muutos} = \frac{\delta_{\text{käsittämätön}} - \delta_{\text{käsitelty}}}{\delta_{\text{käsittämätön}}} \times 100. \quad (8)$$

6.3.5 Permeabiliteetti

Lautojen läpäisevyys ennen käsittelyä ja käsittelyn jälkeen mitattiin permeabiliteettimittarilla (menetelmäkuvaus PUU/M/350/93).

Permeabiliteetin muutos laskettiin kaavasta

$$\text{Permeabiliteetin muutos} = \frac{\text{permeabiliteetti käsittelyn jälkeen} - \text{permeabiliteetti ennen käsittelyä}}{\text{permeabiliteetti ennen käsittelyä}} \times 100. \quad (9)$$

6.3.6 Lahonkestävyys

Lahoamista tutkittiin pikatestillä, jonka periaate oli EN 113:n mukainen lahotuskoe petrimaljoissa tai kollepulloissa. Koekappaleen koko on 7 mm x 18 mm x 35 mm. Lahotusajat olivat 4, 8 ja 16 viikkoa kuusella ja 16 viikkoa männyllä ja koivulla. Testisieni oli *Coniophora puteana*.

Lahotuskokeessa steriloimattomassa mullassa, ns. soft-rot-testissä, koekappaleen koko oli 5 mm x 10 mm x 100 mm (prEN 807). Lahotusajat olivat kuusella ja männyllä 16, 24 ja 32 viikkoa sekä koivulla 16 ja 24 viikkoa.

Lahottajasienen aiheuttama painohäviö laskettiin kaavasta

$$\text{Painohäviö (\%)} = \frac{m_o - m_{LK}}{m_o} \times 100, \quad (10)$$

missä m_o on koekappaleen kuivapaino ennen koetta ja m_{LK} koekappaleen kuivapaino kokeen jälkeen.

Puun kosteus lahotuskokeen jälkeen laskettiin kaavasta

$$\text{puun kosteus \%} = \frac{m_{LM} - m_{LK}}{m_{LK}} \times 100, \quad (11)$$

missä

m_{LM} on koekappaleen märkäpaino kokeen jälkeen ja

m_{LK} on koekappaleen kuivapaino kokeen jälkeen.

6.3.7 Kenttäkokeet

Kenttäkokeissa käytettyjen koekappaleiden koko oli 50 mm (leveys) x 25 mm (paksuus) x 500 mm (pituus). Koekappaleet vietiin 21.9.1994 Viikin koekentälle maakosketuskokeeseen. Lahoamisaste arvioidaan vuosittain tehtävässä tarkastuksessa standardin EN 252 mukaan.

6.3.8 Homeenkestävyys

Homekoe tehtiin kammiossa, jossa ilman suhteellinen kosteus oli 95 - 100 % ja lämpötila 22 - 25 °C. Periaate oli sovelletun ASTM-testin mukainen (ASTM D 3273-73T 1973, Viitanen ja Ritschkoff 1991). Koekappaleen koko oli 40 mm x 40 mm x 8 mm. Testisienet olivat tyypillisiä puumateriaalissa kasvavia homesieniä. Kasvu arvioitiin sekä mikroskooppilla että silmämääräisesti asteikolla 1 (hieman mikroskooppisesti näkyvää kasvustoa) - 5 (runsaasti silmin havaitavaa kasvustoa). Tarkasteluajat olivat aluksi 1 viikon välein, myöhemmin 2 viikon välein. Kokeen kesto oli 12 viikkoa.

6.3.9 Puun rakenteen analysointi mikroskooppilla ja SEM:llä

Lämpökäsitellyistä kuusilautoista sahattiin mikroskooppista tarkastelua varten n. 8 mm:n poikittaisnäytteitä 12 - 34 kpl/käsittelyerä. Kyseisistä näytteistä valittiin satunnaisesti 3 kpl/käsittelyerä, kuitenkin niin että näytteet olivat eri laudoista.

Näytteet tarkastettiin ensin pintavalossa ja sitten niistä leikattiin säteen- ja tangentinsuuntaiset leikkeet läpivalaisumikroskooppista tarkastelua varten. Elektronimikroskooppia varten kappaleista leikattiin pieniä säteen- ja tangentinsuuntaisia näytteitä, jotka kullattiin. Näytteistä katsottiin erot käsittelemättömään puuhun verrattuna.

6.3.10 Liimaukset

Mänty- ja koivukoesarjojen ja vertailunäytteiden liimattavuutta tutkittiin standardin DIN 68603 mukaisesti. Koekappaleen koko on 20 mm x 5 mm x 150 mm. Koekappaleen pinta höylättiin ennen liimausta. Tutkittavia liimoja olivat yksikomponenttinen PVAC, kaksikomponenttinen PVAC-dispersio + kovete, 2-komponenttinen liuotin vapaa polyuretaaniliima ja 1-komponenttinen liuotin vapaa polyuretaaniliima.

6.3.11 Pintakäsittelykokeet

Lämpökäsitellyn puun soveltuvuutta maalauslueksi tutkittiin yhdessä Tikkurila Oy:n kanssa. Puualustat olivat höylättyjä tai sahattuja lämpökäsiteltyjä (225 °C 6 tuntia) kuusi- tai mäntylautoja, vertalumateriaalina oli käsittelemättömiä kuusi- ja mäntylautoja sekä CCA-kyllästettyjä lautoja. Maalattavat laudat olivat kooltaan 22 - 25 mm x 100 mm x 750 mm.

Pintakäsittelyaineet olivat Tikkurila Oy:n suosittomia puuverhouksissa, ikkunoissa ja piharakenteissa käytettyjä maalaussysteemejä. Puuverhouksiin tarkoitetut kuusilaudat pohjustettiin liuotinhenteisellä pohjustuspuunsuojalla, liuotinhenteisellä alkydipohjamaalilla tai vesiohenteisellä öljypohjaisella puunsuojalla ja maalattiin alkydiöljymaalilla tai vesiohenteisellä akrylaattimaalilla. Ikkunoiksi tarkoitetut mäntylaudat maalattiin teollisilla ikkunamaalussysteemeillä (pohjassa ja pinnassa sama tuote): katalyyttimaali, vesiohenteinen teollisuusikkunamaali ja liuotinhenteinen kuullote. Muut pintakäsittelyaineet mäntyisiä piharakenteita varten olivat puuöljy, vesiohenteinen kuullote ja punamulta.

Puuverhouksiin ja piharakenteisiin tarkoitettujen lautojen päät suojattiin samalla maalilla kuin pintakäsittely tehtiin. Tausta jätettiin maalaamatta. Ikkunoihin tarkoitetut laudat maalattiin ympäri.

Laudat sijoitettiin kentälle elokuun 1994 puolivälissä. Kosteusmäärityslaudat asetettiin koetelineisiin pystysuoraan ja tartuntakappaleet 45°:n kulmaan. Koekappaleista määritettiin kosteus punnitsemalla lautoja syyskuun alusta 1994 marraskuun puoliväliin 1994 sekä syyskuussa 1995. Osasta maalaatuista kappaleista määritettiin maalin tartunta torsio menetelmällä ennen kokeen aloittamista sekä vuoden säärasituksen jälkeen.

7 TULOKSET

Tutkimuksessa selvitettiin eri käsittelyolosuhteiden vaikutusta puun ominaisuuksiin.

Kustakin yksittäisestä laudasta otettiin kaksi erillistä näytettä, joiden keskiarvon katsottiin kuvaavan koko lautaa. Tulokset analysoitiin yksittäisten lautojen arvojen perusteella. Keskiarvotuloksia käytettiin tutkittaessa puun kosteutta ja turpoamista vaihtelevassa ilmankosteudessa ja syklisessä upotuskuivauskokeessa. Riippuvuussuhteet analysoitiin tilastollisella valmisohjelmalla (SPSS).

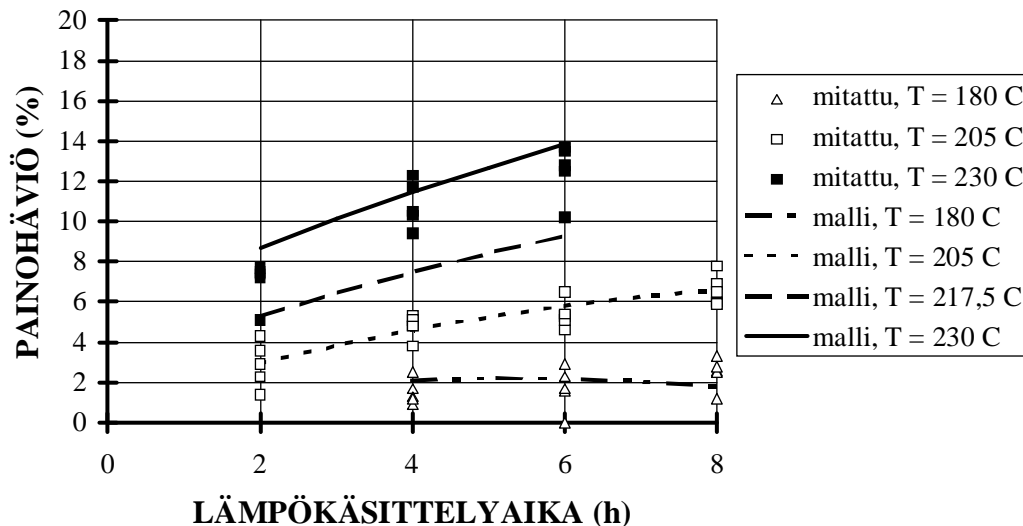
7.1 LÄMPÖTILAN NOUSU PUUSSA

Lämpökäsitellessä ohutta lautaa, 22 - 25 mm, puun sisälämpötila nousee tavoitearvoon kahdessa tunnissa. Käsitelty lauta pysyi suorana, eikä siihen

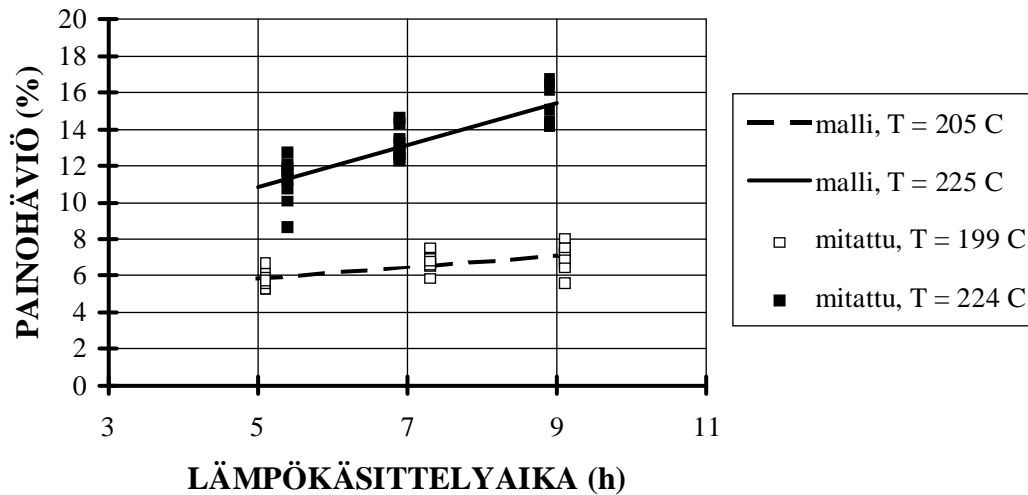
muodostunut sisähälkeamia. Unin lämpötilan nostoa ohjataan puun lämpenemisen mukaisesti. Lämpötilaeron suuruus riippuu käsiteltävän kappaleen dimensioista. Laudoilla lämpötilaero ei saa ylittää 20 °C. Lämpökäsittelyaika laskettiin siitä, kun puun sisälämpötila oli saavuttanut tavoitearvon.

7.2 PUUN PAINOHÄVIÖ LÄMPÖKÄSITTELYSSÄ

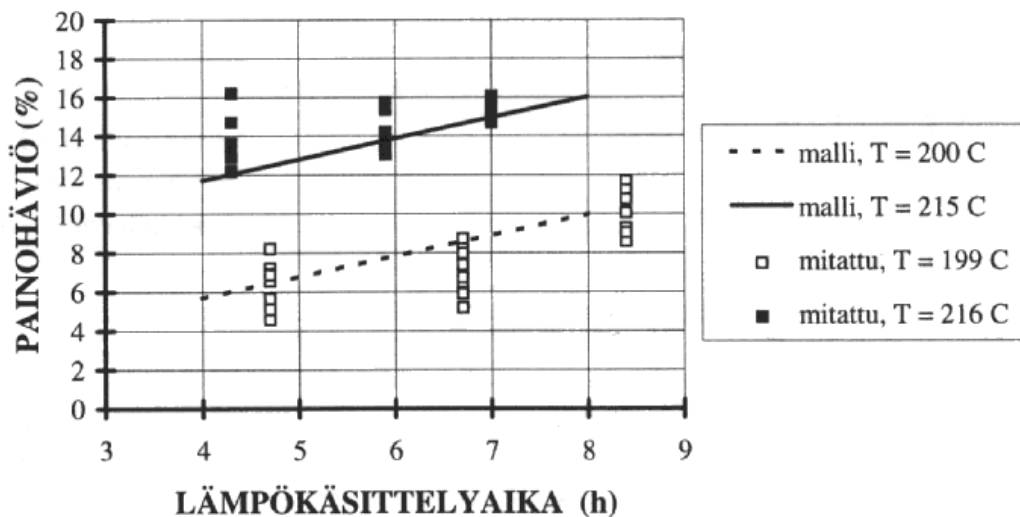
Puun painohäviö johtui sen pääkomponenttien selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin kemiallisista muutoksista. Kemialliset yhdisteet pilkkoutuivat pienemmiksi yhdisteiksi ja osa aineista haihtui pois. Painohäviön avulla voitiin kuvata puussa tapahtuvan hajoamisen suuruutta. Painohäviön suuruus riippui käsittelyajasta ja lämpötilasta. Ainoastaan 180 °C:ssa puun painohäviö ei mallin mukaan muuttunut oleellisesti käsittelyajan kasvaessa (kuvat 9 - 11).



Kuva 9. Lämpökäsittelyajan ja lämpötilan vaikutus kuusen painohäviöön. $Painohäviö = 0,023 \times t \times T - 1,342 \times T - 0,054 \times t^2 - 3,568 \times t + 0,0035 \times T^2 + 128,48$, missä T on lämpötila (°C) ja t on aika (h). Mallin selityskaste on 0,89.



Kuva 10. Lämpökäsittelyajan ja lämpötilan vaikutus männyn painohäviöön.



Kuva 11. Lämpökäsittelyajan ja lämpötilan vaikutus koivun painohäviöön.

7.3 LÄMPÖKÄSITTELYN PUUN KOSTEUSELÄMINEN

7.3.1 Veden imeytyminen ja puun turpoaminen 1:n ja 21 vrk:n vesiupotuksessa

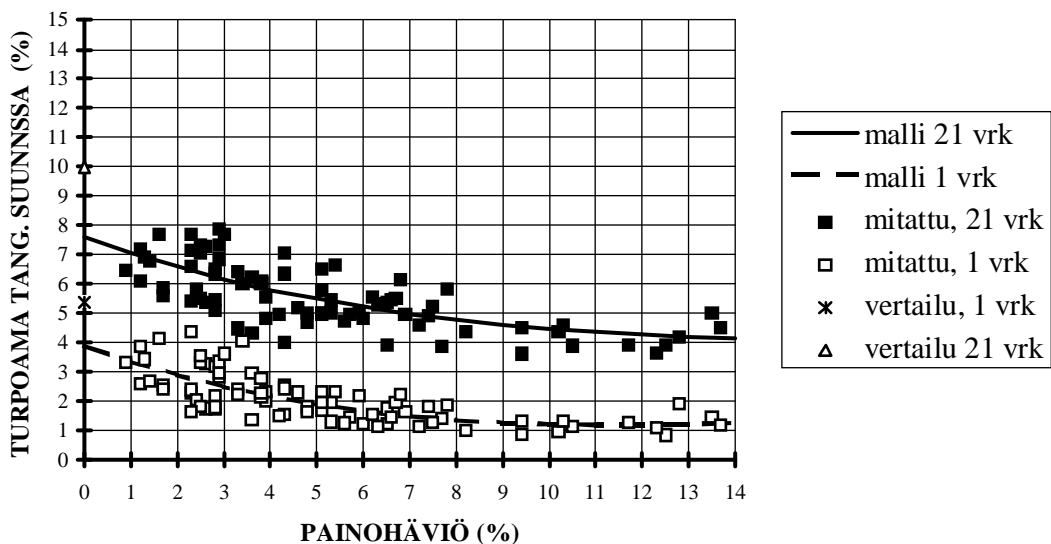
Lämpökäsittely pienensi vesiliotuksessa puuhun imeytyneen veden määrää. Mitä suurempi lämpökäsittelyn aiheuttama painohäviö oli, sitä vähemmän puuhun imeytyi vettä. Käsitteilyolosuhteista riippuen kuusen kosteus oli yhden vuorokauden vesiliotuksen jälkeen parhaimmillaan 56 %, männyn

81 % ja koivun 87 % pienempi kuin käsittelemättömän puun. Uputusajan kasvaessa 21 vuorokauteen ero käsittelemättömään puuhun verrattuna pieni. Paineekyllästettyihin mänty-, kuusi- ja koivunäytteisiin imeytyi vettä vähemmän kuin käsittelemättömään puuhun, mutta enemmän kuin 9 - 10 % painohäviön omaaviin kappaleisiin.

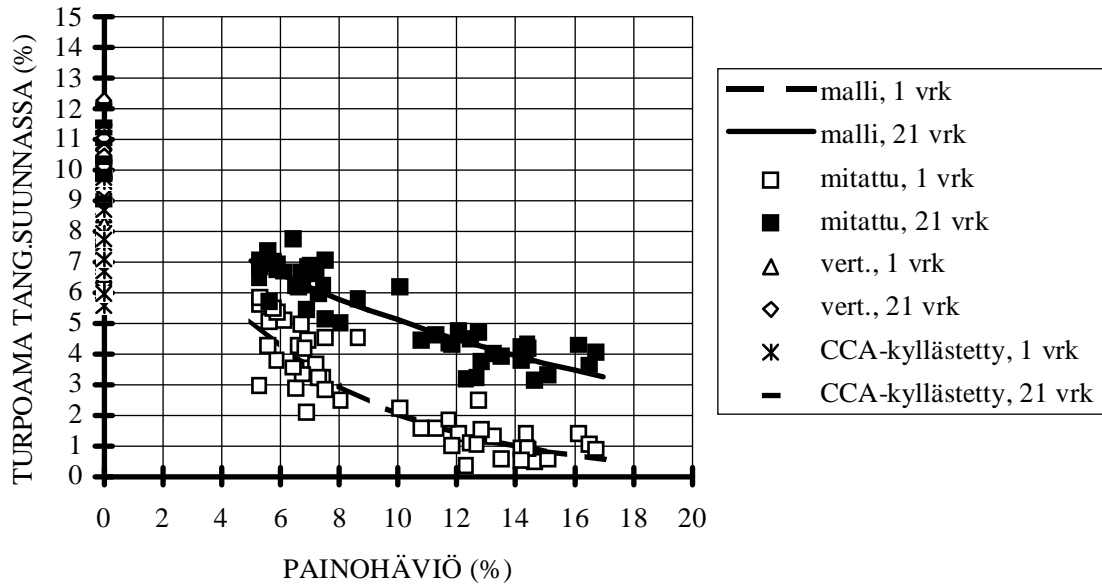
Lämpökäsittely pienensi puun turpoamista vesiliotuksessa. Turpoamisen pieneneminen riippui lämpökäsittelyn ajasta ja lämpötilasta. Mitä pidempi aika ja korkeampi lämpötila oli, sen vähemmän puu turposi. Parhaimmillaan turpoamisen pieneneminen oli noin 80 %. Lämpötilan vaikutus turpoamisen pienenemiseen oli suurempi kuin käsittelyajan. Kuvissa 11 - 13 on esitetty painohäviön vaikutus puun tangentin suuntaiseen turpoamaan.

Kirjallisuuden mukaan lämpökäsittelyn aiheuttama turpoamisen pieneneminen johtuu siitä, että hemiselluloosan hajotessa vähenee niiden OH-ryhmien määrä, joihin vesimolekyylit pystyvät kiinnittymään.

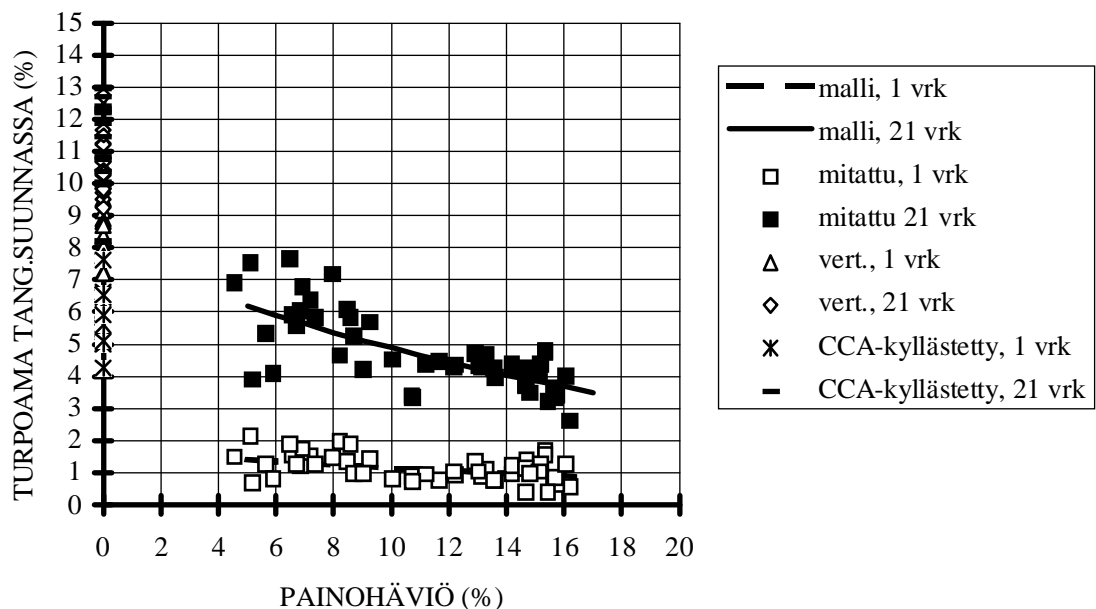
CCA-kyllästetty puu turposi kuten käsittelemätön puu.



Kuva 12. Lämpökäsittelyssä tapahtuneen painohäviön vaikutus kuusen tangentin suuntaiseen turpoamaan 1 ja 21 vrk:n vesiuotuksessa. Mallien yhtälöt: Puun turpoaminen tangentin suuntaan 1 vrk:n vesiliotuksessa = $-8,509 \times (1 - e^{-(0 - \text{painohäviö}/10)}) + 0,2708 \times \text{painohäviö} + 3,923$, selitysaste on 0,55. Puun turpoaminen tangentin suuntaan 21 vrk:n vesiliotuksessa = $-7,032 \times (1 - e^{-(0 - \text{painohäviö}/10)}) + 0,132 \times \text{painohäviö} + 7,556$, selitysaste on 0,51. Vertailunäytteen turpoaman keskiarvo on 5,5 % 1 vuorokauden jälkeen ja 10,0 % 21 vuorokauden jälkeen.



Kuva 13. Painohäviön vaikutus männyn tangentin suuntaiseen turpoamaan 1 ja 21 vrk:n vesiupotuksessa. Vertailunäytteen turpoaman keskiarvo on 7,4 % 1 vuorokauden jälkeen ja 10,0 % 21 vuorokauden jälkeen. Paineekyllästetyn puun vertailuarvot ovat 7,5 % (1 vrk) ja 10,4 % (21 vrk).



Kuva 14. Painohäviön vaikutus koivun tangentin suuntaiseen turpoamaan 1 ja 21 vrk:n vesiupotuksessa. Vertailunäytteen turpoaman keskiarvo on 7,5 % 1 vuorokauden jälkeen ja 10,6 % 21 vuorokauden jälkeen. Paineekyllästetyn puun vertailuarvot ovat 5,9 % (1 vrk) ja 11,4 % (21 vrk).

7.3.2 Lämpökäsiteltyjen kuusi-, mänty- ja koivukappaleiden tasapainokosteus

Lämpökäsittely alensi puun tasapainokosteutta 65 % RH:ssa 40 - 60 % käsittelyolosuhteista riippuen. Lämpötilalla oli suurempi merkitys tasapainokosteuden pienenemiseen kuin käsittelyajalla.

Eri tavoin käsiteltyjen ja käsittelemättömän männyn, kuusen ja koivun tasapainokosteudet 65 % ilman suhteellisessa kosteudessa on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Männyn kuusen ja koivun tasapainokosteudet (%) 65 % ilman suhteellisessa kosteudessa

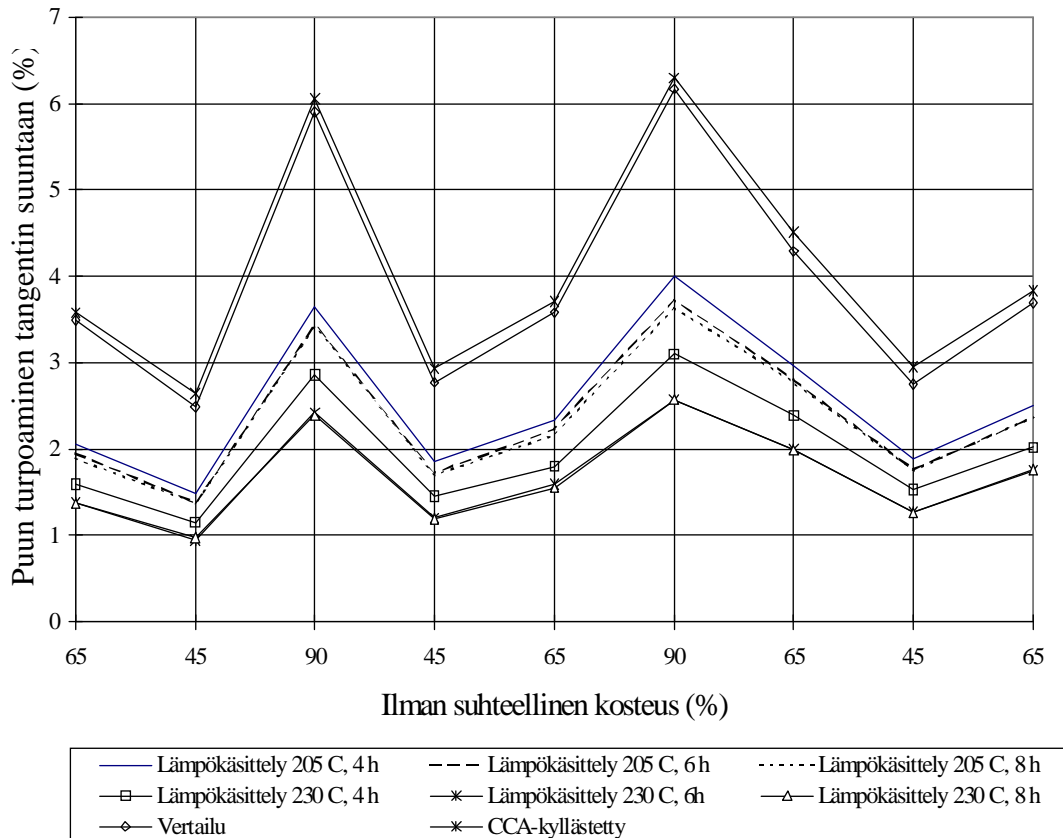
Näyte	Käsittely	Tasapainokosteus 65 % RH:ssa
Mänty	-	10,9
	paineekyllästys	10,8
	LK 205 °C/4 h	6,1
	LK 230 °C/4 h	4,8
Kuusi	-	13,4
	paineekyllästys	14,7
	LK 205 °C/4 h	6,5
	LK 230 °C/4 h	5,2
Koivu	-	10,2
	paineekyllästys	10,5
	LK 200 °C/4 h	5,8
	LK 220 °C/4 h	5,2

7.3.3 Puun kosteuseläminen vaihtelevassa ilmankosteudessa

Kuvassa 15 on esitetty lämpökäsiteltyjen mäntykappaleiden tangentin suuntainen turpoaminen ilman suhteellisen kosteuden vaihdella. Koekappaleet olivat eri olosuhteissa 2 viikon ajan 45, 65 ja 90 % RH:ssa.

Ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa käsittelemättömän ja lämpökäsitelty puu käyttäytyivät samalla tavoin, mutta lämpökäsitellyn puun kosteus ja turpoaminen olivat alhaisemmalla tasolla kuin käsittelemättömän puun. Kosteuden kasvaessa turpoaminen kasvoi. 205 - 230 °C:n lämpötilassa käsitellyn puun kosteuseläminen oli keskimäärin 50 % pienempi kuin käsittelemättömän puun.

CCA-kyllästetty mänty ja koivu kostuivat ja turposivat kuten käsittelemätön puu ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa.



Kuva 15. Ilman suhteellisen kosteuden vaikutus lämpökäsitellyn ja käsittelemättömän männyn tangentin suuntaiseen turpoamaan

7.3.4 Puun kosteus ja turpoaminen syklisessä upotus-kuivauskokeessa

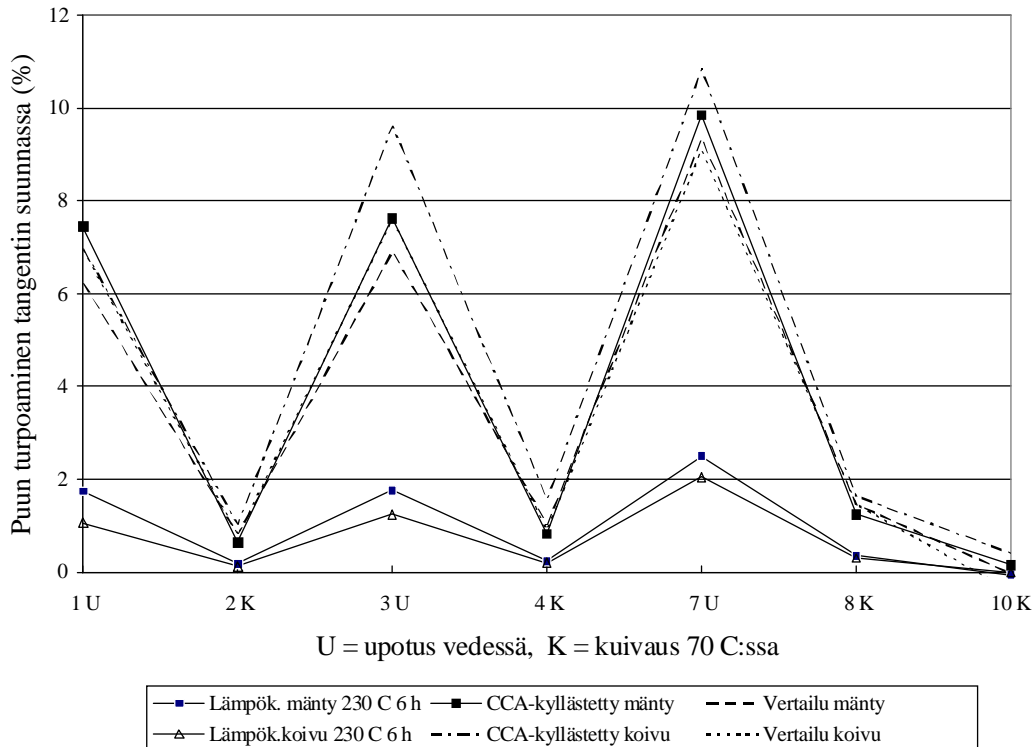
Syklisessä upotus-kuivauskokeessa koekappaleita pidettiin aluksi vedessä tietty aika, jonka jälkeen ne kuivattiin lämpökaapissa. Kuusikappaleilla vesiliotusaika oli 2 tuntia, minkä jälkeen niitä kuivattiin 30 °C:n lämpötilassa 18 tuntia. Mänty- ja koivukappaleilla vastaavat ajat olivat vesiliotus 1 vrk ja kuivaus 70 °C:ssa 24 tuntia. Koekappaleet eivät ehtineet kuivua näissä lämpötiloissa. Sykliä edetessä koekappaleisiin imeytyneen veden määrä kasvoi. Tämän seurauksena tangentin- ja säteen suuntaiset turpoamat kasvoivat.

Syklisessä upotus-kuivauskokeessa lämpökäsitellyn mänty- ja kuusinäytteen kosteuseläminen oli 60 - 70 % pienempi käsittelemättömään näytteeseen verrattuna. Koivulla ero oli vielä suurempi, noin 80 %.

Kuvassa 16 on esitetty männyn ja koivun tangentin suuntaiset turpoamat. Koekappaleet olivat vedessä viikonlopun yli syklissä 4K - 7U normaalin 1

vrk:n sijasta. Tämä pidempi upotusaika näkyy kuvassa turpoamisen lisääntymisenä.

CCA-kyllästetyt mänty- ja koivukappaleet turposivat 1 - 30 % enemmän kuin käsittelemättömät vertailukappaleet.

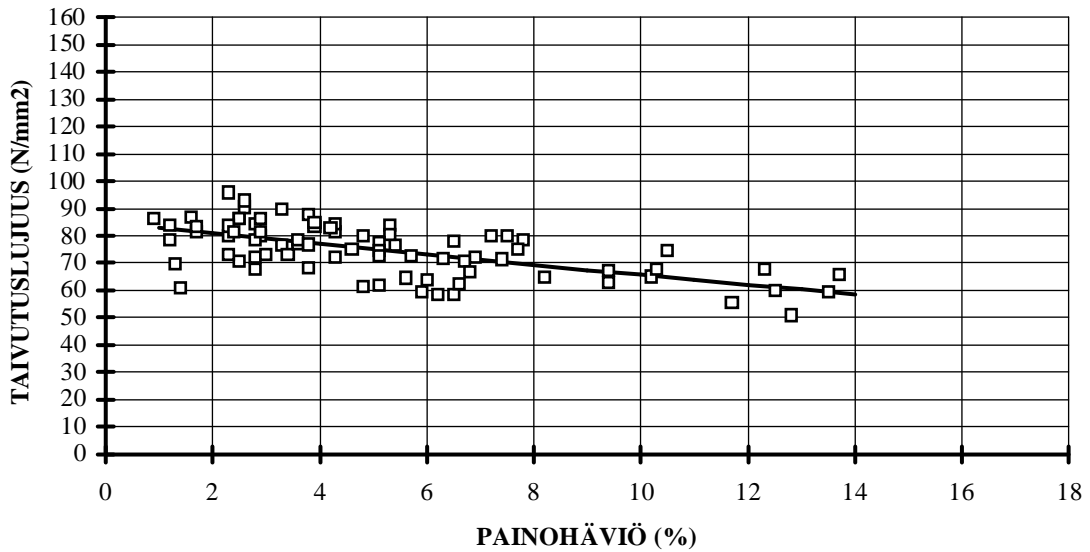


Kuva 16. Lämpökäsittelyn vaikutus männyn ja koivun tangentin suuntaiseen turpoamaan syklisessä upotus-kuivauskokeessa.

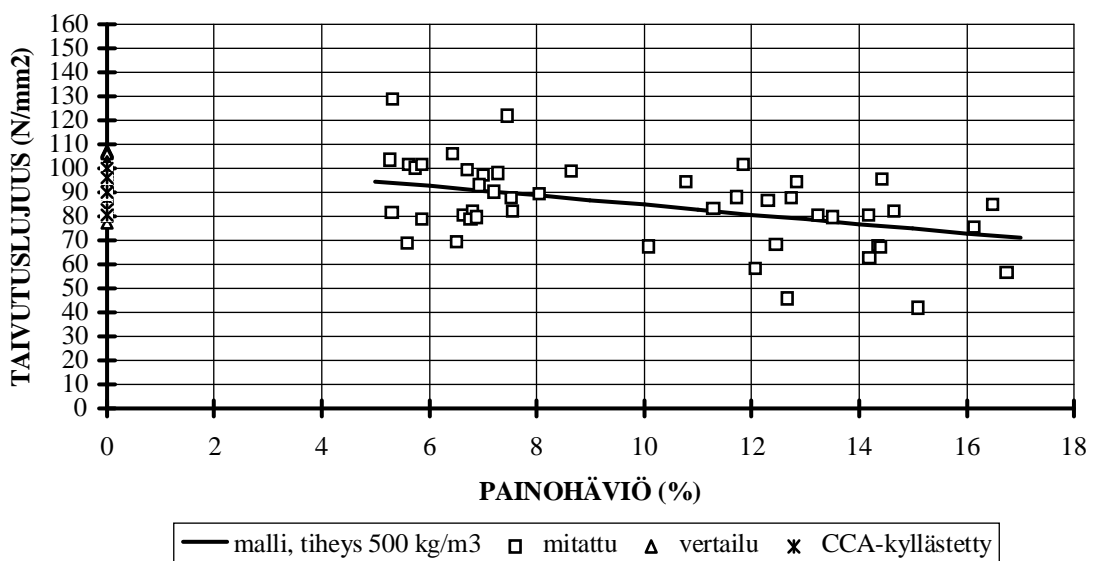
7.4 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS TAIVUTUSLUJUUTEEN

Lämpökäsittelyn aiheuttaman painohäviön kasvaessa männyn ja kuusen taivutuslujuudet heikkenivät (kuvat 17 - 19). Lämpökäsittelyn kuusen taivutuslujuus oli pienentynyt 0 - 25 % ja männyn 3 - 27 % käsittelemättömään puuhun verrattuna.

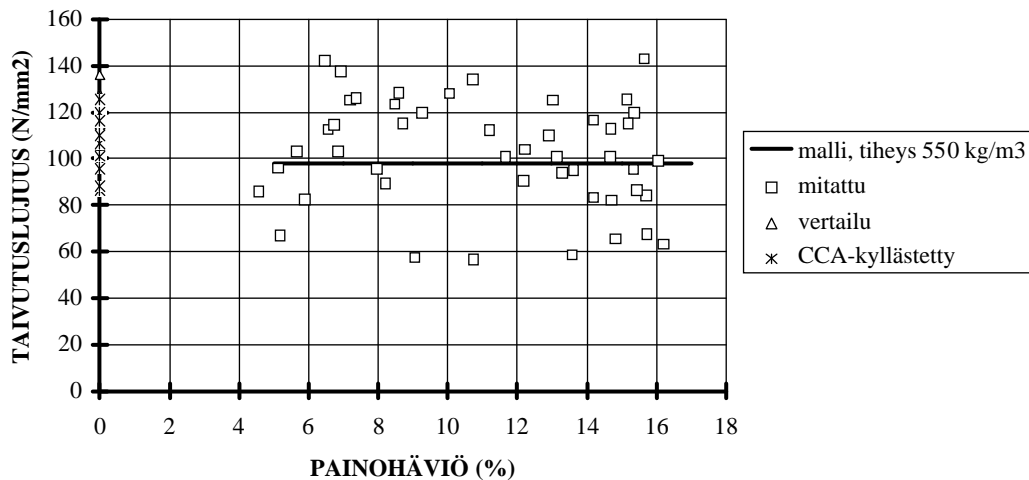
Koivulla painohäviön ja lujuuden välillä ei ollut minkäänlaista riippuvuutta. Muutamien yksittäisten lämpökäsitteltyjen lautojen taivutuslujuus oli huomattavasti alhaisempi, muutamien samalla tasolla kuin vertailunäytteiden taivutuslujuus. Keskimäärin koivun taivutuslujuus aleni lämpökäsittelyssä noin 15 %.



Kuva 17. Lämpökäsitellyn kuusen taivutuslujuuden ja painohäviön välinen riippuvuus. Mallin yhtälö: $\text{taivutuslujuus} = -201,408 \times (1 - e^{-\text{painohäviö}/100}) + 84,818$, selitysaste on 0,38. Kuusivertailun taivutuslujuuden keskiarvo on 77,0 ja keskihajonta 6,2 N/mm².



Kuva 18. Lämpökäsitellyn männyn taivutuslujuuden ja painohäviön välinen riippuvuus. Mäntyvertailun taivutuslujuuden keskiarvo on 97,2 ja keskihajonta 9,7 N/mm².



Kuva 19. Lämpökäsitellyn koivun taivutuslujuuden ja painohäviön välinen riippuvuus. Koivuvertailun taivutuslujuuden keskiarvo on 114,7 ja keskihajonta 10,6 N/mm².

Luujuuden lasku tapahtui kuusella ja männyllä suoraviivaisesti lämpökäsittelyasteen suuruuden mukaisesti. Lämpökäsiteltyjen koivukappaleiden taivutuslujuuksien hajonta oli huomattavan suuri.

7.5 PERMEABILITEETIN MUUTOS

Lämpökäsitellyn aiheuttama kuusen permeabiliteetin (puun huokoisuuden) muutos oli suhteellisen pientä tai sattumanvaraista ilman selvää korrelaatiota käsittelyolosuhteisiin. Tästä johtuen permeabiliteettimuutoksia ja niiden hyödynnettävyyttä ei lähemmin selvitetty.

7.6 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN LAHOAMIS- JA HOMEHTUMISALTTIUTEEN

Korkeassa lämpötilassa (yli 220 °C) tehty puun lämpökäsittely paransi selvästi puun biologista kestävyttä lahotus- ja homekokeissa. Biologisen kestävyden arvioinnissa käyttökelpoinen menetelmä oli tarkastella puussa tapahtunutta painohäviötä. Lämpökäsittelyssä puun väri tummui nopeasti, lahonkesto saatiin aikaan vasta riittävän tehokkaalla käsittelyllä.

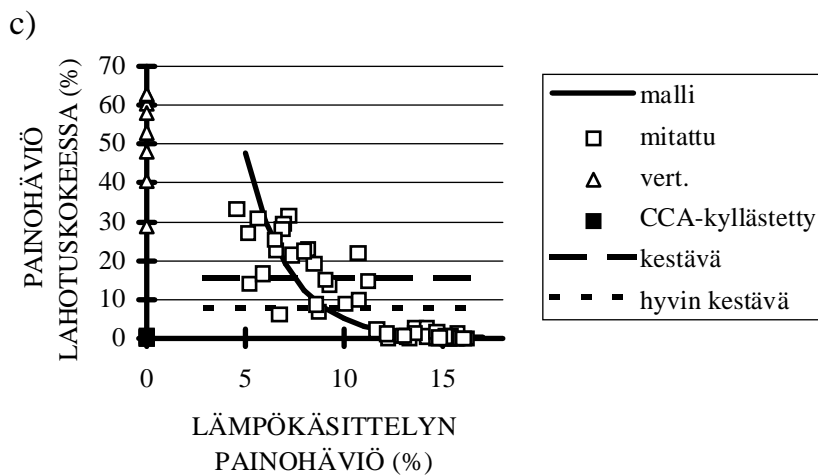
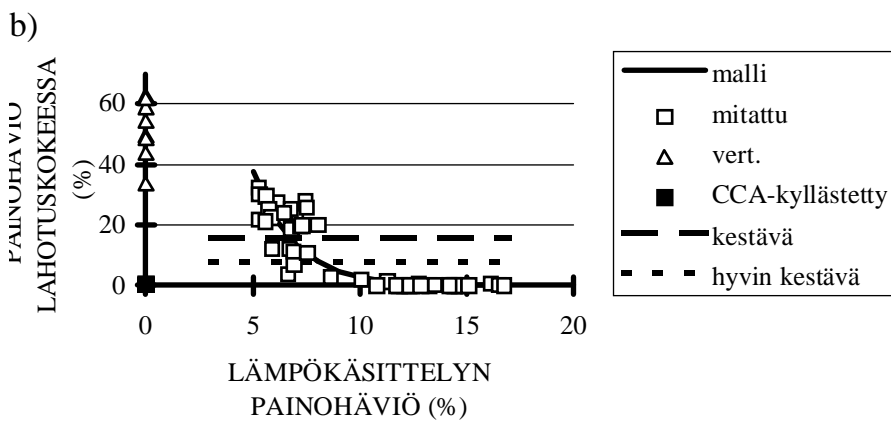
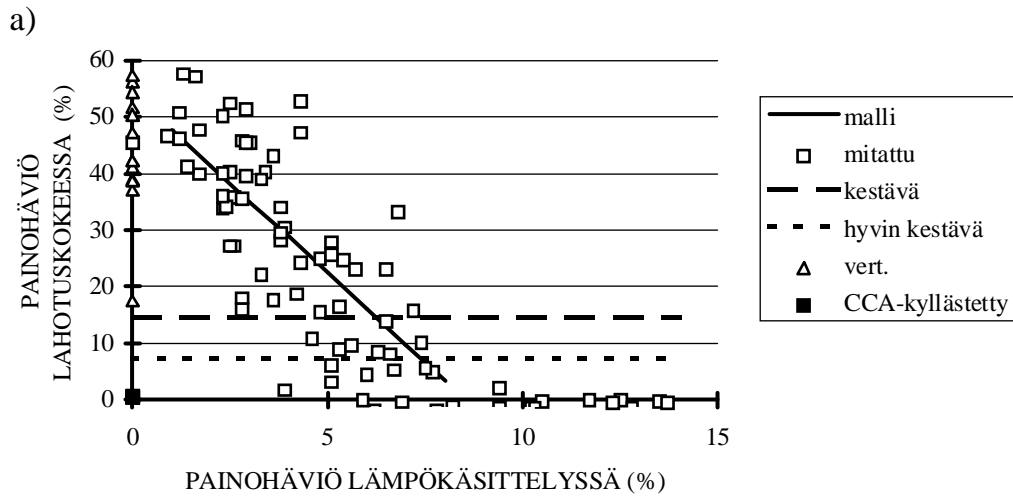
Kuvassa 20 on esitetty kellarisienen EN 113 periaatteen mukaisessa lahotuskokeessa aiheuttaman painohäviön riippuvuus lämpökäsittelyssä syntyneestä painohäviöstä kuusella, männyllä ja koivulla. Lahonkestävyys parani jo silloin, kun lämpökäsittelyn aiheuttama painohäviö oli pieni. Lahonkestävyys parani oleellisesti vasta kun lämpökäsittelyn aiheuttamat painohäviöt olivat suuret (n. 10 %).

Kun lämpökäsittelyn aiheuttama painohäviö oli pieni, tulosten hajonta oli melko suurta, mutta pieneni painohäviön kasvaessa.

Soft-rot kokeen tulokset (maakosketusta simuloiva koe) olivat saman suuntaiset kuin EN 113 kokeen tulokset (kuva 21). Varsinaisen kenttäkokeen tulokset saadaan vasta 5 vuoden kuluttua.

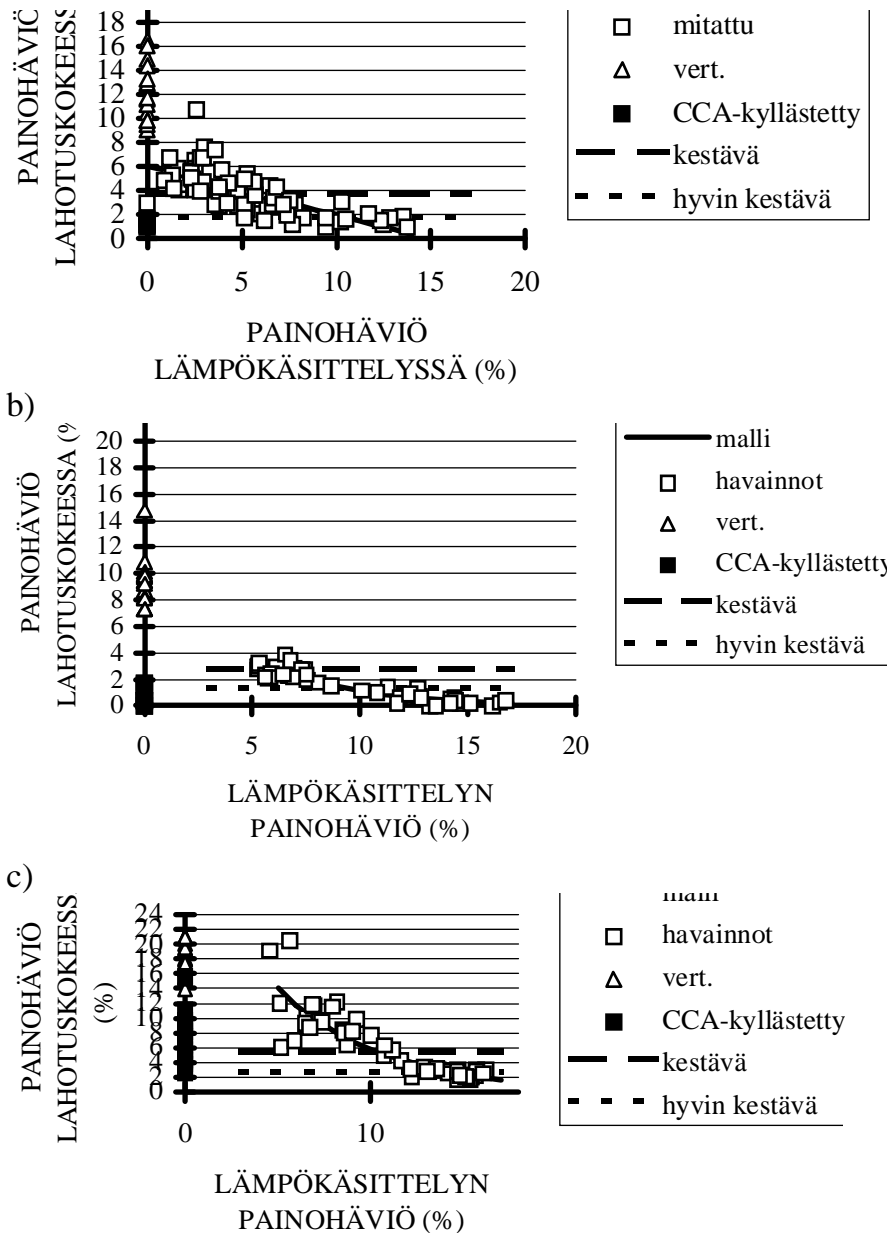
Taulukossa 5 on esitetty millaisilla lämpökäsittelyn painohäviöillä puu sijoittuu puun luontaista lahonkestävyyttä vastaaviin luokkiin. Standardiehdotuksen EN 350-1 (1992) mukaan lasketut kestävyysluokat perustuvat vastaavaan käsittelemättömän puutavaraerän lahotuskokeen painohäviöihin. Lämpökäsittelyn painohäviön suuruus riippui lämpötilan ja käytetyn ajan välisestä yhteydestä.

Homekokeiden mukaan lämpökäsittely lisäsi puun homeen kestävyyttä, mutta mikroskooppista kasvua havaittiin jonkin verran kaikkien koekappaleiden pinnalla. Silmin havaittavaa kasvua ei lämpökäsittelyissä koekappaleissa havaittu. Myös käsittelemättömän kuusen homehtuminen oli normaalia vähäisempää. Lämpökäsittelyn vaikutus homeen kasvuun voitiin havaita homehtumisen hidastumisena, mutta pidemmän altistuksen jälkeen myös homehtumisaste jäi pienemmäksi käsittelemättömään puuhun verrattuna.



Kuva 20. Lahon aiheuttaman painohäviön riippuvuus lämpökäsittelyssä syntyneestä puun painohäviöstä. Kuvaan on merkitty myös vastaavat standardiehdotuksen EN 350-1 perusteella lasketut luontaisesti lahoa hyvin kestävä ja kestävä puun raja-arvot. Mukaeltu EN 113-koee, lahottajasieni *Coniophora puteana*, 16 viikon altistus, a) kuusi, b) mänty, c) koivu.

a)



Kuva 21. Lahon aiheuttaman painohäviön riippuvuus lämpökäsittelyssä syntyneestä puun painohäviöstä. Kuvaan on merkitty myös vastaavat standardiehdotuksen EN 350-1 perusteella lasketut luontaisesti lahoa hyvin kestävä ja kestävä puun raja-arvot. Soft-rot-koe, 24 viikon altistus, a) kuusi, b) mänty, c) koivu.

Taulukko 5. Puun luontaisen lahonkestävyyden luokat (standardiehdotus EN 350-1, 1992) ja tarvittava lämpökäsittelyaste niiden saavuttamiseksi

Luokka	Kuvaus	Puun painohäviö lämpökäsittelyssä (% alkuperäisestä kuivasta puusta)		
		mänty	kuusi	koivu
1	Hyvin kestävä	8	7,5	9
2	Kestävä	7	6	7,5
3	Melko kestävä	5,5	4	6,5
4	Vähän kestävä	0	0	5
5	Laholle altis	0	0	0

7.7 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN MIKRORAKENTEeseen

SEM-näytteitä tarkastettaessa (kuvat 22 - 25) yleisin havainto oli soluseinien hajoaminen lamelleiksi ja seinien murtuminen teräväreunaisiksi siruiksi. Tällaista hajoamista havaittiin yleisesti kaikilla puulajeilla ja kaikissa käsittelysarjoissa kuusen lievimpiä lämpökäsittelyjä lukuun ottamatta.

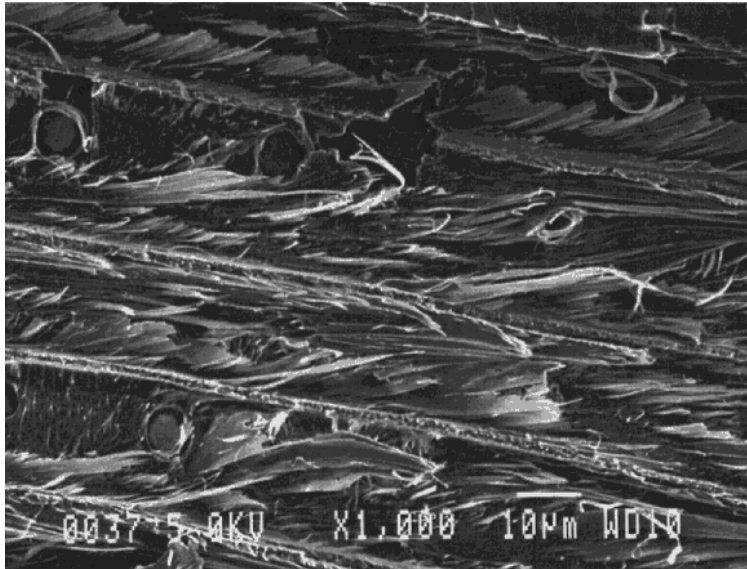
Suurin osa lämpökäsittelyn aiheuttamista muutoksista keskittyi soluseinien sisälle, S₂-kerrokseen. Soluseinän lamellien väliset sidokset, näyttivät heikentyneen ja seinät hajosivat helposti liuskoiksi tai jopa fibrilleiksi.

Kahden rinnakkaisen solun välillä oleva yhdistynyt keskilevy, joka sisältää keskilevyn ja primaariseinät, näytti kestävänsä lämpökäsittelyä sekundaariseinän S₂-kerrosta paremmin.

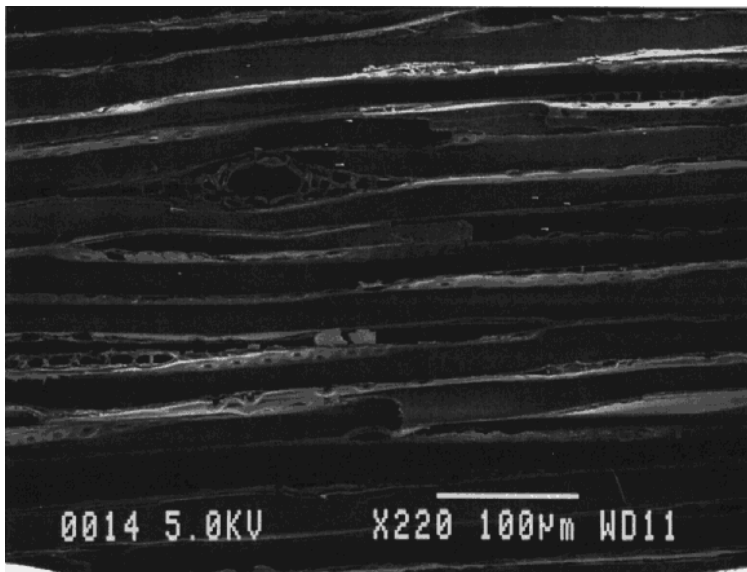
SEM- tutkimuksen mukaan lämpökäsittelyt olivat aiheuttaneet hyvin vähän halkeamia männyn trakeidien ja koivun kuitutrakeidien tai putkiloiden soluontelonpuoleisiin seiniin (S₃-kerrokseen). Soluseinän läpi menevät halkeamat ovat puussa tyypillisiä kosteusvaihteluiden seurauksia.

Lämpökäsittelyillä ei havaittu olevan vaikutusta huokosiin. Männyn solukossa rengashuokokset olivat ehjiä ja osa niistä oli kiinni ja osa auki, kuten vertailukappaleissa. Yhdessä kuvassa, missä puu oli leikkautunut trakeidien seinäkerrosten välistä, huokosten sulkulevyissä olivat näkyvissä margon fibrillisäikeet.

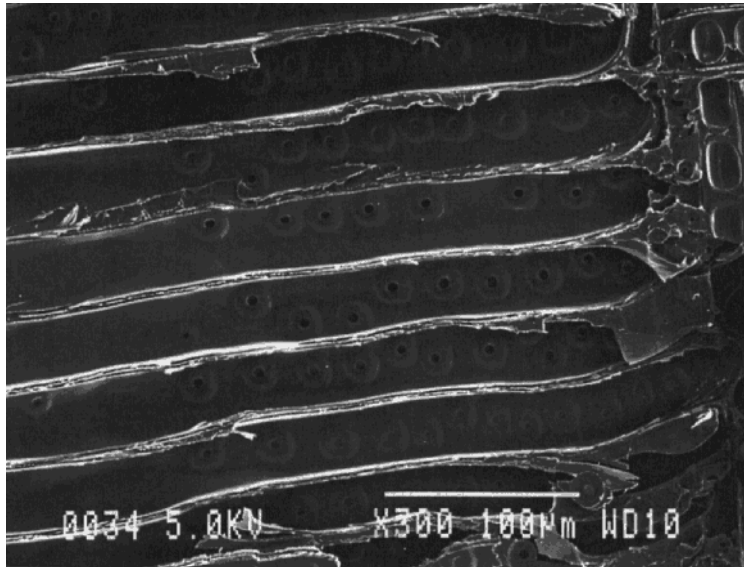
Tyypillistä lämpökäsittelylle oli pihkan häviäminen pihkatiehyistä.



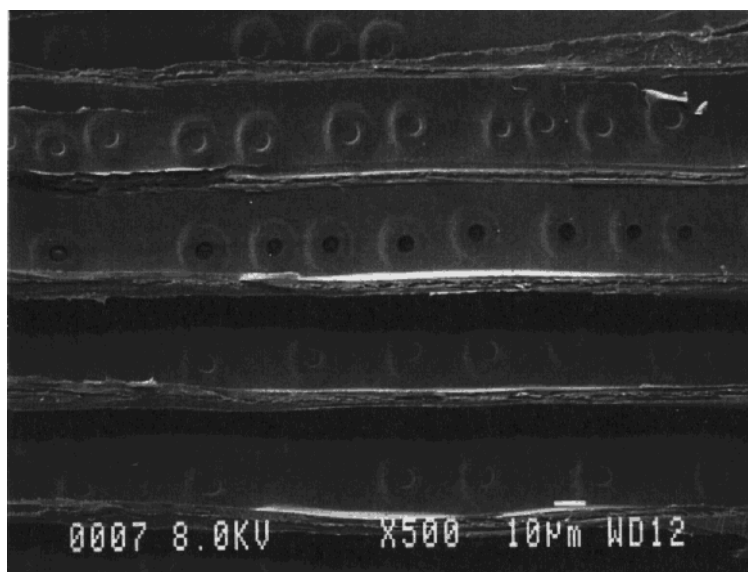
Kuva 22. Lämpökäsiteltyä mäntyä (4 h, 205 °C). Säteen suuntainen pitkittäisleikkaus. Leikkautuminen seinäkerrosten välistä. Huokosten sulkulevyjen fibrillit näkyvät (kuva Leena Paajanen).



Kuva 23. Lämpökäsiteltyä kuusta (6 h, 217,5 °C). Tangentin suuntainen pitkittäisleikkaus. Kuvan keskustasta yläviistoon tyhjentynyt pihkatiehyt (kuva Leena Paajanen).



Kuva 24. Lämpökäsiteltyä mänty (4 h, 230 °C). Säteen suuntainen pitkittäisleikkaus. Rengashuokokset ja soluseinät ehjiä (kuva Leena Paajanen).



Kuva 25. Lämpökäsiteltyä mäntyä (8 h, 230 °C). Säteen suuntainen pitkittäisleikkaus. Rengashuokokset ja soluseinät ehjiä (kuva Leena Paajanen).

7.8 LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUS PUUN PINTAKÄSITTELYYN JA LIIMATTAVUUTEEN

Lämpökäsittelyn vaikutusta pintakäsittelyyn tutkittiin 3 kk:n ja 1 vuoden kenttäkokeen jälkeen. Molemmissa kenttäkokeissa lämpökäsiteltyjen kappaleiden kosteudet olivat 40 - 60 % pienempiä kuin ei-lämpökäsiteltyjen tai CCA-kyllästettyjen näytteiden kosteudet riippumatta siitä olivatko kappaleet pintakäsiteltyjä tai eivät. Lämpökäsiteltyjen kuusikappaleiden kosteudet olivat 7,5 - 9 % ja mäntykappaleiden 9 - 10 %. Vastaavien vertailukappaleiden (ei-lämpökäsitelty ja CCA-kyllästetty) kosteudet olivat kuusi 13 - 14 % ja mänty 16 - 17 %.

Lämpökäsittelyissä kappaleissa havaittiin halkeamia oksien kohdalla. Vertailukappaleissa halkeamia esiintyi pitkin lautaa. Pinnoittamattomissa sekä punamullalla maalatuissa lämpökäsittelyissä laudoissa ja vertailulaudoissa havaittiin sienikasvustoa. Muilla maaleilla pinnoitetuissa laudoissa kasvustoa ei esiintynyt.

Maalin tarunta lämpökäsittelyyn puuhun vaihteli. Osalla tutkituista maalaussysteemeistä alustan lämpökäsittelyllä ei ollut merkitystä maalin taruntaan. Osalla tutkituista maalisysteemeistä adheesioarvot olivat lämpökäsittelyllä puulla noin 20 % pienemmät kuin vertailukappaleilla. Vuoden säärasituksen jälkeen vertailukappaleiden adheesioarvot olivat kasvaneet 0 - 18 % ja lämpökäsiteltyjen lautojen adheesioarvot olivat pudonneet 0 - 20 %. Pintakäsiteltyjen, lämpökäsiteltyjen kappaleiden puustamurtuma oli selvästi suurempi kuin vertailukappaleilla, mikä osoittaa puun pinnan heikkenemisen lämpökäsittelyn vaikutuksesta.

Lämpökäsittelyn puun liimattavuuteen vaikuttavat sekä käsittelylämpötila-että -aika. Lämpötilan ja ajan kasvu heikentävät liimasauman leikkauslujuutta. Käsiteltäessä puuta 230 °C:ssa 4 - 6 tuntia pieneni liimasauman lujuus jopa 60 %. Syynä tähän oli puupinnan haurastuminen. Tämä selittää myös liimaukskokeissa mitatut korkeat (90 - 100 %) puustamurtumaprosentit. Huolimatta pinnan haurastumisen aikaan saamasta kuivalujuuden tuntuvasta pienenemisestä saavutettiin vielä 2 - 2,5 N/mm²:n leikkauslujuusarvoja.

Koska puuhun imeytyneen veden määrä lämpökäsittelyn seurauksena pieneni, vaikeutui myös veden imeytymiseen perustuvien PVAc-liimojen tunkeutuminen lämpökäsittelyyn puuhun. Liiman kovettuminen vaati normaalia huomattavasti pidemmän ajan. Lämpökäsittelyn puun liimauksessa ei ole ongelmia polyuretaanipohjaisilla liimoilla.

8 TULOSTEN TARKASTELUA

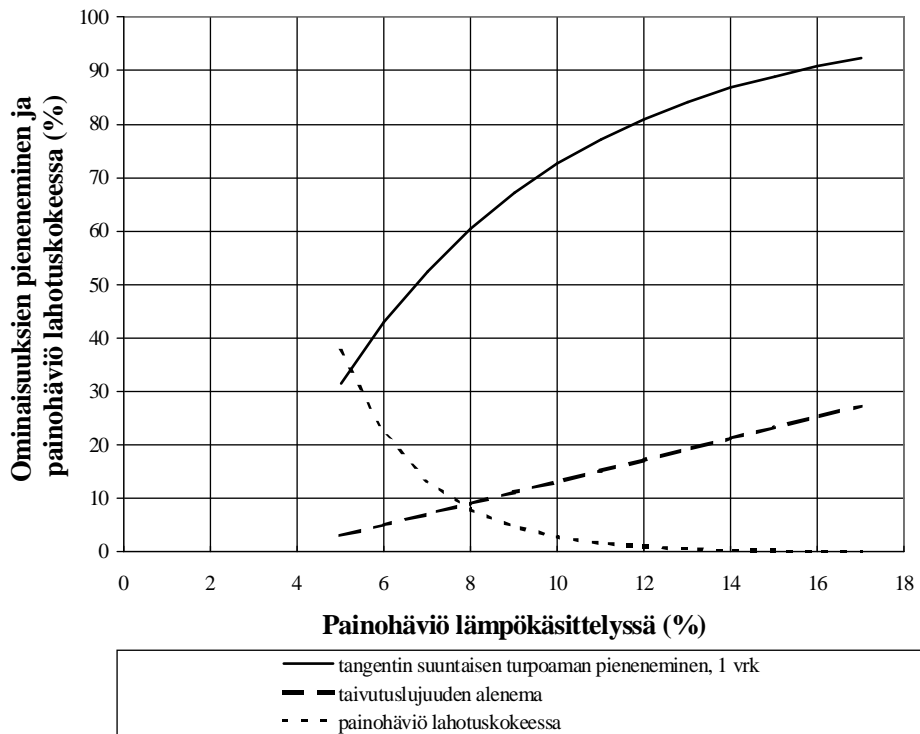
Kuumennettaessa puuta yli 200 °C:n lämpötilassa sen hemiselluloosakomponenteissa (ksylaani ja glukomannaani) tapahtuu merkittäviä muutoksia. Erityisesti puun ksylaanin on todettu hajoavan lämpökäsittelyn aikana. Tällöin kuumennuksen aikana hemiselluloosarakenteista häviää veden lohkeamisen seurauksena hydroksyyliiryhmiä, jolloin hiilihydraattiketjujen väliset vetysidokset vähenevät, mistä puolestaan on seurauksena alhaisempi vedensitomiskyky. Samalla sorptio ja turpoaminen pienenevät sekä lahonkestävyys paranee.

Taivutuslujuuden heikkeneminen johtuu puun lujuudesta vastaavan selluloosan hajoamisesta. Yli 200 °C:n lämpötilassa puuhun muodostuu lämmön ja kosteuden yhteisvaikutuksesta etikkahappoa, joka hydrolysoi glukoosiyksiköiden välisiä glykosidisia sidoksia pilkkoen selluloosaa pienemmiksi ketjuiksi. Myös puun rakenteessa tapahtuvat muutokset aiheuttavat lujuuden heikkenemistä.

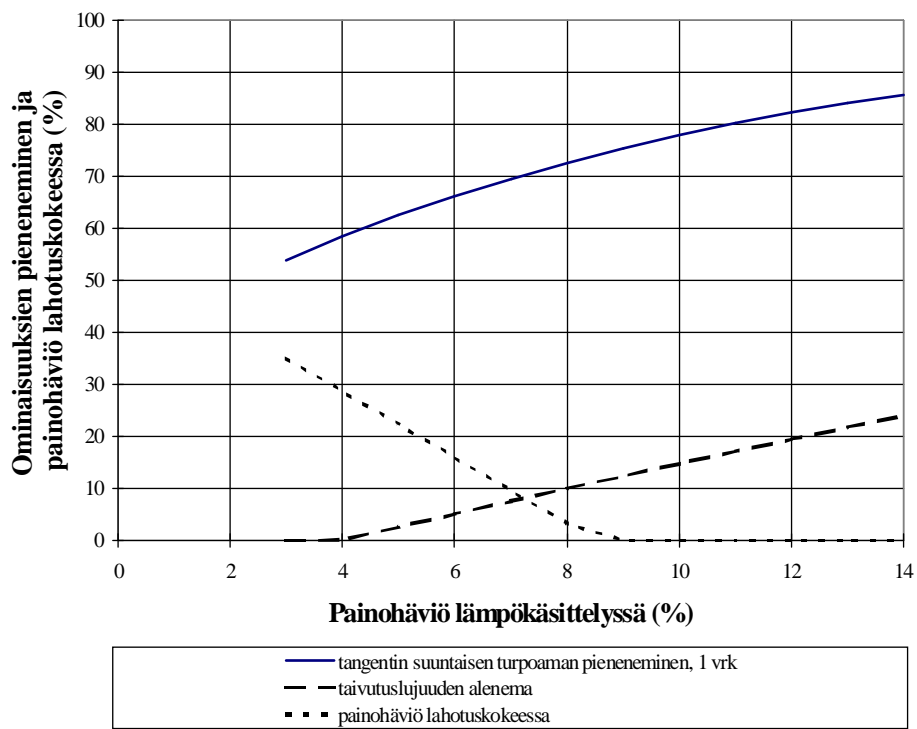
Lämpökäsittelyssä puun väri tummuu läpeensä. Värin muutosta alkaa tapahtua, kun puun lämpötila saavuttaa 150 °C. Värisävyn tummuusaste määräytyy lämpötilan ja ajan funktiona. Syntynyt väri haalistuu ajan myötä UV- valon vaikutuksesta.

Kuvissa 26 - 28 on arvioitu laboratoriokokeiden tulosten perusteella lämpökäsittelyssä tapahtuvan painohäviön vaikutusta lahonkeston paranemiseen ja kosteuselämisen ja taivutuslujuuden pienenemiseen. Tarkastelut on tehty erikseen männylle, kuuselle ja koivulle. Käyttäen hyväksi käyrästöjä voidaan valita optimaalinen lämpökäsittelyaste eri tekijöiden mukaan. Esim., jos männyn lujuuden aleneminen saa olla korkeintaan 10 %, lämpökäsittelyaste eli painohäviö saa olla korkeintaan 8 %. Tällä saavutetaan luontaisesti lahoakestävää (luokka 2) puulajia vastaava lahonkestävyys ja 60 % pieneneminen tangentin suuntaisessa kosteuselämisessä.

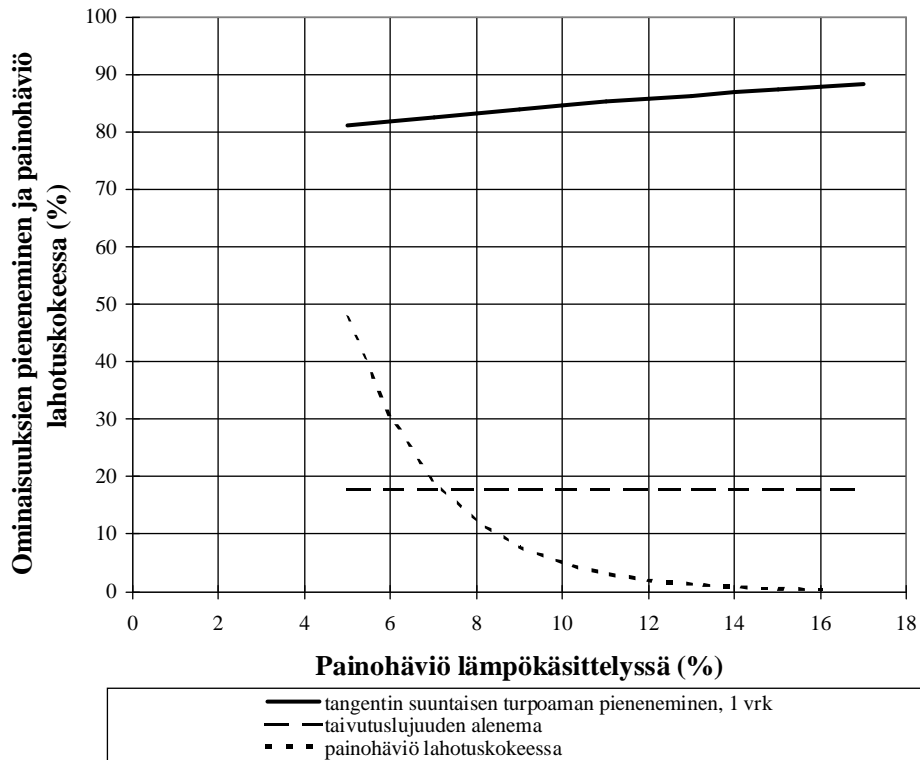
Toisaalta, jos tavoitteena on saavuttaa EN 113 -testissä lahonkestävyyden raja-arvoksi asetettu 3 %:n painohäviö lahotustestissä (EN 113), saavutetaan tämä männyllä noin 10 - 11 % lämpökäsittelyasteella (painohäviö lämpökäsittelyssä). Taivutuslujuuden aleneminen on tällöin alle 15 % ja kosteuselämisen pieneneminen lähes 80 %.



Kuva 26. Lämpökäsittelyn vaikutus männyn ominaisuuksiin.



Kuva 27. Lämpökäsittelyn vaikutus kuusen ominaisuuksiin.



Kuva. 28. Lämpökäsittelyn vaikutus koivun ominaisuuksiin.

Tarkasteltaessa tuloksia on syytä muistaa, että kokeet tehtiin pintapuulle. Sydänpuulla lämpökäsittelyssä syntyvä painohäviö on suurempi, eivätkä parametrit ole suoraan sovellettavissa kappaleille, joissa on sekä pinta- että sydänpuuta.

Lisäksi on vielä syytä huomauttaa, että kokeet on tehty laudoille, joiden kosteus oli tasaannutettu noin 15 %:ksi. Mikäli käsittely aloitetaan tuoreesta tavarasta muuttuvat ennenkaikkea käsittelyajat, kenties myös lämpökäsittelyn puumateriaalin ominaisuudet jossain määrin.

Seuraavassa on lyhyesti esitetty lämpökäsittelymenetelmällä saavutettavat edut ja haitat sekä minkälaisiin tuotteisiin menetelmää voidaan käyttää. Osa allaesityistä tuloksista ei ole sisällynyt tähän nyt esiteltävään projektiin, vaan on tehty muissa yhteyksissä. Ominaisuuksien muutokset tapahtuvat käsittelyasteen funktiona.

Puulle aikaansaadut muutokset:

- värimuutos ruskeasta tummanruskeaan
- kosteuselämisen pieneneminen 50 - 90 %
- biologisen kestävyuden paraneminen
- puun tasapainokosteuden aleneminen noin puoleen normaalista
- lämmönjohtavuuden pieneneminen 0 - 30 %
- pihkan poistuminen puusta
- puu keveneminen

- taivutuslujuuden pieneneminen 0 - 30 %
- syttymisherkkyuden lisääntyminen
- kuivien oksien irtoaminen.

Edellisten lisäksi tässä tutkimuksessa ei pystytty käsittelemään seuraavia asioita, jotka vaativat lisäselvityksiä:

- sydän- ja pintapuun käyttäytyminen samassa kappaleessa
- puumateriaalissa esiintyvän hajonnan merkitys
- lämpökäsittelyuunin lämmönjakauman, ilmannopeuden ja höyrytyksen tasaisuus
- eri lujuusominaisuuksien määrittäminen
- pikakuivauksen liittäminen käsittelyprosessiin
- puusta vapautuvat aineyhdisteet
- tuotteeseen mahdollisesti jäävät emissiot
- lämpökäsittelyn puun työstöön liittyvät kysymykset
- puupöly
- biologisen kestävyuden jatkotutkimukset
- pitkäaikaiskestävyys.

Lämpökäsittelymenetelmällä voidaan tuottaa modifioitua puumateriaalia sekä ulko- että sisäkäyttöön. Lisäksi parantunut lämmöneristävyys ja uuteaineiden (pihkan) poistuminen antavat sille lisäarvoa useissa käyttökohteissa. Silti on vielä lopuksi syytä huomauttaa, ettei lämpökäsiteltyä puuta voida ajatella normaalia kestopuuta korvaavaksi tuotteeksi. Riittävän hyvän lahonkeston aikaansaamiseksi käsittelyn on oltava niin raju, että lujuusominaisuudet kärsivät liikaa.

Projekti puun modifiointi lämpökäsittelyllä jatkuu tuotekehityshankkeena yhdessä teollisuuden kanssa. Lämpökäsittelymenetelmällä aikaansaatavien tuoteominaisuuksien tutkimuksessa on käynnistynyt yhteistyöhanke kahden ranskalaisen tutkimuslaitoksen kanssa.

LÄHDELUETTELO

ASTM D 3273-73T. 1973. Tentative Method of Test for: Resistance to growth of mold on the surface of interior coatings in an environmental chamber. American Society for Testing and Material. S. 626 - 629.

Bourgois, J., Bartholin, M. C. ja Gyyonnet, R. 1989. Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product. Wood Sci. Technol. 23, s. 303 - 310.

Bourgois, J. ja Guyonnet, R. 1988. Characterization and analysis of torrefied wood. Wood Sci. Technol. 22, s. 143 - 155.

Boutelje, J. 1962. Svensk Papperstid. 65, s. 209 - 215.

Bravery, A. 1979. A minutuarised wood block test for the rapid evaluation of wood preservative fungicides. Medd. Svensk Träskyddsinst. No 136, s. 57 - 65.

Brocksiepe, H. 1976. Holzverkohlung. In: Ullmans Encyklopädie der technischen Chemie (4th Ed.). Weinheim: Verlag Chemie. S. 703 - 708.

Burmester, A. 1975. Zur Dimensionsstabilisierung von Holz. Holz Roh Werkst. 33, s. 333 - 335.

Burmester, A. ja Wille, W. 1975. Untersuchungen zur Formbeständigkeit von Teakholz. Holz Roh Werkst. 33, s. 147 - 150.

Burmester, A. 1973. Einfluss einer Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. Holz Roh Werkst. 31, s. 237 - 243.

Burmester, A. 1974. Erfolgreiche Quellungsvergütung mit einfachen Mitteln. Holz- und Kunststoffverarbeitung 9 (8), s. 534 - 538.

Buro, A. 1955. Untersuchungen über die Veränderung der Pilzresistenz von Hölzern durch Hitzbehandlungen in Metallschmelzen. Holzforsch. 9(6), 177 - 181.

Böhner, G. 1977. Zur Wasserdampf- und Luftdurchlässigkeit verschiedener unbehandelter und thermisch behandelter Hölzer. Teil 2: Luftdurchlässigkeit. Holz Roh Werkst. 35 (1), s. 29 - 39.

Böhner, G. 1976. Zur Wasserdampf- und Luftdurchlässigkeit verschiedener unbehandelter und thermisch behandelter Hölzer. Teil 1: Wasserdampfdurchlässigkeit. Holz Roh Werkst. 34 (8), s. 295 - 307.

Dirol, D. ja Guyonnet, R. 1993. The improvement of wood durability by retification process. The International Research Group On Wood Preservation, Section 4 - Process. 24 Annual Meeting, Orlando, May 16 - 21, 1993. 11 s.

Domburg, G., Sergejeva, V. Kalnis, A. ja Kieseķis, O. 1966. Latv. PSR Zinat. Akad. Vestis 12, s. 52 - 57. Viite: Fengel, D. ja Wegener, G. 1989. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter. 613 s.

EN 113. 1989. Wood preservatives: Determination of the toxic values against wood destroying basidiomycetes cultured on an agar medium. 17 s.

EN 350-1 (prEN 350-1). 1992. Durability of wood and wood-based products-Natural durability of solid wood-Part 1. Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood. Document CEN/TC 38 WG 2 - 122. Aug. 1992. 18 s.

Guideline for EN 252. 1992. Field test method for determining the relative protective effectiveness of wood preservatives in ground contact. Inspection and evaluation of the attack of stakes caused by micro-organisms. NWPC Information No 23/90. Nordic Wood preservation Council. 19 s. + liite 3 s.

Feist, W. ja Sell, J. 1987. Weathering behaviour of dimensionally stabilized wood treated by heating under pressure of nitrogen gas. Wood Fiber Sci. 19(2), s. 183 - 195.

Fengel, D. 1966 a. Thermisch und mechanisch bedingte Strukturänderungen bei Fichtenholz. Holz Roh Werkst. 24 (11), s. 529 - 536.

Fengel, D. 1966 b. Heiss und Kaltwasserextrakte von thermisch behandeltem Fichtenholz. Holz Roh Werkst. 24 (1), s. 9 - 14.

Fengel, D. ja Przyklenk, M. 1970. Einfluss einer Wärmebehandlung auf das Lignin in Fichtenholz. Holz Roh Werkst. 28 (7), s. 254 - 263.

Fengel, D. ja Wegener, G. 1989. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter. 613 s.

Fengel; D. 1967. Das Verhalten der Cellulose im Fichtenholz bei thermischer Behandlung. Holz Roh Werkst. 25 (3), s. 102 - 111.

Fillo, Z. ja Peres, T. 1970. Submicroscopic investigation on fibre material from beech wood heated at 120 °C. Holztechnol. 11, s. 270 - 273.

Funaoka, M. et al. 1990. Condensation of lignin during heating of wood. Wood Sci. Technol. 24, s. 277 - 288.

- Giebeler, E. 1983. Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte-/Wärme/Druck-Behandlung. Holz Roh Werkst. 41, s. 87 - 94.
- Hillis, W. 1975. The role of wood characteristics in high temperature drying. J. Inst. Wood Sci. 7(2), s. 60 - 67.
- Hillis, W. 1984. High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: General considerations. Wood Sci. Technol. 18(4), s. 281 - 293.
- Hsu, W. et al. 1988. Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composites. Part 1. Steam pretreatment. Wood Sci. Technol. 22(3), s. 281 - 289.
- Hsu, W. et al. 1989. Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composites. Part 2. Heat post-treatment. Wood Sci. Technol. 23(3), s. 281 - 288.
- Kanagawa, Y. et al. 1988. The increase of permeability in wood by the direct heating method. Mokuzai Gakkaishi 34(6), s. 479 - 484.
- Kollman, F. ja Schneider, A. 1963. Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer. Holz Roh Werkst. 21 (3), s. 77 - 85.
- Kollman F. ja Fengel, D. 1965. Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung. Holz Roh Werkst. 23, s. 461 - 468.
- Kollman, F. ja Schneider, A. 1964. Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200 °C und von Wasserlagerung bis 100 °C auf wichtige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften des Holzes. Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag. 93 s.
- Laxamana, N. 1971. Destructive distillation of wood. Forpridecom Techn. Note No. 110. Viite: Fengel, D. ja Wegener, G. 1989. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter. 613 s.
- Mitchell, P. 1988. Irreversible property changes of small lobolly pine specimens heated in air, nitrogen or oxygen. Wood Fiber Sci. 20(3), s. 320 -335.
- Pecina, H. ja Paprzycki, O. 1988. Wechselbeziehungen zwischen der Temperaturbehandlung des Holzes und seiner Benetzbarkeit. Holzforsch. Holzverwert. 40 (1), s. 5 - 8.
- prEN 807. 1992. Wood preservatives-Determination of the toxic effectiveness against soft rotting micro-fungi and other soil inhabiting micro-organisms. 34 s.

- Roffael, E. ja Schaller, K. 1971. Einfluss thermischer Behandlung auf Cellulose. Holz Roh Werkst. 29(7), s. 275 - 278.
- Rusche, H. 1973a. Festigkeitseigenschaften von trockenem Holz nach thermischer Behandlung. Holz Roh Werkst. 31, s. 273 - 281.
- Rusche, H. 1973 b. Reaktionskinetik des Masseverlustes bei Wärmebehandlung von Holz. Holz Roh Werkst. 31, s. 307 - 312.
- Schneider, A. 1973. Investigation on the conversion drying of lumber at extremely high temperatures Part II. Holz Roh Werkst. 31, s. 198 - 206.
- Schneider, A. ja Rusche, H. 1973. Sorptionsverhalten von Buchen- und Fichtenholz nach Wärmeeinwirkung in Luft und im Vakuum. Holz Roh Werkst. 31, s. 313 - 319.
- Seborg, R., Tarkow, H. ja Stamm, A. 1953. Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood. J. Forest Prod. Res. Soc. 3(3) s. 59 - 67.
- Sergejeva, V. ja Miljutina, S. 1960. Trud. Inst. Lesohoz. Probl. Riga No.21, s. 101 - 106. Viite: Fengel, D. ja Wegener, G. 1989. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter. 613 s.
- Stamm, A. J. 1956. Thermal degradation of wood and cellulose. Ind. Eng. Chem. 48, s. 413 - 417.
- Stamm, A. ja Baechler, R. 1960. Decay resistance and dimensional stability of five modified woods. For. Prod. J. 10(1), s. 22 - 26.
- Suematsu, A., Hirai, N. ja Saito, F. 1980. Properties of hot pressed wood. Part 1. Mokuzai Gakkaishi 26, s. 581 - 586.
- Taniguchi, T. ja Nakato, K. 1966. Bull. Kyoto Univ. For. No 38, 192-199. Viite Fengel, D. ja Wegener, G. 1989. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter. 613 s.
- Teichgräber, R. 1966. Changes in the properties of wood during steaming. Holz Roh Werkst. 24, s. 548 - 550.
- Thompson, W. 1969. Effect of steaming and kiln drying on the properties of southern pine poles. Part II. For. Prod. J., 19(2), s. 37 - 43.
- Troughton, G. ja Rozon, L. 1974. Heat Effects on tensile properties of Douglas-Fir and White Spruce thin sections. Wood Sci. 7(2), s. 116 - 122.
- Viitanen, H. ja Ritschkoff, A.-C. 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Products. Report No 221. 40 s. + liitteet 9 s.

Sarjanimeke	Sarjanumero	Vuosi	
Tekijät			
Julkaisun nimi			
Sivuja	Liitesivuja	ISBN	
<p>Esittelyteksti</p> <p>Puun lämpökäsittelyn on todettu vaikuttavan puun kemialliseen rakenteeseen ja sitä kautta puun eri ominaisuuksiin. Riittävän hyvän lopputuloksen saamiseksi joudutaan käyttämään hyvin korkeita lämpötiloja. Tällöin on suurena vaarana puutavaran syttyminen palamaan. Myös lämpövaikutuksen saaminen tasaisesti puun sisälle pinnan hiiltymättä on tuottanut vaikeuksia. Käsittely on heikentänyt puun lujuutta tehden siitä liian hauraan moniin käyttötarkoituksiin.</p> <p>Tutkimuksessa selvitettiin lämpökäsittelyyn kohdistuneet aikaisemmat tutkimukset, kehitettiin lämpökäsittelyyn sopiva laitteisto sekä selvitettiin kokeellisesti suomalaisen männyn, kuusen ja koivun ominaisuuksien muuntuminen lämpökäsittelyn yhteydessä.</p> <p>Kun puuta kuumennetaan yli 200 °C:n lämpötilassa, sen hemiselluloosakomponenteissa (ksytaanissa ja glukomannaanissa) tapahtuu merkittäviä muutoksia. Erityisesti puun ksytaanin on todettu hajoavan lämpökäsittelyn aikana. Samoin hemiselluloosarakenteista häviää kuumennuksen aikana veden lohkeamisen seurauksena hydroksyyliiryhmiä, jolloin hiilihydraattiketjujen väliset vetysidokset vähenevät, mistä puolestaan on seurauksena alhaisempi vedensitomiskyky. Samalla sorptio ja turpoaminen pienenevät sekä lahonkestävyys paranee.</p>			