

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU
Puutekniikka

Hannu Myllylä

VESILASIKYLLÄSTETYN MÄNNYN TASAPAINOKOSTEUS JA DIMENSIOSTABIILISUUS

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Puutekniikka

MYLLYLÄ, HANNU	Vesilasikyllästetyn männyn tasapainokosteus ja dimensiostabiilisuus
Insinööriyö	43 sivua + 6 liitesivua
Toimeksiantaja	Stora Enso Timber Oy Ltd
Työn ohjaajat	MMT Hannu Boren, DI Tuomo Väärä
Huhtikuu 2010	
Avainsanat	vesilasi, kyllästys, tasapainokosteus, dimensiostabiilisuus

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, miten vesilasilla kyllästäminen vaikuttaa männyn tasapainokosteuteen ja dimensiostabiilisuuteen. Tavoitteena oli löytää vesilasikyllästyille puutuotteille optimaalisin valmistusprosessi, millä dimensiostabiilisuus saataisiin mahdollisimman hyväksi ja tasapainokosteus mahdollisimman alhaiseksi. Tämän takia selvitimme myös erilaisten lämpökäsittelyjen vaikutusta vesilasikyllästetyn männyn ominaisuuksiin.

Koekappaleet valmistettiin männyn pintapuusta ja ne olivat kooltaan 25 x 15 x 50 mm. Koekappaleita oli yhteensä 80 ja ne jaettiin neljään ryhmään. Kaksi ryhmää oli vesilasikyllästetty ja näistä ryhmistä toinen oli lämpökäsitelty 160 °C:ssa ja toinen kuivattu normaalin sahatavaran tapaan 70 °C:ssa. Näitä verrattiin kahteen kyllästämtömään ryhmään, joista toinen oli lämpökäsitelty ja toinen normaalisti kuivattu. Tutkimus toteutettiin tasaannuttamalla koekappaleita eri ilmankosteuksissa. Tasaannutusjaksot muodostivat nousevan ja laskevan syklin, jossa koekappaleita siirrettiin kolmen eri tasaannutushuoneen välillä. Tasaannutukset aloitettiin kuivasta RH 20 % -huoneesta, jonka jälkeen kappaleet vietiin RH 65 % -huoneeseen ja lopulta kosteaan RH 90 % -huoneeseen. Sitten palattiin takaisin RH 65 % -huoneeseen ja lopulta RH 20 % -huoneeseen. Tällainen sykli toistettiin kolme kertaa, jotta tuloksia saataisiin riittävän pitkältä ajalta.

Vesilasikyllästetyn puun tulokset olivat kaikilta osin huonommat kuin kyllästämmättömillä vertailuryhmillä. Vesilasikyllästetyn puun mitat muuttuivat enemmän kosteuden vaihdellessa ja kosteus nousi paljon korkeammaksi kuin vertailuryhmillä. Kosteuserot tosin pysyivät pieninä RH 20 % ja RH 65 % -tasaannutusten aikana, mutta RH 90 % -tasaannutusten aikana vesilasikyllästetty puu keräsi kosteutta selvästi enemmän. Koekappaleet olivat samasta puumateriaalista ja niiden tiheyserot olivat vähäiset, joten puuaineksen erot eivät juurikaan vaikuttaneet tuloksiin. Tulosten luotettavuutta tietysti vähentää koekappaleiden vähäinen määrä, mutta tulokset ovat kuitenkin suuntaa antavia

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Wood Technology

MYLLYLÄ, HANNU Equilibrium Moisture Content and Dimension Stability of Water-glass Impregnated Wood
Bachelor's Thesis 43 pages + 6 pages of appendices
Commissioned by Stora Enso Timber Oy Ltd
Supervisors Hannu Boren DSc, Tuomo Väärä MSc
April 2010
Keywords water-glass, impregnation, equilibrium moisture content, dimension stability

The aim of this study was to solve how water-glass impregnation affects the equilibrium moisture content and dimension stability of wood. It was especially interesting to examine whether dimension stability could be improved or water sorption reduced by water-glass impregnation. After water-glass impregnation the products can be treated in different ways and therefore the aim was to find the best manufacturing process which would give the wood the best possible properties.

The idea was to keep the specimens in different air conditions and oversee their moisture and dimension changes. Water-glass impregnated specimens were compared to non-impregnated specimens. The specimens were made of pine. Half of the impregnated and non-impregnated specimens were dried in 70 °C degrees and the other half were heat treated in 160 °C degrees.

During the test the moisture content in water-glass impregnated specimens increased much more compared to non-impregnated specimens. Also the dimension changes were bigger compared to non-impregnated specimens. It seems that water-glass impregnation does not improve dimension stability or reduce water sorption. However, water-glass impregnation can improve many properties of wood. For example, hardness and fire resistance increase due to water-glass treatment. Further study is required to examine what factors affect dimension stability and water sorption of water-glass impregnated wood.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Stora Enso Timberille talvella 2009 – 2010 yhteistyössä Kymenlaakson ammattikorkeakoulun kanssa. Työ oli osa laajempaa vesilasikyllästyksen tutkimushanketta.

Toimeksiantaja oli Stora Enso Timber Oy Ltd, ja työn ohjaajina toimivat DI Tuomo Väärä ja MMT Hannu Boren Kymenlaakson ammattikorkeakoulusta. Heidän lisäksi kiitän vielä Kymenlaakson ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratorion henkilökuntaa.

Kotkassa 11.5.2010

Hannu Myllylä

SISÄLLYS

1	JOHDANTO JA KESKEISET KÄSITTEET	7
2	TAUSTATIEDOT	8
2.1	VESILASI	8
2.2	ILMAN KOSTEUS	9
2.3	PUUN TASAPAINOKOSTEUS JA HYGROSKOOPPISUUS	10
2.4	SORPTIO	11
2.5	KOSTEUDEN MITTAAMINEN	11
3	KOSTEUSELÄMINEN	12
3.1	YLEISTÄ	12
3.2	KOSTEUSELÄMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	13
3.3	KOSTEUSELÄMISEN VÄHENTÄMINEN	14
4	PUUN KYLLÄSTYS	15
4.1	YLEISTÄ	15
4.2	KYLLÄSTYVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	16
4.2.1	<i>Puun mikroskooppisesta rakenteesta johtuvat tekijät</i>	<i>16</i>
4.2.2	<i>Puun kosteuden vaikutus kyllästyvyyteen</i>	<i>16</i>
4.2.3	<i>Puulajien erot kyllästyvydessä</i>	<i>17</i>
4.2.4	<i>Kevät- ja kesäpuun erot kyllästyvydessä</i>	<i>17</i>
4.2.5	<i>Sydän- ja pintapuun erot kyllästyvydessä</i>	<i>17</i>
5	LÄMPÖKÄSITTELY	18
5.1	YLEISTÄ	18
5.2	LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUKSET PUUN KEMIAALLISIIN OMINAISUUKSIIN	19
5.3	LÄMPÖKÄSITTELYN VAIKUTUKSET PUUN FYSIKAALISIIN OMINAISUUKSIIN	19
6	KOEJÄRJESTELYT	21
6.1	LAITTEISTO	21
6.2	KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS	21
6.3	KYLLÄSTYS	22
6.4	KUIVAUS JA LÄMPÖKÄSITTELY	22
6.5	MITTAUKSET	23
7	TUTKIMUSTULOKSET	24
7.1	TASAPAINOKOSTEUS	24
7.2	TILAVUUDEN MUUTOKSET	28
7.3	SÄTEEN JA TANGENTIN SUUNTAINEN ELÄMINEN	31
7.4	ASE-ARVOT	34
8	TULOSTEN TARKASTELU	35
8.1	KOSTEUS	35
8.2	DIMENSIOSTABIILISUUS	36
9	TULOSTEN TILASTOLLINEN TARKASTELU	37
9.1	KOSTEUSEROJEN TILASTOLLINEN MERKITSEVYYS	38
9.2	TILAVUUDEN MUUTOSTEN TILASTOLLINEN MERKITSEVYYS	39

10 JOHTOPÄÄTÖKSET40

LÄHTEET

LIITTEET 1 – 2

Liite 1. Kuvat vesilasin valumasta

Liite 2. Koekappaleiden mittaustaulukko

1 JOHDANTO JA KESKEISET KÄSITTEET

Puun kyllästämistä vesilasilla on tutkittu paljon. Suomessa vesilasikyllästys ei ole kuitenkaan yleistynyt, koska ongelmana on ollut kotimaisten havupuulajien huono kyllästyyvyys vesilasilla. Ongelmana on ollut se, että liukenematonta, suurimoolisuhteista vesilasia ei olla saatu tunkeutumaan puuhun riittävästi. Pienimoolisuhteista vesilasia on saatu tunkeutumaan paremmin, mutta se liukenee helpommin pois. Vesilasikyllästystä on kehitetty Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa vuodesta 2006 lähtien. Kyllästysmenetelmää ja laitteistoa on kehitetty siten, että liukenematonta vesilasia saadaan puuhun riittävästi. (Boren 2009.)

Vesilasin suurin etu perinteisiin kyllästysaineisiin verrattuna on sen ympäristöystävällisyys ja vaarattomuus terveydelle. Vesilasilla on onnistuttu parantamaan monia puun ominaisuuksia. Se suojaa puuta palamiselta, lisää puun kovuutta ja suojaa sitä pieneliöiltä ja homeelta. Vesilasi ei sisällä mitään myrkkyjä, toisin kuin perinteiset kyllästeet. Ainoa varsinainen terveysongelma on vesilasin korkea pH. (Boren 2009.)

Vesilasikyllästetyillä tuotteilla voisi siis olla kaupallista potentiaalia. Sopivia käyttökohteita tuotteille voisivat olla säärasitukselle altistuvat rakennusten puuosat, esimerkiksi ikkunanpuitteet ja terassilaudat. Vesilasikyllästetyn puun ominaisuuksia täytyy kuitenkin tutkia riittävästi, ennen kuin teollinen tuotanto voidaan aloittaa.

Vesilasikyllästys voidaan tehdä monella eri tavalla. Itse vesilasia on olemassa eri liuosväkevyyksinä ja myös jälkikäsitteily voidaan tehdä eri tavoilla. Jälkikäsitteilyn tarkoituksena on lisätä vesilasin polymeroitumista puuhun, jotta sen liukoisuus vähenee. Yleensä jälkikäsitteily tehdään lämpökäsittelemällä puuta korkeassa lämpötilassa. Tärkeintä olisi löytää optimaalinen valmistusprosessi, millä vesilasikyllästetyn puun ominaisuudet saadaan mahdollisimman hyväiksi. (Boren 2009.)

Tässä opinnäytetyössä haluttiin selvittää, voidaanko vesilasikyllästyksellä pienentää puun kosteuselämistä ja kosteuden imeytymistä puuhun. Puutuotteiden suurimpia ongelmiahan on se, että mitat muuttuvat puun kostuessa ja kuivuessa. Tämän takia puu-

tuotteet myös halkeilevat ja niihin syntyy muodonmuutoksia. Myös kosteus itsessään on ongelma, koska liian kostea puu homehtuu helposti ja sen lahoamisriski kasvaa.

Tutkimus toteutettiin tasaannuttamalla vesilasikyllästettyä ja kyllästämätöntä puuta eri ilmankosteuksissa ja seuraamalla niiden kosteutta ja mittamuutoksia. Halusimme myös selvittää, minkälainen vaikutus erilaisilla lämpökäsittelyillä on puun kosteuteen ja mittamuutoksiin. Sen takia meillä oli vertailtavana kahdessa eri lämpötilassa käsiteltyä vesilasikyllästettyä puuta ja kahdessa eri lämpötilassa käsiteltyä kyllästämätöntä puuta.

Tutkimuksen keskeisiä käsitteitä ovat puun tasapainokosteus, hygroskooppisuus, kosteuseläminen ja dimensiostabiilisuus. Puun tasapainokosteudella tarkoitetaan sitä kosteutta, mihin puu asettuu ollessaan tasapainossa ympäröivän ilman kanssa. Puun hygroskooppisuus puolestaan tarkoittaa sitä, että puu voi imeä itseensä kosteutta ympäröivästä ilmasta tai vastaavasti luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan. Puun kosteuselämisellä tarkoitetaan puun mittojen muuttumista ilmankosteuden vaihdellessa. Dimensiostabiilisuus tarkoittaa mittapysyvyyttä eli sitä, kuinka paljon mitat muuttuvat kosteuden vaihdellessa. (Kärkkäinen 2003.)

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana laajempaa vesilasikyllästyksen liittyvää tutkimusta, jossa olivat mukana Kymenlaakson ammattikorkeakoulu ja Stora Enso Timber. Tutkimus tehtiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratorion tiloissa ja välineillä.

2 TAUSTATIEDOT

2.1 Vesilasi

Vesilasiksi kutsutaan natriumsilikaatteja, jotka koostuvat piidioksidista ja natriumoksidista. Vesilasia valmistetaan liuottamalla kvartsihiekkaa 1000 °C:n lämpötilassa. Vesilasi on palamaton, hajuton ja vaaraton ympäristölle ja terveydelle. Vesilasia käytetään yleisesti sellu-, maali- ja liimateollisuuden raaka-aineena. (Jyväskylän messut Oy 2007.)

Ainoa varsinainen terveysongelma on vesilasin korkea pH, eli aine on emäksinen. Vesilasin pH on yleensä 11 - 13. Siihen vaikuttavat piidioksidin ja natriumoksidin moolisuhte liuoksessa sekä liuoksen konsentraatio. pH:ta nostavat konsentraation kasvaminen ja moolisuhteen pienentyminen. Konsentraatiolla tarkoitetaan liuoksen väkevyyttä. Vesilasin käyttäytymiseen vaikuttavat lisäksi kuiva-ainepitoisuus, tiheys ja viskositeetti. (Boren 2009.)

Vahvasti emäksiset aineet ovat syövyttäviä. Syövyttävyys on sitä suurempi, mitä happamampi tai emäksisempi aine on. pH-luvut 1 - 6 ovat happamia, 7 on neutraali ja 8 - 14 ovat emäksisiä. Määritelmän mukaan happo voi luovuttaa vetyionin, kun taas emäs voi vastaanottaa vetyionin. (Arvonen, Levonen 2002, 74.)

Vesilasin kovettuminen puun huokosissa alkaa veden haihtuessa kyllästyksen jälkeen. Polymeroituminen alkaa, kun vesilasi reagoi puusolukon happamien karboksyyliryhmien kanssa ja kun pH on laskenut kymmeneen. (Boren 2009.) Polymeroitumiseksi kutsutaan reaktiota, jossa suuri joukko samanlaisia molekyyliä liittyy toisiinsa (Arvonen, Levonen 2002, 163). Vesilasin polymeroitumista voidaan nopeuttaa lämpökäsittelyllä, metallisuoloilla ja erilaisilla hapoilla (Boren 2009).

Aiemmin vesilasikyllästys on ollut ongelmallista varsinkin happamilla, kotimaisilla havupuilla. Väkevillä 3,3-moolisuhteisilla vesilasiliuoksilla ei olla saatu riittävän syvää tunkeutumaa puuhun. Toisaalta pienimoolisuhteinen vesilasi huuhtoutuu helpommin pois puusta ja korkeamman pH:nsa vuoksi heikentää puun muita ominaisuuksia. Aikaisempien tutkimusten mukaan vesilasin kunnollinen polymeroituminen vaatii korkean, yli 100 °C:n lämpökäsittelyn, jolloin myös vesilasin liukoisuus vähenee selvästi. (Boren 2009.)

2.2 Ilman kosteus

Maksimikosteudella tarkoitetaan suurinta kosteutta, minkä tietty ilmamäärä voi sisältää tietyssä lämpötilassa. Lämmin ilma voi sisältää enemmän kosteutta kuin kylmä. Kostean ilman jäähtyessä absoluuttinen kosteus pysyy samana, mutta suhteellinen

kosteus kasvaa, kunnes saavutetaan kastepistelämpötila. Silloin ilma tulee kylläiseksi ja kosteus tiivistyy pisaroiksi. (Hautala, Peltonen 1999, 220.)

Absoluuttinen kosteus on ilmassa olevan vesihöyryn massa tilavuusyksikköä kohden. Useimmiten yksikkönä käytetään g/m^3 . (Hautala, Peltonen 1999, 220.)

Suhteellinen kosteus, RH eli Relative Humidity, on absoluuttisen kosteuden ja maksimikosteuden suhde. Se kertoo, kuinka monta prosenttia ilmassa on kyseisen lämpötilan maksimikosteudesta. (Hautala, Peltonen 1999, 220.)

2.3 Puun tasapainokosteus ja hygroskooppisuus

Puuaines on hygroskooppista, eli sillä on kyky imeä itseensä tai vastaavasti luovuttaa vettä ympäröivään ilmaan. Kutakin lämpötilaa ja ilman suhteellista kosteutta vastaa tietty tasapainokosteus, jonka puu saavuttaa ollessaan tasapainossa ympäröivän ilman kanssa. Tällöin puuhun saapuu ja siitä lähtee yhtä paljon vettä, eli puu on saavuttanut hygroskooppisen tasapainopisteen. (Kärkkäinen 2003, 175.) Kun tiedetään ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, voidaan puun tasapainokosteutta arvioida erilaisten taulukoiden avulla. Kokeellisesti selvittämällä on löydetty eri ilmankosteuksia vastaavat puun tasapainokosteudet, jotka voidaan katsoa taulukosta. (Siimes 1983, 26.) Hygroskooppisen tasapainokosteuden lisäksi on olemassa kapillaarinen tasapainokosteus, jonka puu saavuttaa ollessaan kosketuksissa vapaaseen veden pintaan. (Koponen, Lehtinen 1997,16.)

Puun tasapainokosteus ei voi kuitenkaan ilmassa nousta puunsyiden kyllästymispistettä suuremmaksi. Puunsyiden kyllästymispisteen (PSK) määritelmä ei ole vakiintunut. Yleisimmän määritelmän mukaan PSK:ssa puun soluseinämät ovat kyllästyneet vedellä, mutta soluontelot ovat vapaina vedestä. Toisen yleisen määritelmän mukaan PSK on se maksimaalinen kosteus, jonka puu voi saavuttaa vesihöyrystä suhteellisen höyrynpaineen, ϕ , ollessa 1. (Koponen, Lehtinen 1997, 27.)

2.4 Sorptio

Puun tasapainokosteuden kuvaamiseen käytetään ns. sorptioisotermiä. Siinä tasapainokosteus ilmoitetaan ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Puun kosteuden kasvaessa puhutaan adsorptiosta ja puun kuivuessa puhutaan desorptiosta. Desorptiossa puun tasapainokosteus on korkeammalla tasolla kuin adsorptiossa. (Koponen, Lehtinen 1997,16.)

Puuaineen tasapainokosteus eli hygrooskooppinen tasapainopiste riippuu siitä, onko puun kosteus lisääntymässä vai vähenemässä. Tasapainokosteus on kosteuden vähentäessä korkeampi, kuin jos se on saamassa kosteutta. Kun ominaisuus riippuu kappaleen aikaisemmasta tilasta, on kyse hystereesistä. Adsorptiossa puun kosteus lisääntyy ja desorptiossa puu luovuttaa vesihöyryä. Ilmiön yhteisenä nimityksenä käytetään termiä sorptio. (Kärkkäinen 2003, 175.)

Sorption kuvaajaan vaikuttaa myös puun kuivaustapa. Esimerkiksi ilmakeivä puutavaran tasapainokosteus sorptiossa on suurempi kuin korkeassa lämpötilassa kuivatun. Periaatteessa tämä ero säilyy ikuisesti, ellei puutavaraa yhtenäistämiskuivata. (Kärkkäinen 2003, 183.)

2.5 Kosteuden mittaaminen

Puun kosteuden määrittämiseen on useita keinoja. Luotettavana keinona tunnetaan ns. lämpökaappimenetelmä. Siinä puun massa mitataan ensin kosteana, minkä jälkeen puu kuivataan lämpökaapissa absoluuttisen kuivaksi ja massa mitataan uudestaan. Kosteus lasketaan vertaamalla puussa olevan veden massaa absoluuttisen kuivan puun massaan. (Kärkkäinen 2003, 178.)

Lämpökaappimenetelmän liittyy kuitenkin tiettyjä ongelmia. Ensinnäkin kaapin lämpötila ja tuuletus sekä kuivausaika vaihtelevat eri standardeissa, mikä vaikuttaa tuloksiin. Yleensä kuivausaika on yksi vuorokausi ja lämpötila n.100 °C. Puusta saattaa veden lisäksi haihtua myös muita aineita. Yleensä tosin kuivauslämpötila on n. 100 °C, jolloin puusta ei vielä haihdu muita komponentteja kuin vettä. Lisäksi yli 100 °C as-

teen kuivauslämpötilasta huolimatta puusta ei välttämättä tule täysin kuivaa. Puuhun saattaa jäädä vettä n. 0,05 – 0,5 % olosuhteiden mukaan. (Kärkkäinen 2003, 178.)

Puun kosteus lasketaan kaavalla:

$$u = \frac{100(m_u - m_o)}{m_o},$$

missä u = kosteussuhde %.

m_u = puun massa kosteana.

m_o = puun massa absoluuttisen kuivana. (1)

Yleinen menetelmä puun kosteuden nopeaan mittaamiseen on sähkövastukseen perustuvan mittarin käyttö. Menetelmä perustuu siihen, että puun sähkövastus alenee voimakkaasti kosteuden kasvaessa. Vastusmittari on kuitenkin epätarkka, koska kosteus jakaantuu puukappaleeseen epätasaisesti ja koska puulaji ja lämpötila vaikuttavat sähkövastukseen. Mittari voidaan tosin kalibroida eri puulajeille. Vastusmittaria voidaan kuitenkin käyttää vain suhteellisen pienellä kosteusalueella. Sillä ei saada tarkkoja lukemia, jos puu on hyvin kuivaa tai jos kosteus on puun syiden kyllästymispistettä korkeammalla. Vastusmittarilla kosteus saadaan kuitenkin hyvin nopeasti selville, minkä vuoksi se on yleisessä käytössä. (Kärkkäinen 2003, 180.)

Lämpökaappimenetelmä ja vastusmittaus ovat yleisimmät tavat mitata puun kosteus. Näiden lisäksi on kuitenkin monia harvinaisempia tapoja, joita ei tässä yhteydessä käsitellä. (Kärkkäinen 2003, 178.)

3 KOSTEUSELÄMINEN

3.1 Yleistä

Puu kutistuu kuivuessaan ja vastaavasti turpoaa kosteuden lisääntyessä. Kosteuselämistä tapahtuu kuitenkin vain puunsyiden kyllästymispistettä alhaisemmissa kosteuksissa. Kuivuessaan puu alkaa kutistua, kun se saavuttaa puunsyiden kyllästymispistet-

tä vastaavan kosteuden. Kuivan puun kostuessa turpoaminen jatkuu puunsyiden kyl-
lästymispistettä vastaavaan kosteuteen asti. Puun kosteuden ollessa puunsyiden kylläs-
tymispistettä korkeampi ei kosteudenvaihtelu juurikaan vaikuta puun mittoihin.
(Kärkkäinen 2003,187.) Toisaalta joidenkin tutkimusten mukaan elämistä voi kuiten-
kin tapahtua myös puunsyiden kyllästymispistettä korkeammassa kosteudessa (Kärk-
käinen 2003,198).

Monilla puulajeilla kutistuminen ei ole lineaarista puunsyiden kyllästymispistettä al-
haisemmissa kosteuksissa. Käytännössä säteen ja tangentin suuntainen kutistuminen
kuitenkin oletetaan lineaariseksi, paitsi kosteussuhteen ollessa hyvin alhainen tai lä-
hellä puun syiden kyllästymispistettä. Pituuden suunnassa kutistuminen etenee poik-
keuksellisesti. Kutistumista ei välttämättä tapahdu lainkaan, ennen kuin kosteus on
laskenut 10 – 15 % tasolle, ja puukappale saattaa jopa pidentyä. Kosteuselämiseen liit-
tyy hystereesi (ominaisuuden riippuminen kappaleen aikaisemmasta tilasta) aivan ku-
ten tasapainokosteuteenkin. Kutistumisen ja paisumisen kuvaajat ovat erilaisia samoin
kuin adsorption ja desorption kuvaajat ovat erilaisia. (Kärkkäinen 2003, 200.)

Puunsyiden kyllästymispiste on kevät- ja kesäpuussa erisuuruinen, ja lisäksi siihen
vaikuttavat puulaji ja lämpötila. Erään tutkimuksen mukaan 20 °C:n lämpötilassa
puunsyiden kyllästymispiste männyn pintapuulla oli 29,1 % kosteudessa, männyn sy-
dänpuulla se oli 27,1 %. Kuusella puunsyiden kyllästymispiste oli 29,3 %:n ja koivul-
la 30,6 %:n kosteudessa. (Kärkkäinen 2003,187.)

3.2 Kosteuselämiseen vaikuttavat tekijät

Kutistumisen ja turpoamisen määrä riippuu puulajista, puun tiheydestä ja suunnasta
vuosilustoihin nähden. Puun kosteuseläminen on anisotropista, eli se elää eri tavalla
eri suuntiin. Puusta voidaan vuosilustojen perusteella erottaa säteen, tangentin ja pi-
tuuden (syiden) suunnat. Pituuden suunnassa puu kutistuu vähiten, puulajista riippuen
n. 0,1 – 0,3 % (tuoreesta puusta absoluuttisen kuivaksi). Säteen suunnassa puu kutis-
tuu n. 3 - 6 % ja tangentin suunnassa 6 – 12 %. (Kärkkäinen 2003,191.)

Puun tiheyden kasvaessa myös kosteuseläminen kasvaa. Tämä pätee ainakin säteen ja tangentinsuuntaiseen elämiseen. Sen sijaan pituuden suuntainen eläminen saattaa monilla puulajeilla jopa vähentyä tiheyden kasvaessa. Tämä voi johtua siitä, että koska kevätpuu kutistuu pituuden suunnassa jopa kaksinkertaisesti kesäpuuhun verrattuna, tiheä, paljon kesäpuuta sisältävä puu kutistuu pituuden suunnassa vähemmän. (Kärkkäinen 2003,191.)

Kevät- ja kesäpuun soluseinämän erojen vuoksi kesäpuu kutistuu säteen ja tangentin suunnassa enemmän kuin kevätpuu. Myös suuremman tiheydensä takia kesäpuu kutistuu säteen ja tangentin suunnassa enemmän. Tangentin suuntaiseen kutistumiseen vaikuttaa ainoastaan kesäpuun kutistuminen, koska heikko kevätpuu ei pysty vastustamaan kesäpuun kutistumista. Säteen suunnassa kutistuminen on kevät- ja kesäpuun kutistumien summa ja siten pienempi kuin tangentin suunnassa. (Kärkkäinen 2003,194.)

3.3 Kosteuselämisen vähentäminen

Kosteuseläminen on puun käytettävyyden kannalta ongelmallista, koska valmiiden puutuotteiden mitat muuttuvat puun kosteuden mukaan. Anisotropia aiheuttaa lisäksi sen, että puun muoto muuttuu kosteuden mukaan. Veden lisäksi monet polaariset nesteet ja kaasut turvottavat puuta. Toisaalta monet ei-polaariset nesteet eivät turvota puuta. Vesi voi tulla puuhun kolmella eri tavalla: nesteenä kapillaarisesti soluonteloiden kautta, höyrynä soluonteloiden kautta tai molekulaarisena diffuusiona soluseinämän kautta. (Kärkkäinen 2003, 201.)

Kosteuselämistä voidaan pienentää rajoittamalla veden pääsyä puuhun, mikä voidaan tehdä useilla eri tavoilla. Mikäli puu joutuu vain tilapäisesti kosketuksiin veden kanssa, se voidaan suojata maaleilla ja muilla pinnoitteilla, jolloin veden siirtyminen kapillaarisesti estyy. Kosteissa olosuhteissa pinnoittaminen ei kuitenkaan riitä, vaan puun hygroskooppisuutta on pyrittävä vähentämään. Puuta voidaan esimerkiksi käsitellä kemiallisesti, jolloin vettä sitovien hydroksyyliyhymien määrä vähenee (esimerkiksi puun käsittely etikkahappoanhydridillä). (Kärkkäinen 2003, 201.)

Tehokkain menetelmä on kuitenkin puun lämpökäsittely eli kuivaaminen korkeissa lämpötiloissa (esim. 180 – 230 °C) ilman happea. Lämpökäsittelyllä puun kosteuselämistä on saatu vähennettyä parhaimmillaan jopa 40 % - 80 %. Puun soluseinämässä oleva vesi voidaan myös korvata jollakin toisella aineella, jolloin kosteuseläminen vähenee. Yleensä tähän käytetään polyetyleeniglykolia, joka on tosin vesiliukoinen aine. Kosteuselämistä voidaan rajoittaa myös mekaanisesti, vaikkapa metallivanteilla. Tällaiset rakenteet kuitenkin ajan mittaan löystyvät, jos puu jatkuvasti turpoaa ja kutistuu. (Kärkkäinen 2003, 202.)

4 PUUN KYLLÄSTYS

4.1 Yleistä

Puun kyllästyksessä puu pyritään täyttämään kyllästysliuoksella, millä tavoitellaan biologisen kestävyuden parantumista. Perinteiset kyllästysaineet sisältävät yleensä sieni- ja/tai hyönteismyrkkyä. (Piispanen 1979, 3.)

Puun kyllästyksen käytetään yleisesti kahta eri menetelmää, täyssolumenetelmää eli Bethell-prosessia ja tyhjäsolumenetelmää eli Rüping-prosessia. Bethell-prosessissa puutavara suljetaan kyllästysylinterin sisään, minkä jälkeen sylinteriin luodaan alkutyhjö. Alkutyhjön tarkoituksena on imeä puusta ylimääräinen vesi pois. Alkutyhjön jälkeen sylinteri täytetään kyllästysliuoksella ja nostetaan painetta reilusti, jolloin liuosta tunkeutuu puuhun. Paine käsittelyn jälkeen ylimääräinen liuos valutetaan pois ja lopuksi luodaan lopputyhjö, jotta ylimääräinen liuos saataisiin imettyä pois. (Nuutinen 1976, 39.)

Rüping-prosessi eroaa Bethell-prosessista siten, että alkutyhjö on jätetty pois. Alkutyhjön pois jättäminen helpottaa ylimääräisen liuoksen poistumista lopputyhjön aikana. Rüping-prosessia käytetään sellaisten kyllästeiden kanssa, jotka eivät kiinnity puuhun kunnolla. Rüping-prosessissa puun soluontelot jäävät suhteellisen vapaiksi kyllästysliuoksesta, mistä tulee nimitys tyhjäsolumenetelmä. (Mansikkamäki, Nurmi, Ylinen 1983, 7.)

Ennen kyllästystä puu on kuivattava alle puunsyiden kyllästymispisteen, koska solunteloissa ei saa olla vapaata vettä. Liiallinen kosteus haittaa ilman poistumista alkutyhjön aikana. Sopiva kosteus on alle 25 %. (Nuutinen 1976, 17.)

4.2 Kyllästyvyteen vaikuttavat tekijät

4.2.1 Puun mikroskooppisesta rakenteesta johtuvat tekijät

Anisotrooppisen rakenteensa vuoksi puu läpäisee nesteitä parhaiten pituussuunnassa, toiseksi parhaiten säteen suunnassa ja huonoiten tangentin suunnassa. Männyn pinta-puussa tangentin, säteen ja pituuden suuntaisen läpäisevyyden suhde on n. 1:20:400. Pituussuunnassa nesteet liikkuvat trakeideja pitkin ja säteen suunnassa lähinnä ydinsä-teitä pitkin. Tangentin suunnassa nesteet kulkevat lähinnä trakeidien välisten rengashuokosten kautta. Trakeidien pituuden kasvaessa läpäisevyys yleensä paranee. (Nuutinen 1976, 7.)

Solujen välillä nesteet tunkeutuvat huokosten kautta, joita havupuussa on kolmea eri tyyppiä: yksinkertaiset huokokset, rengashuokokset ja yksipuoliset rengashuokokset. Yksinkertaisia huokosia on vierekkäisten parenkyymisolujen välillä ja yksipuolisia rengashuokosia puolestaan parenkyymisolujen ja pitkittäisten trakeidien välillä. Näiden huokosten läpi nesteet eivät pääse tunkeutumaan, koska huokoskalvot ovat paksut eikä niissä ole reikiä. Rengashuokosia on pitkittäisten trakeidien välillä sekä ydinsädetrakeidien ja pitkittäisten trakeidien välillä. Nesteiden siirtyminen tapahtuu lähinnä rengashuokosten kautta. (Nuutinen 1976, 10.)

4.2.2 Puun kosteuden vaikutus kyllästyvyteen

Yleensä puu kyllästyy parhaiten kosteuden ollessa hieman alle puunsyiden kyllästymispisteen. Tuoreessa puussa rengashuokokset ovat avoinna, mutta puun kuivuessa ne sulkeutuvat, jolloin nesteiden liikkuminen vaikeutuu. Puunsyiden kyllästymispisteen alapuolella lähes kaikki kevätpuun huokokset ovat sulkeutuneet, mutta kesäpuun soluisista osa jää avoimeksi. Huokosten sulkeutumista kutsutaan aspiraatioksi. (Nuutinen 1976, 12.)

4.2.3 Puulajien erot kyllästyvydessä

Mänty kyllästyy huomattavasti kuusta paremmin, mikä johtuu useista eri tekijöistä. Ensinnäkin männyn ydinsäteissä parenkyymisolujen väliset yksinkertaiset huokokset ovat suuremmat kuin kuusella. Lisäksi männyllä ydinsäteiden ja pituussuuntaisten trakeidien välillä on suuria ikkunamaisia huokosia. Kuusella nämä ovat vain pieniä yksipuolisia rengashuokosia. Männyllä ydinsäteiden pinta-ala on noin kaksinkertainen kuuseen verrattuna. Lisäksi männyn ydinsäteissä on enemmän ydinsädetrakeideja. (Nuutinen 1976, 9.)

Kuusella rengashuokokset sulkeutuvat tiiviimmin kuin männyllä, mikä vaikeuttaa nesteiden läpäisyä. Puun kuivuessa kevätpuun rengashuokosista sulkeutuvat lähes kaikki, mutta kesäpuun rengashuokosista osa jää avoimeksi. Kuusen rengashuokosista sulkeutuu suurempi osa kuin männyllä eli n. 75 – 80 %. Männyn rengashuokosista sulkeutuu n. 50 %. (Nuutinen 1976, 12.) Männyllä neste voi tunkeutua säteen suunnassa, mutta kuusella tätä ei tapahdu (Nuutinen 1976, 15).

4.2.4 Kevät- ja kesäpuun erot kyllästyvydessä

Kesäpuun kyllästyvyys on kevätpuuta parempi. Puun kuivuessa alle puunsyiden kylästymispisteen lähes kaikki kevätpuun rengashuokokset sulkeutuvat, mutta kesäpuun rengashuokosista osa jää avoimeksi. Kesäpuun rengashuokokset ovat kevätpuun vastaavia pienempiä ja niissä on jäykempi huokoskalvo, joten ne sulkeutuvat epätäydellisemmin. Tämän takia nesteet pääsevät liikkumaan kesäpuussa paremmin. (Nuutinen 1976, 14.)

4.2.5 Sydän- ja pintapuun erot kyllästyvydessä

Havupuiden sydänpuu on pintapuuta vaikeammin kyllästettävissä, koska sydänpuun huokokset sulkeutuvat jo puun eläessä ja tukkeutuvat lähes kokonaan ligniinistä ja hartsiaineista. Kuusella sydänpuu ei ole helposti nähtävissä, mutta kuusellakin sydänpuu kyllästyy pintapuuta heikommin ja varsinkin kuusen ydinvyöhyke on heikosti nesteitä läpäisevää. Erään tutkimuksen mukaan männyn pintapuussa säteen suuntainen veden-

virtaus oli 1 000 kertaa suurempaa kuin sydänpuussa. Läpäisevyys on suurinta pinta-puun uloimmassa osassa. (Nuutinen 1976, 15.)

5 LÄMPÖKÄSITTELY

5.1 Yleistä

Puun lämpökäsittelyllä tavoitellaan sään- ja kosteudenkeston parantumista. Lämpökäsittely yli 150 °C:n lämpötilassa muuttaa puun kemiallista rakennetta, jolloin useimmat puun ominaisuudet muuttuvat. Muutokset korostuvat yli 200 °C:n lämpökäsittelyssä. Positiivisia muutoksia ovat kosteuselämisen ja veden imeytymisen vähentyminen, tasapainokosteuden aleneminen ja biologisen kestävyuden parantuminen. Lisäksi puusta haihtuu uuteaineita ja sen väri tummuu. Haittapuolena on lujuusominaisuuksien heikkeneminen ja puun haurastuminen. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 9.) Työstettäessä lämpökäsiteltyä puuta saattaa tapahtua murtumista. Lisäksi lämpökäsittely saattaa vaikeuttaa liimojen ja maalien imeytymistä puuhun. Muutoksiin vaikuttavat käsittelyaika ja lämpötila. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 23.)

Puussa tapahtuu seuraavia muutoksia eri lämpötiloissa:

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

(Jämsä, Viitaniemi 1996, 9.)

5.2 Lämpökäsittelyn vaikutukset puun kemiallisiin ominaisuuksiin

Puuaines koostuu pääosin selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Näistä hemiselluloosa hajoaa nopeammin ja matalammassa lämpötilassa kuin selluloosa ja ligniini, kun taas ligniini kestää lämpöä kaikista parhaiten. Puun ominaisuudet muuttuvat pääasiassa hemiselluloosien hajoamisen vuoksi. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 9.)

Puuta kuumennettaessa hemiselluloosien hajoaminen alkaa ensimmäisenä. Hemiselluloosan asetyyliryhmät reagoivat korkeissa lämpötiloissa, jolloin syntyy etikkahappoa. Hapon muodostuminen lisääntyy korkeassa lämpötilassa ja kosteudessa. Etikkahappo puolestaan pilkkoo selluloosaa pienemmiksi ketjuiksi, mikä vaikuttaa puun lujuusominaisuuksien heikkenemiseen. Sekä hemiselluloosan että selluloosan määrä vähenee, koska ne hydrolysoituvat pienimolekyylisiksi sokereiksi, kuten glukoosiksi ja ksyloosiksi. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 10.) Ligniini kestää parhaiten lämpökäsittelyä, mutta siinäkin ensimmäiset muutokset tapahtuvat jo 150 °C:ssa (Jämsä, Viitaniemi 1996, 15). Puuta kuumennettaessa pyrolyysi alkaa n. 270 – 280 °C:n lämpötilassa, jolloin puusta tislautuu etikkahappoa, metanolia, tervaa ja kaasumaisia tuotteita. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 25.)

5.3 Lämpökäsittelyn vaikutukset puun fysikaalisiin ominaisuuksiin

Lämpökäsittely aiheuttaa puuhun sisäisiä halkeamia. Korkeassa lämpötilassa puusta haihtuu erilaisia hajoantumuotteita, mikä johtaa suurempaan tilavuuskutistumiseen. Haihtuminen on kuitenkin erisuuruista soluseinämän eri kerroksissa, mikä johtaa halkeamien syntyyn. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 16.)

Puun massa pienenee lämpökäsittelyssä, koska uuteaineet haihtuvat ja hemiselluloosa, selluloosa sekä ligniini muuttuvat kemiallisesti. Puun hajoamisen voimakkuutta kuvataankin juuri painohäviön avulla. Painohäviöön vaikuttavat käsittelylämpötila ja -aika, koekappaleiden koko sekä ympäröivät olosuhteet. Painohäviötä voidaan kuitenkin pienentää huomattavasti tekemällä lämpökäsittely ilman sijasta työssä tai vakuumis- sa. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 17.)

Puun hajoamisnopeuteen vaikuttavat käsittelylämpötila, käsittelyaika, koekappaleen koko ja kosteus sekä ympäröivän ilman kosteus. Kosteassa ilmassa hajoaminen tapahtuu huomattavasti nopeammin kuin kuivassa ilmassa, ja 150 °C:n lämpötilaan asti muutokset tapahtuvat hitaasti. Myös puulaji vaikuttaa hajoamisnopeuteen. Esimerkiksi lehtipuissa on havupuita enemmän hemiselluloosaa, mutta vähemmän ligniiniä, joten ne hajoavat voimakkaammin. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 9.)

Lämpökäsittely heikentää puun lujuutta. Veto- ja leikkauslujuus heikkenevät puristuslujuutta enemmän. Tähän vaikuttavat puun ainesosien määrän väheneminen eli painohäviö, puukomponenttien molekyyliketjujen katkeaminen ja selluloosan polymeroitumisasteen pieneneminen. Painohäviö on suoraan yhteydessä lujuuden heikkenemiseen. Puun lujuus saadaan kuitenkin pysymään parempana, jos lämpökäsittely tehdään inertissä kaasussa ilman happea. Normaalissa ilmanpaineessa käsittelemällä painohäviöstä tulee n. 4,2 kertaa suurempi, kuin hapettomissa olosuhteissa tehtynä. Myös käsiteltävien kappaleiden kosteus heikentää lujuutta: absoluuttisen kuivia kappaleita kuumennettaessa murtolujuudet ovat pysyneet paremmalla tasolla kuin kosteita kappaleita kuumennettaessa. Kosteus siis voimistaa kemiallisia reaktioita puussa lämpökäsittelyn aikana. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 18.)

Lämpökäsittely pienentää puun turpoamista ja vesihöyryn absorptiota. Tähän vaikuttaa etenkin hemiselluloosan hajoaminen, koska puun ainesosista hemiselluloosa imee vettä eniten ja ligniini puolestaan vähiten. Puulajit, jotka sisältävät vähän hemiselluloosaa, myös turpoavat vähemmän. Dimensiostabiilisuutta parantavat korkea käsittelylämpötila ja pitkä käsittelyaika. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 19.)

Lämpökäsittely alentaa puun tasapainokosteutta ja sorptiota. Tasapainokosteus alenee sitä enemmän, mitä korkeampi on käsittelylämpötila, mutta myös käsittelyajalla on vaikutusta. Erään tutkimuksen mukaan puun kuivaaminen 100 – 180 °C:n lämpötilassa alensi sen tasapainokosteutta 3 % ilmakeivattuun verrattuna riippumatta puulajista. (Jämsä, Viitaniemi 1996, 20.)

6 KOEJÄRJESTELYT

6.1 Laitteisto

Tutkimus toteutettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratorion välineillä. Koekappaleet kyllästettiin laboratorion omassa painekyllästysylinterissä. Kuivaus ja lämpökäsittely tapahtuivat lämpökaapissa. Kosteustasaannutusta varten laboratoriossa on erityisiä tasaannutushuoneita, joiden lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus ovat säädettävissä. Huoneen ilmankosteutta ja lämpötilaa seurataan mittareilla, ja laitteisto pitää nämä koko ajan vakiona. Tasaannutushuoneiden olosuhteissa tapahtuu kuitenkin aina muutoksia, joten olosuhteet mitattiin ja tallennettiin Vaisalan mittalaitteella. Tutkimuksessa käytettiin kolmea tasaannutushuonetta, joissa suhteellinen ilmankosteus oli RH 20 %, RH 65 % ja RH 90 %. Kappaleiden painot mitattiin vaakalla, jonka tarkkuus oli 0,01 grammaa. Dimensiot mitattiin digitaalisella työntömitalla, jonka tarkkuus oli 0,01 mm.

6.2 Koekappaleiden valmistus

Koekappaleet valmistettiin männyn pintalaudasta. Sydänpuuta sisältävät laudat karsittiin pois, koska sydänpuu ei kyllästy kunnolla. Koekappaleiden koko oli 25 x 15 x 50 mm. Koekappaleita oli yhteensä 80, ja ne jaettiin neljään 20 kappaleen ryhmään. Ensimmäinen ryhmä kyllästettiin vesilasilla ja kuivattiin absoluuttisen kuivaksi 70 °C asteessa normaalin sahatavaran tapaan. Toinen ryhmä kyllästettiin vesilasilla ja lämpökäsiteltiin 160 °C asteessa. Kolmas ryhmä oli kyllästämätön, ja se kuivattiin absoluuttisen kuivaksi 70 °C asteessa. Neljäs ryhmä oli kyllästämätön, ja se lämpökäsiteltiin 160 °C asteessa.

Ryhmä 1. Vesilasikyllästys + kuivaus 70 °C asteessa.

Ryhmä 2. Vesilasikyllästys + lämpökäsittely 160 °C asteessa.

Ryhmä 3. Ei kyllästystä, kuivaus 70 °C asteessa.

Ryhmä 4. Ei kyllästystä, lämpökäsittely 160 °C asteessa.

Koekappaleet numeroitiin, jotta ne eivät sekoittuisi tutkimuksen aikana. Koekappaleita tehtiin 20:stä eri laudasta ja jokaisesta laudasta otettiin neljä koekappaleita. Näistä neljästä kappaleesta valittiin yksi kuhunkin neljään ryhmään. Jokaisessa ryhmässä oli siis koekappaleita 20:stä eri laudasta.

6.3 Kyllästys

Kyllästys tapahtui 12 tunnin Bethell-paineekyllästysprosessilla. Ennen kyllästystä kappaleita pidettiin kosteassa RH 90 % -tasaannutushuoneessa, kunnes ne olivat kauttaaltaan sinistyneet. Aikaisempien kokemusten mukaan vesilasikyllästys onnistuu parhaiten puun ollessa sinistynyttä. Vertailukappaleilla tätä ei tarvinnut tehdä, joten niitä pidettiin kuivemmassa RH 65 % -huoneessa. Kyllästeenä käytetyn vesilasiliuoksen väkevyys oli 12 %, ja arvioitu vesilasin kuiva-ainepitoisuus männyn pintapuussa on 60 kg/m³.

Kappaleille valmistettiin kahdesta laudanpätkästä teline, jotta ne pysyisivät paikoillaan kyllästyksen ajan. Tämä oli tärkeää, koska kynällä merkitty koodi saattaisi liueta pois kyllästyksen aikana ja kappaleet sekoittuisivat. Kappaleet aseteltiin telineeseen tietyssä järjestyksessä, jolloin koodin mahdollinen liukeneminen ei haitannut. Välittömästi kyllästyksen jälkeen kappaleista mitattiin dimensiot ja massat märkänä.

6.4 Kuivaus ja lämpökäsittely

Kuivaus ja lämpökäsittely toteutettiin käyttäen kahta lämpökaappia. Lämpöä nostettiin vähän kerrallaan kohti tavoitelämpötilaa, jotta välttyttäisiin halkeamisilta ja palamiselta. Käsittelyn jälkeen kappaleiden dimensiot ja massat mitattiin välittömästi. Vertaamalla kyllästyksen ja kuivauksen jälkeistä massaa testin alussa mitattuun absoluuttisen kuivaan massaun saadaan selville vesilasin määrä puussa.

Lämpökäsittelyn aikana lämpökaapin ja koekappaleiden lämpötilaa seurattiin reaaliaikaisesti. Lämpökaapin sisällä oli lämpötila-anturit, jotka oli yhdistetty piirturiin. Piirturin näytöltä voitiin seurata lämpötilaa, ja lisäksi piirturi piirsi paperille kuvaajan lämpötiloista ja kellonajoista. Lämpökäsittelyprosessi oli syytä dokumentoida tällä tavoin, jotta myöhemmin voitaisiin suorittaa käsittely juuri samalla tavalla. Puun sisä-

lämpötila luonnollisesti nousee viiveellä verrattuna kaapin sisälämpötilaan. Tämän takia valmistimme koekappaleen kokoisen puupalikan, johon porattuun reikään asennettiin myös lämpötila-anturi. Nostimme lämpötilaa korkeammaksi aina siinä vaiheessa, kun puun sisälämpötila oli saavuttanut tavoitelämpötilan.

Lämpökäsittely 160 °C:ssa toteutettiin seuraavalla tavalla:

1. Kappaleet huoneenlämpöiseen kaappiin ja lämpötilan nosto 70 °C asteeseen. Piirturit käyntiin.
2. Pitoaika 70 °C asteessa n. 6 h.
3. Lämpötilan nosto 100 °C asteeseen. Pitoaika 100 °C asteessa n. 17 h.
4. Lämpötilan nosto 130 °C asteeseen (kesto 1 h 40 min).
5. Lämpötilan nosto 160 °C asteeseen (kesto 1 h 20 min).
6. Pitoaika 160 °C asteessa 3 h.
7. Jäähdytys 100 °C asteeseen.
8. Mittaukset.

Kuivaus 70 °C asteessa tapahtui samaan aikaan toisessa lämpökaapissa. Sen lämpötila oli koko ajan 70 °C asteessa, ja kuivaus kesti yhtä pitkään kuin lämpökäsittely.

6.5 Mittaukset

Kappaleista mitattiin dimensiot ja massat absoluuttisen kuivana ennen kyllästystä, kosteustasaannutuksen jälkeen ennen kyllästystä, kyllästyksen jälkeen märkänä, kuivaus-lämpökäsittelyn jälkeen absoluuttisen kuivana ja jokaisen tasaannutusvaiheen päätyttyä.

Kun kappaleet oli kyllästyksen jälkeen kuivattu ja lämpökäsitelty sekä mitattu, alkoi kappaleiden kosteustasaannutus. Tasaannutukset suoritettiin seuraavassa järjestyksessä: RH 20 %, RH 65 %, RH 90 %, RH 65 %, RH 20 %, RH 65 %, RH 90 %, RH 65 %, RH 20 %, RH 65 %, RH 90 %, RH 65 % ja RH 20 %.

Kappaleet aseteltiin väljästi tasaannutushuoneen hyllyille. Jokaisesta ryhmästä valittiin viisi kappaletta, joiden massoja seurattiin. Kun massan muutos oli alle 0,1 % / 24 h, kappaleet olivat tasaantuneet. Tässä vaiheessa jokaisen kappaleen dimensiot ja massat mitattiin ja tallennettiin. Massat mitattiin tasapainokosteuden ja dimensiot ASE-arvon määrittämistä varten.

Jokaisen tasaannutusjakson aikana huoneen olosuhteet, eli lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus, mitattiin Vaisalan valmistamalla mittalaitteella. Tasaannutushuoneen olosuhteissa kuitenkin aina esiintyy pientä vaihtelua. Mikäli esim. kappaleiden kosteudessa havaitaan jotain poikkeavaa, se voi johtua huoneen olosuhteiden muutoksesta.

7 TUTKIMUSTULOKSET

Tuloksista tärkeimpiä ovat tasapainokosteuden ja tilavuuden muutokset eri ryhmien välillä. Paksuuden, leveyden ja pituuden tulokset eivät ole yksinään niin tärkeitä, koska tilavuudet on laskettu näistä. Kun kappaleet olivat tasaantuneet, niistä mitattiin paksuus, leveys, pituus ja massa, joista saatiin laskemalla tiheys, tilavuus ja kosteus. Näin meneteltiin jokaisen tasaannutusjakson päätyttyä. Yksittäisten kappaleiden tiedot kerättiin taulukkoon ja niistä laskettiin ryhmäkohtaiset keskiarvot ja keskihajonnat. Neljäs ryhmä eli kyllästämättömät, 160 °C asteessa lämpökäsitellyt kappaleet otettiin testiin mukaan n. kaksi kuukautta myöhemmin kuin muut ryhmät. Niiden tasaannutuksia ei sen vuoksi ehditty viedä aivan loppuun asti, joten tästä ryhmästä on olemassa vähemmän mittaustuloksia.

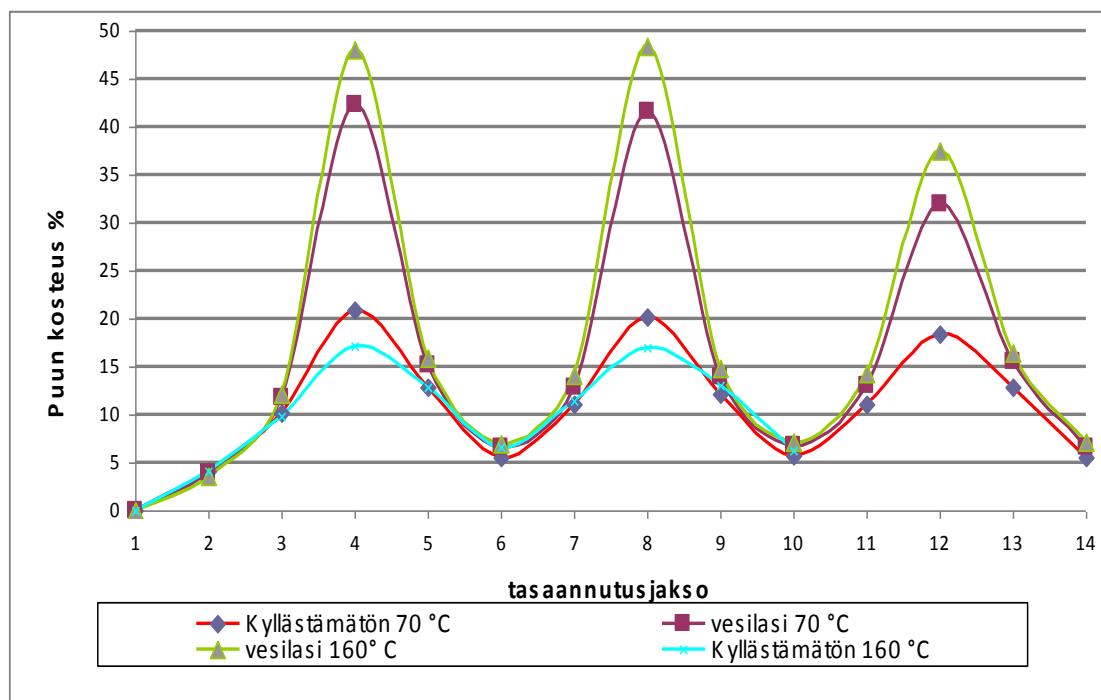
7.1 Tasapainokosteus

Taulukossa 1 on jokaisen ryhmän kosteuden keskiarvo ja keskihajonta mitattuna tasaannutusjakson lopussa. Taulukon vasemmassa reunassa näkyvät myös todelliset RH-lukemat ja lämpötilat, jotka mitattiin Vaisalan mittarilla. Tasaannutushuoneiden olosuhteissa tapahtui pientä vaihtelua eri tasaannutusjaksojen välillä, mikä on vaikuttanut myös kappaleiden tasapainokosteuksiin.

Taulukko 1. Ryhmien kosteuden keskiarvot ja keskihajonnat tasaannutusjaksoittain

Tasaannutusjakso	Todellinen		Kosteus % tasaannutusjakson lopussa.							
	RH	T °C	Vesil. 70°C		Kyllästämätön 70°C		Vesil. 160°C		Kyllästämätön 160°C	
			ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
RH20%	22,7	23	4,0	0,1	4,0	0,1	3,6	0,1	4,0	0,1
RH65%	67,2	19	11,8	0,3	10,3	0,2	12,1	0,3	9,9	0,2
RH90%	93,1	26	42,3	3,5	20,9	0,7	48,1	3,7	17,1	0,2
RH65%	64,6	21	15,2	0,3	12,9	0,2	15,9	0,4	12,9	0,2
RH20%	24,5	22	6,6	0,2	5,6	0,1	7,1	0,2	6,5	0,1
RH65%	61,8	20	12,9	0,4	11,0	0,2	14,1	0,5	11,5	0,1
RH90%	91,6	26	41,7	4,3	20,2	0,6	48,4	4,3	16,9	0,3
RH65%	63,0	21	13,9	0,3	12,1	0,2	14,8	0,4	13,0	0,2
RH20%	24,6	22	6,7	0,2	5,7	0,1	7,2	0,2	6,3	0,1
RH65%	62,6	21	13,0	0,4	11,0	0,2	14,3	0,5		
RH90%	87,4	24	32,0	2,4	18,5	0,5	37,4	2,6		
RH65%	64,4	21	15,5	0,4	12,8	0,2	16,5	0,5		
RH20%	22,5	22	6,6	0,2	5,6	0,2	7,2	0,3		

Kuvasta 1 näemme puun tasapainokosteuden muutokset siirryttäessä tasaannutusjaksosta toiseen. Kuvaaja alkaa kuivaus-lämpökäsittelyn jälkeisestä tilasta, jolloin kappaleet olivat absoluuttisen kuivia, ja sen jälkeen tulevat RH 20 %, RH 65 %, RH 90 %, RH 65 %, RH 20 %, RH 65 %, RH 90 %, RH 65 %, RH 20 %, RH 65 %, RH 90 %, RH 65 % ja RH 20 %.



Kuva 1. Ryhmien tasapainokosteuden muutokset tasaannutusjaksoittain

Kuvaajasta on huomattava, että viimeisen RH 90 % -jakson kohdalla tasapainokosteudet ovat laskeneet selvästi. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että puun hygroskooppisuudessa olisi tapahtunut muutosta. Tämä johtuu yksinkertaisesti siitä, että viimeisessä RH 90 % -jaksossa tasaannutushuoneen todellinen RH ja lämpötila (ks. taulukko 1) olivat laskeneet, joten myös tasapainokosteus oli laskenut.

Kuvaaja voidaan ajatella kolmena syklinä, joissa tasapainokosteus nousee ensin RH 90 % -jaksoon asti ja sen jälkeen laskee RH 20 % -jaksoon ja niin edelleen. Eri ryhmien tasapainokosteudet pysyivät samalla tasolla kuivissa RH 20 % ja RH 65 % -olosuhteissa, mutta kun kappaleet vietiin kosteaan RH 90 % -huoneeseen, alkoi vesilasikyllästettyjen koekappaleiden kosteus nousta paljon enemmän kuin kyllästämättömien. Lisäksi vesilasikyllästettyjen kappaleiden tasaantuminen RH 90 % -huoneessa kesti paljon pidempään kuin kyllästämättömien. Kyllästämättömät kappaleet tasaantuivat noin viikossa, mutta vesilasikappaleiden tasaantuminen kesti noin 2 viikkoa. Vesilasikyllästettyjen ryhmien kosteudet jäivät pysyvästi korkeammalle tasolle. Lisäksi siirryttäessä kosteasta jaksosta kuivempaan puun tasapainokosteudet pysyivät korkeampina kuin päinvastaisessa tapauksessa. Tämä on nähtävissä taulukosta 1.

KOSTEUSEROT RYHMIEN VÄLILLÄ

VESILASI 160 °C

RH 90 % -jaksojen aikana kosteus nousi eniten 160 °C:ssa lämpökäsitellyillä vesilasikappaleilla. Niiden kosteus nousi keskimäärin 44,6 prosenttiin (keskihajonta 6,2 %). RH 20 % -jaksoissa kosteus laski keskimäärin 7,1 prosenttiin (keskihajonta 0,2 %), kun ensimmäinen RH 20 % -jakso jätetään laskematta.

Ensimmäinen RH 20 % -jakso jätetään laskematta, koska siinä kappaleet ovat adsorptiossa, kun taas muissa RH 20 % -jaksoissa ne ovat desorptiossa. Tällä on vaikutusta tuloksiin, koska desorptiossa kosteudet pysyvät adsorptiota korkeampina.

VESILASI 70 °C

Toiseksi eniten RH 90 % -jaksoissa kosteus nousi 70 °C:ssa kuivatuilla vesilasikappaleilla. Niiden kosteus nousi keskimäärin 38,7 prosenttiin (keskihajonta 5,9 %). RH 20 % -jaksoissa kosteus laski keskimäärin 6,6 prosenttiin (keskihajonta 0,2 %), kun ensimmäinen RH 20 % -jakso jätetään laskematta.

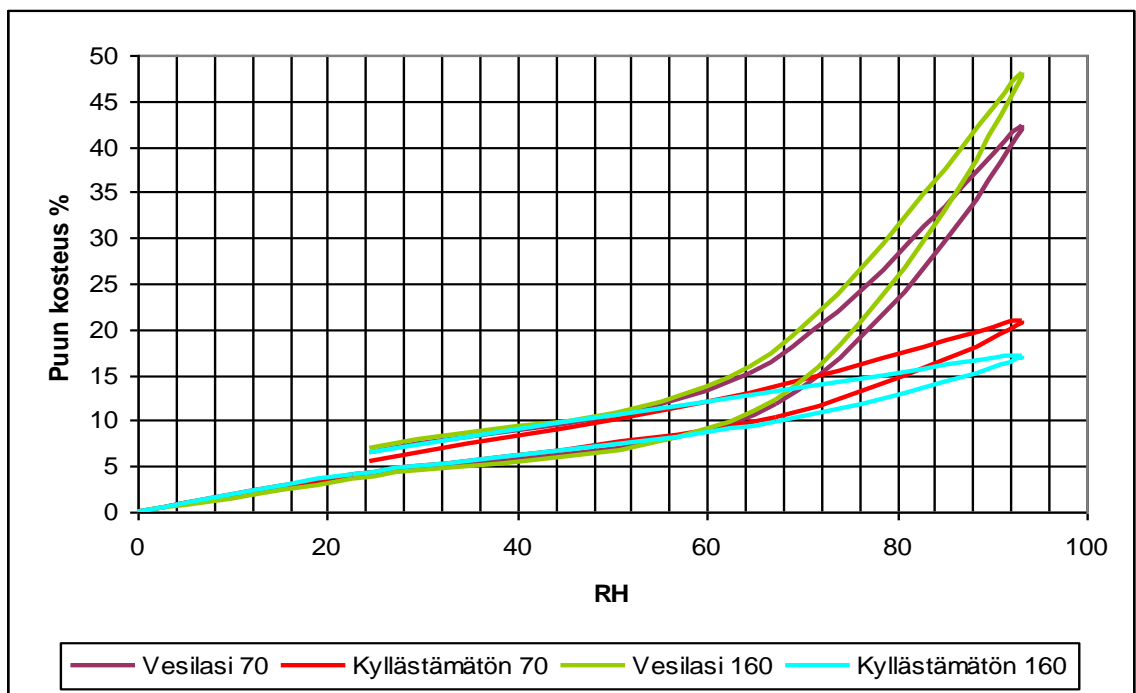
KYLLÄSTÄMÄTÖN 70 °C

Kyllästämättömillä 70 °C:ssa kuivatuilla kappaleilla kosteus nousi RH 90 % -jaksoissa keskimäärin 19,8 prosenttiin (keskihajonta 1,2 %). RH 20 % -jaksoissa kosteus laski keskimäärin 5,6 prosenttiin (keskihajonta 0,1 %), kun ensimmäinen RH 20 % -jakso jätetään laskematta.

KYLLÄSTÄMÄTÖN 160 °C

Vähiten kosteus nousi RH 90 % -jaksoissa kyllästämättömillä, 160 °C:ssa lämpökäsitellyillä kappaleilla. Kosteus nousi keskimäärin 17,0 prosenttiin (keskihajonta 0,3 %). RH 20 % -jaksoissa kosteus laski keskimäärin 6,4 prosenttiin (keskihajonta 0,2 %), kun ensimmäinen RH 20 % -jakso jätetään laskematta.

Kuvassa 2 on esitetty koeryhmien sorptioiden kuvaajat ensimmäisen syklin aikana. Kuvassa puun tasapainokosteus nousee absoluuttisen kuivasta aina RH 90 % -tasaannutusjaksoon asti, minkä jälkeen kosteus laskee taas RH 20 % -tasaannutusjaksoon palattaessa.



Kuva 2. Koeryhmien sorptiot ensimmäisen syklin aikana RH 0 % - RH 90 % - RH 20%

Kuvasta näkyy selvästi, että desorptiossa (kosteuden laskiessa) puun tasapainokosteudet pysyvät korkeammalla tasolla kuin adsorptiossa. Kuvasta näkyy myös, että kaikkien koeryhmien tasapainokosteudet nousevat lähes lineaarisesti aina RH 65 % -jaksoon asti, minkä jälkeen vesilasikyllästettyjen kappaleiden tasapainokosteudet alkoivat nousta jyrkemmin.

7.2 Tilavuuden muutokset

Koeryhmien keskimääräiset kuivatiheydet absoluuttisen kuivina ennen kyllästystä olivat hyvin lähellä toisiaan, joten tiheyden vaikutus tilavuuden muutoksiin oli vähäinen. Taulukossa 2 on esitetty ryhmien keskimääräiset tiheydet ja niiden keskihajonnat absoluuttisen kuivana, ennen käsittelyä. Lisäksi taulukossa on vesilasijäämä, joka on puuhun kyllästyksessä jääneen vesilasin massa. Vesilasijäämä lasketaan vähentämällä kyllästyksen jälkeisestä absoluuttisen kuivasta massasta ennen kyllästystä mitattu absoluuttisen kuiva massa. Taulukossa 3 on esitetty jokaisen ryhmän tilavuuden keskiarvot ja keskihajonnat tasaannutusjaksoittain.

Taulukko 2. Vesilasijäämä ja ryhmien kuivatiheydet ennen käsittelyä

	Vesilasi 70 °C		Kyllästämätön 70 °C		Vesilasi 160 °C		Kyllästämätön 160 °C	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
Tiheys kg/m ³	552	43	553	45	556	46	551	45
Vesilasijäämä kg/m ³	100	7			85	8		

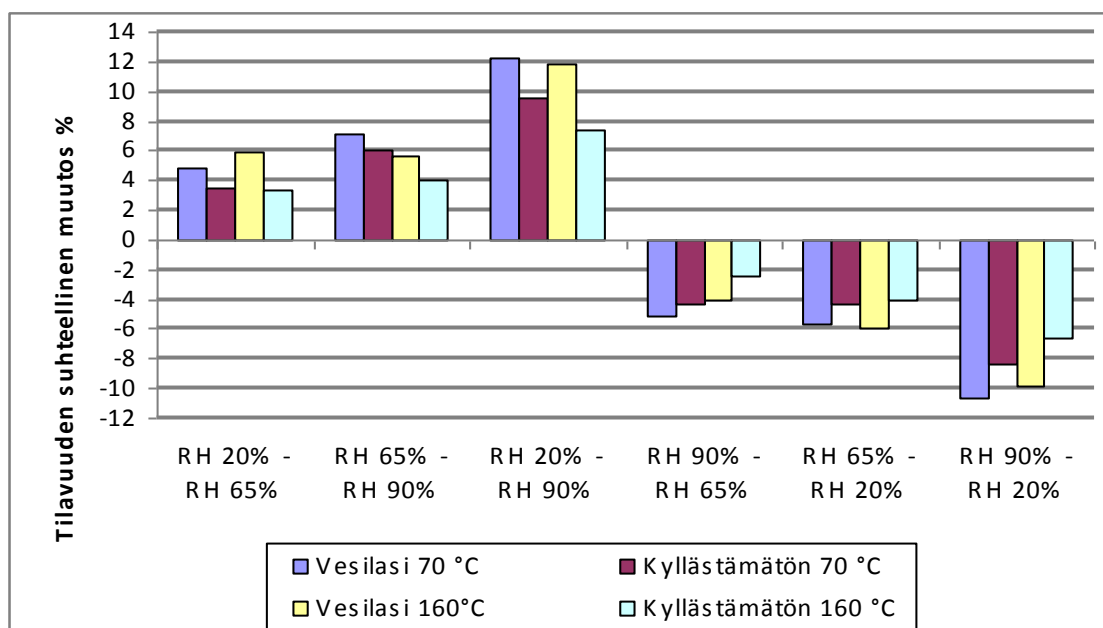
Taulukko 3. Ryhmien tilavuuksien keskiarvot ja keskihajonnat tasaannutusjaksoittain

Tasaannutusjakso	Tilavuus mm ³ tasaannutusjakson lopussa							
	Vesilasi 70°C		Kyllästämätön 70°C		Vesilasi 160°C		Kyllästämätön 160°C	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
Kuiva	18 384	148	18 016	142	18 087	158	17 808	99
RH20%	18 720	128	18 287	90	18 374	128	18 144	90
RH65%	19 613	115	18 992	78	19 506	145	18 788	74
RH90%	21 199	267	20 416	207	20 887	297	19 646	119
RH65%	20 083	135	19 389	98	20 045	136	19 179	95
RH20%	18 834	99	18 531	95	18 722	141	18 429	82
RH65%	19 816	136	19 126	112	19 855	179	18 973	74
RH90%	21 174	260	20 205	203	20 830	266	19 619	114
RH65%	19 990	122	19 303	106	19 868	125	19 150	98
RH20%	19 010	115	18 548	97	18 815	109	18 345	72
RH65%	19 903	112	19 164	113	19 827	117		
RH90%	21 156	249	20 082	188	20 804	262		
RH65%	20 212	149	19 411	121	20 044	122		
RH20%	18 976	126	18 553	95	18 809	120		

Taulukossa 4 on laskettuna suhteelliset tilavuuden muutokset ja niiden keskihajonnat tasaannutusväleittäin. Kuvassa 3 on esitetty sama asia graafisesti.

Taulukko 4. Tilavuuden suhteelliset muutokset eri tasaannutusjaksojen välillä

Alkutilavuus	Vesilasi 70 °C		Kyllästämätön 70 °C		Vesilasi 160 °C		Kyllästämätön 160 °C	
	18 720 mm ³		18 287 mm ³		18 374 mm ³		18 144 mm ³	
Tasaannutus väli	Tilavuuden muutos %		Tilavuuden muutos %		Tilavuuden muutos %		Tilavuuden muutos %	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
RH20% - 65%	4,9	0,6	3,5	0,4	5,9	0,7	3,2	0,4
RH65% - 90%	7,1	1,5	6,0	1,4	5,6	1,7	4,0	0,7
RH20% - 90%	12,3	1,7	9,6	1,8	11,8	2,2	7,4	1,1
RH90% - 65%	-5,1	1,2	-4,3	0,9	-4,1	1,3	-2,4	0,3
RH65% - 20%	-5,7	0,8	-4,2	0,5	-6,0	0,8	-4,1	0,4
RH90% - 20%	-10,5	1,3	-8,3	1,1	-9,9	1,5	-6,3	0,5



Kuva 3. Tilavuuden suhteelliset muutokset eri tasaannutusjaksojen välillä

TILAVUUDEN MUUTOKSET ERI RYHMISSÄ

VESILASI 70 °C

Kun lasketaan eri syklien turpoamisen keskiarvot välillä RH 20 % - RH 90 %, eniten tilavuus kasvoi 70 °C:ssa kuivatuilla vesilasikappaleilla, keskimäärin 12,3 % (keskihajonta 1,7 %). Kutistuminen välillä RH 90 % - RH 20 % oli keskimäärin 10,5 % (keskihajonta 1,3 %).

VESILASI 160 °C

Toiseksi eniten tilavuus kasvoi RH 20 % - RH 90 % välillä 160 °C:ssa lämpökäsitellyillä vesilasikappaleilla, keskimäärin 11,8 % (keskihajonta 2,2 %). Kutistuminen välillä RH 90 % - RH 20 % oli keskimäärin 9,9 % (keskihajonta 1,5 %).

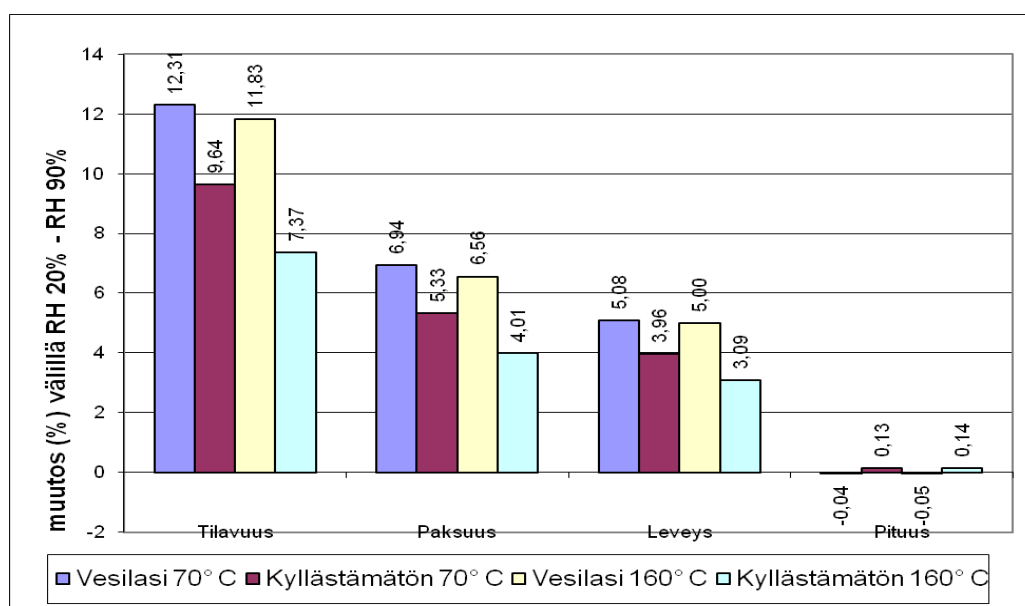
KYLLÄSTÄMÄTÖN 70 °C

Kolmanneksi eniten tilavuus kasvoi RH 20 % - RH 90 % välillä 70 °C:ssa kuivatuilla kyllästämättömillä kappaleilla, keskimäärin 9,6 % (keskihajonta 1,8 %). Kutistuminen välillä RH 90 % - RH 20 % oli keskimäärin 8,3 % (keskihajonta 1,1 %).

KYLLÄSTÄMÄTÖN 160 °C

Vähiten tilavuus kasvoi RH 20 % - RH 90 % välillä 160 °C:ssa lämpökäsitellyillä kylästämättömillä kappaleilla, keskimäärin 7,4 % (keskihajonta 1,1 %). Kutistuminen välillä RH 90 % - RH 20 % oli keskimäärin 6,3 % (keskihajonta 0,5 %).

Eniten tilavuus näyttäisi siis muuttuvan 70 °C:ssa kuivatuilla vesilasikappaleilla ja vähiten 160 °C:ssa lämpökäsitellyillä kyllästämättömillä kappaleilla. Kuvassa 4 on esitetty yhteenvetona tilavuuden ja dimensioiden suhteellinen turpoaminen välillä RH 20 % - RH 90 %.



Kuva 4. Yhteenveto mittojen muuttumisesta välillä RH 20 % - RH 90 %

7.3 Säteen ja tangentin suuntainen eläminen

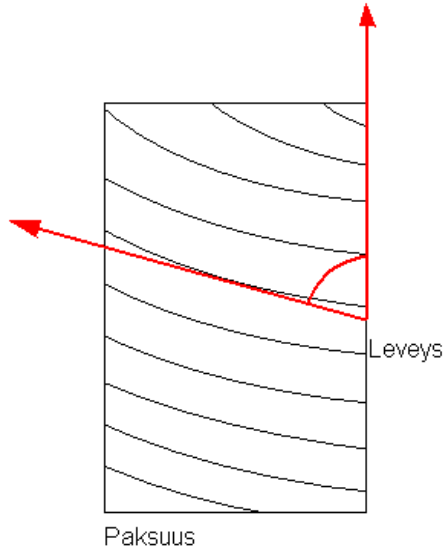
Mittamuutoksista on huomattava, että koekappaleiden paksuuden ja leveyden suuntainen muutos ei ole sama asia kuin vuosilustojen säteen- ja tangentin suuntainen muutos. Koekappaleiden vuosilustot eivät kulje poikkileikkauksen paksuuden ja leveyden suuntaisesti, vaan hieman vinossa paksuuteen ja leveyteen nähden. Kuvasta 5 selviää, miten vuosilustot todellisuudessa suhtautuvat koekappaleen paksuuteen ja leveyteen.



Kuva 5. Vuosilustojen suunta suhteessa koekappaleiden paksuuteen ja leveyteen

Säteen ja tangentin suuntainen kutistuma/turpoama saadaan laskettua, jos tiedetään koekappaleen syykulma sekä pituuden, leveyden ja tilavuuden kutistumaturpoamaprosentti. Sen takia jokaisesta koekappaleesta mitattiin syykulma suhteessa poikkileikkauksen leveyden suuntaiseen sivuun. Kunkin ryhmän syykulmien keskiarvot olivat $57 - 58^\circ$, joten kappaleen paksuus oli lähempänä tangentin suuntaa ja leveys lähempänä säteen suuntaa. Sen takia kappaleiden paksuuden suuntainen eläminen olikin suurempaa kuin leveyden suuntainen (ks. kuva 4).

Syykulmat mitattiin asettamalla tavallinen astelevy koekappaleen vuosiluston tangentin suuntaisesti. Syykulma on tangentin ja leveyden suuntaisen sivun välinen kulma. Kuvassa 6 näkyy syykulmien mittauksen periaate, ja taulukossa 5 on laskettuna kaikkien koekappaleiden syykulmat ja ryhmäkohtaiset keskiarvot.



Kuva 6. Syykulman mittaus koekappaleen poikkileikkauksesta

Taulukko 5. Koekappaleiden syykulmat

Syykulma (°)				
Kpl nro	Vesilasi 70° C	Kyllästämätön 70° C	Vesilasi 160° C	Kyllästämätön 160° C
1	57	55	57	55
2	53	48	47	50
3	45	41	40	45
4	61	56	57	61
5	66	69	71	66
6	68	69	70	70
7	53	57	55	58
8	52	50	51	53
9	75	71	71	72
10	70	65	66	65
11	61	61	63	63
12	64	65	65	65
13	68	66	67	67
14	49	46	44	49
15	19	20	19	23
16	69	68	66	70
17	62	61	64	65
18	57	57	59	55
19	53	48	48	49
20	58	57	54	57
ka.	58	57	57	58

Säteen ja tangentin suuntaiset kutistuma-turpoamaprosentit on laskettu ratkaisemalla seuraavanlainen yhtälöpari:

$$\begin{cases} b_a \approx b_t \cos^2 \alpha + b_r \sin^2 \alpha \\ b_l + b_r + b_t \approx b_v \end{cases},$$

missä b_a = leveyden kutistumaprocentti.

b_t = tangentin suuntainen kutistumaprocentti.

b_r = säteen suuntainen kutistumaprocentti.

α = syykulma (°).

b_l = pituuden suuntainen kutistumaprocentti.

b_v = tilavuuden kutistumaprocentti. (2)

Taulukossa 6 on laskettuna ryhmien säteen ja tangentin suuntaiset kutistuma- ja turpoamaprocentit. Laskennassa on käytetty ryhmien keskimääräisiä arvoja, joten tulokset ovat vain suuntaa antavia. Vertailun vuoksi taulukossa on myös paksuuden ja leveyden suuntaiset kutistuma- ja turpoamaprocentit.

Taulukko 6. Koekappaleiden eläminen eri suunnissa

Tangentin ja säteen suuntainen eläminen. (T = tangenti, R = säde)								
Tasaannutusväli	Vesilasi 70 °C		Kyllästämätön 70 °C		Vesilasi 160 °C		Kyllästämätön 160 °C	
	T	R	T	R	T	R	T	R
RH20%-RH90%	8,7 %	3,7 %	6,8 %	2,7 %	8,3 %	3,6 %	4,8 %	2,4 %
RH90%-RH20%	6,4 %	4,1 %	5,7 %	2,8 %	5,7 %	4,1 %	4,6 %	2,1 %
Paksuuden ja leveyden suuntainen eläminen. (P = paksuus, L = leveys)								
Tasaannutusväli	Vesilasi 70 °C		Kyllästämätön 70 °C		Vesilasi 160 °C		Kyllästämätön 160 °C	
	P	L	P	L	P	L	P	L
RH20%-RH90%	6,9 %	5,1 %	5,3 %	4,0 %	6,6 %	5,0 %	4,0 %	3,1 %
RH90%-RH20%	6,1 %	4,8 %	4,8 %	3,7 %	5,6 %	4,6 %	3,5 %	2,8 %

7.4 ASE-arvot

Vesilasikyllästetyille ryhmille laskettiin ASE-arvot. ASE tarkoittaa käsittelystä johtuvaa veden imeytymisen tai turpoamisen pienentymistä (%). ASE-arvon maksimi on 100 %, eli jos ASE on positiivinen, on kappaleiden eläminen vähentynyt käsittelemättömiin verrattuna.

ASE lasketaan kaavalla:

$$ASE = \frac{100(A - B)}{A},$$

missä A = käsittelemättömän puun kosteus tai turpoama, B = käsitellyn puun kosteus tai turpoama. (3)

Taulukossa 7 on laskettuna vesilasikyllästettyjen ryhmien ASE-arvoja eri tasaannutusjaksojen välillä. Kaikki ASE-arvot ovat negatiivisia, mikä tarkoittaa, että vesilasikyllästetyillä ryhmillä kosteuseläminen on ollut suurempaa kuin kyllästämättömillä vertailuryhmillä.

Taulukko 7. Vesilasikyllästetyn puun ASE-arvot

Tasaannutusväli	Tilavuuden muutos mm ³				ASE (%)	
	Vesilasi 70 °C	Kyllästämätön 70 °C	Vesilasi 160 °C	Kyllästämätön 160 °C	Vesilasi 70 °C	Vesilasi 160 °C
RH 0% - RH 90%	2 815	2 400	2 800	1 838	-17,3	-52,3
RH 90% - RH 20%	-2 365	-1 885	-2 165	-1 217	-25,5	-77,9
RH 20% - RH 90%	2 340	1 674	2 108	1 190	-39,8	-77,1
RH 90% - RH 20%	-2 164	-1 657	-2 015	-1 274	-30,6	-58,16
RH 20% - RH 90%	2 146	1 534	1 989		-39,9	
RH 90% - RH 20%	-2 180	-1 529	-1 995		-42,6	

8 TULOSTEN TARKASTELU

8.1 Kosteus

Kuivemmissä olosuhteissa RH 20 % ja RH 65 % -tasaannutusten aikana ryhmien välillä ei ollut kovin suuria kosteuseroja. Suurimmillaan erot olivat n. 2 - 4 prosenttiyksikön luokkaa. Sen sijaan kosteissa RH 90 % -olosuhteissa vesilasikyllästetyt kappaleet keräsivät kosteutta paljon enemmän kuin kyllästämättömät. Lisäksi vesilasikyllästettyjen kappaleiden tasaantuminen RH 90 % -jaksojen aikana kesti paljon pidempään, n. 2 viikkoa, kun kyllästämättömillä se kesti noin viikon.

Eniten kosteutta keräsi vesilasikyllästetty, 160 °C:ssa lämpökäsitelty ryhmä. Se saavutti RH 90 % -tasaannutuksissa suurimmillaan jopa 48,4 % kosteuden (keskihajonta 4,3 %). Toiseksi eniten kosteutta keräsi vesilasikyllästetty, 70 °C:ssa kuivattu ryhmä: se saavutti suurimmillaan 42,3 % kosteuden (keskihajonta 3,5 %). Kyllästämättömien ryhmien kosteudet jäivät paljon matalammalle tasolle. 70 °C:ssa kuivatut saavuttivat suurimmillaan 20,9 % kosteuden (keskihajonta 0,7 %). 160 °C:ssa lämpökäsitellyt keräsivät kosteutta kaikista vähiten, enimmillään 17,1 % (keskihajonta 0,2 %).

Verrattaessa kyllästämättömiä ryhmiä toisiinsa on selvää, että 160 °C:ssa lämpökäsitellyt keräsivät vähemmän kosteutta kuin 70 °C:ssa kuivatut. Lämpökäsittely 160 °C:ssa on selvästi pienentänyt tämän ryhmän tasapainokosteutta. Itse asiassa neljäs ryhmä otettiin testiin mukaan, koska tästä asiasta haluttiin varmistua.

Verrattaessa vesilasikyllästettyjä ryhmiä toisiinsa on erikoista, että 160 °C:ssa lämpökäsitellyt keräsivät enemmän kosteutta kuin 70 °C:ssa kuivatut. Yleensä lämpökäsittely alentaa puun tasapainokosteutta, mutta siitäkin huolimatta 160 °C:ssa lämpökäsittelyjen kosteus nousi enemmän.

Miksi sitten vesilasikyllästetty puu keräsi enemmän kosteutta kuin kyllästämätön? Siihen kysymykseen ei tämän tutkimuksen yhteydessä löytynyt selitystä. Eräs arvio kuitenkin oli, että ilmeisesti vesilasi sitoo itseensä kosteutta.

8.2 Dimensiostabiilisuus

Vesilasikyllästetyllä puulla tilavuuden muutokset välillä RH 20 % - RH 90 % olivat suurempia kuin kyllästämättömillä. Suurimmat muutokset tapahtuivat 70 °C:ssa kuivatuilla vesilasikappaleilla, joiden tilavuus kasvoi keskimäärin 12,3 % välillä RH 20 % - RH 90 %. Toiseksi suurimmat muutokset olivat 160 °C:ssa lämpökäsitellyillä vesilasikappaleilla, joiden tilavuus kasvoi keskimäärin 11,8 %.

70 °C:ssa kuivatuilla kyllästämättömillä kappaleilla tilavuus kasvoi keskimäärin 9,6 % välillä RH 20 % - RH 90 %. Pienimmät muutokset olivat 160 °C:ssa lämpökäsitellyillä kyllästämättömillä kappaleilla, joiden tilavuus kasvoi keskimäärin 7,4 %.

Nähtävästi 160 °C:n lämpökäsittely on pienentänyt tilavuuden muutoksia. Sekä vesilasikyllästetyillä, että kyllästämättömillä suurimmat tilavuuden muutokset olivat 70 °C:ssa kuivatuilla ryhmillä. Lämpökäsittely on siis parantanut dimensiostabiilisuutta, mutta vesilasikyllästyksellä ei ole ollut sellaista vaikutusta.

Myös paksuuden ja leveyden suuntaisissa muutoksissa järjestys oli sama, eli vesilasikyllästettyjen ryhmien muutokset olivat suurempia kuin kyllästämättömien ja 70 °C:ssa kuivatut turposivat enemmän kuin 160 °C:ssa lämpökäsitellyt ryhmät. Sen sijaan pituuden suunnassa kyllästämättömien ryhmien muutokset olivat hieman suurempia kuin vesilasikyllästetyillä.

Testin aikana vesilasia oli ilmeisesti liennut pois koekappaleista. Tämä huomattiin, koska koekappaleiden alustana käytettyyn vanerilevyyn oli ilmestynyt tummia jälkiä vesilasikyllästettyjen kappaleiden kohdille RH 90 % -jaksojen aikana. Kyllästämättömien kappaleiden kohdalle näitä jälkiä ei ilmestynyt (ks. liite 1).

9 TULOSTEN TILASTOLLINEN TARKASTELU

Tilastollisella tarkastelulla pyritään selvittämään, voidaanko ryhmien väliset erot yleistää vai onko tulos vain sattumaa. Tässä tapauksessa koekappaleita oli niin vähän, että normaalijakaumaan perustuvaa keskiarvotestiä ei voitu käyttää. Sen sijaan käytettiin **t-testiä**, joka on käyttökelpoinen silloin, kun otoskoko on pieni (alle 30 kpl). T-testiä käytettäessä tulee tietää otoskoko n , otoksen keskiarvo \bar{x} ja keskihajonta s . (Holopainen, Pulkkinen 2003, 165.)

KAHDEN RIIPPUMATTOMAN OTOKSEN KESKIARVOJEN VERTAILU T-TESTIN AVULLA

Tutkitaan satunnaismuuttujaa x kahdessa eri perusjoukossa.

1. Asetetaan nollahypoteesi $H_0: \mu_1 = \mu_2$, perusjoukon keskiarvo molemmissa otoksissa on sama. Vaihtoehtoinen hypoteesi $H_1: \mu_1 > \mu_2$, toisen perusjoukon keskiarvo on suurempi.
2. Lasketaan testisuure t , joka noudattaa t-jakaumaa vapausastein $f = n_1 + n_2 - 2$, jos nollahypoteesi on tosi. T-jakauman taulukosta etsitään kriittiset rajat, jotka määräytyvät vapausasteiden ja merkitsevyytason perusteella. Jos testisuure t sijaitsee hylkäysalueella, nollahypoteesi hylätään ja vaihtoehtoinen hypoteesi tulee voimaan.

3. Testisuure t lasketaan kaavalla:
$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} , \quad (4)$$

jossa,
$$s^2 = \frac{(n_1 - 1) * s_1^2 + (n_2 - 1) * s_2^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)} \rightarrow s = \sqrt{s^2} . \quad (5)$$

(Holopainen, Pulkkinen 2003, 165.)

9.1 Kosteuserojen tilastollinen merkitsevyys

Vertaillaan ryhmien maksimikosteuksien välisiä eroja toisessa syklissä. Eri syklien väliset olosuhteet RH 90 % -jaksojen aikana poikkesivat toisistaan, joten tilastollisessa tarkastelussa voidaan käsitellä vain yhtä sykliä kerrallaan. Vertailussa on käytetty toisessa syklissä olleita eroja ryhmien välillä, sama pätee myös tilavuusmuutosten tarkasteluun. Koeryhmistä tiedetään otoskoko n , otoksen keskiarvo \bar{x} ja otoksen keskihajonta s .

VESILASI 70 °C:	$\bar{x} = 41,7$. $n = 20$. $s = 4,3$.
KYLLÄSTÄMÄTÖN 70 °C:	$\bar{x} = 20,2$. $n = 20$. $s = 0,6$.
VESILASI 160 °C:	$\bar{x} = 48,4$. $n = 20$. $s = 4,3$.
KYLLÄSTÄMÄTÖN 160 °C:	$\bar{x} = 16,9$. $n = 20$. $s = 0,3$.

Vesilasi 70 °C & kyllästämätön 70 °C: kosteuseron tilastollinen merkitsevyys

Käytetään yksisuuntaista t-testiä 0,1 %:n merkitsevyystasolla:

1. Asetetaan nollahypoteesi $H_0: \mu_1 = \mu_2$, ryhmien maksimikosteus on sama. Vaihtoehtoinen hypoteesi $H_1: \mu_1 > \mu_2$, vesilasi 70 °C:n maksimikosteus on suurempi.
2. Lasketaan testisuure t sijoittamalla ryhmien tiedot yllä olevaan kaavaan. T-arvoksi saadaan 22,146. Vapausasteet ovat 38 ($F = n_1 + n_2 - 2$).
3. Etsitään t-jakauman taulukosta kriittinen arvo 0,1 %:n merkitsevyystasolla vapausasteiden ollessa 38. Tässä tapauksessa kriittinen arvo on 3,307.
4. T-arvo 22,146 on suurempi kuin kriittinen arvo 3,307, joten nollahypoteesi hylätään ja vaihtoehtoinen hypoteesi tulee voimaan. Tämä tarkoittaa, että vesilasi 70 °C:n maksimikosteus on tilastollisesti tarkasteltuna korkeampi 0,1 %:n merkitsevyystasolla. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

Lasketaan muidenkin ryhmien välisten erojen merkitsevyys samalla tavalla.

Vesilasi 160 °C & kyllästämätön 160 °C: kosteuseron tilastollinen merkitsevyys

Laskemalla edellä mainitulla tavalla saadaan selville, että vesilasi 160 °C:n maksimikosteus on tilastollisesti tarkasteltuna korkeampi 0,1 %:n merkitsevyystasolla. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

Vesilasi 70 °C & vesilasi 160 °C: kosteuseron tilastollinen merkitsevyys

Laskemalla saadaan selville, että vesilasi 160 °C:n maksimikosteus on tilastollisesti tarkasteltuna korkeampi 0,1 %:n merkitsevyystasolla. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

Kyllästämätön 70 °C & kyllästämätön 160 °C: kosteuseron tilastollinen merkitsevyys

Laskemalla saadaan selville, että kyllästämätön 70 °C:n maksimikosteus on tilastollisesti tarkasteltuna korkeampi 0,1 %:n merkitsevyystasolla. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

9.2 Tilavuuden muutosten tilastollinen merkitsevyys

Tarkastellaan koeryhmien turpoamisten eroja toisessa syklissä välillä RH 20 % - RH 90 %. Koeryhmistä tiedetään otoskoko n , otoksen keskiarvo \bar{x} ja otoksen keskihajonta s .

VESILASI 70 °C:	$\bar{x} = 12,4 \%$. $n = 20$. $s = 1,5 \%$
KYLLÄSTÄMÄTÖN 70 °C:	$\bar{x} = 9,0 \%$. $n = 20$. $s = 1,1 \%$
VESILASI 160 °C:	$\bar{x} = 11,3 \%$. $n = 20$. $s = 1,8 \%$
KYLLÄSTÄMÄTÖN 160 °C:	$\bar{x} = 6,5 \%$. $n = 20$. $s = 0,6 \%$

Käytetään yksisuuntaista t-testiä 0,1 %:n merkitsevyystasolla ja lasketaan erojen merkitsevyys edellä mainitulla tavalla.

Vesilasi 70 °C ja kyllästämätön 70 °C

Laskemalla saadaan selville, että vesilasi 70 °C turpoaa enemmän 0,1 %:n merkitsevyystasolla. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

Vesilasi 160 °C ja kyllästämätön 160 °C

Laskemalla saadaan selville, että vesilasi 160 °C turpoaa enemmän 0,1 %:n merkitsevyystasolla. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

Vesilasi 70 °C ja vesilasi 160 °C

Asetetaan nollahypoteesi $H_0: \mu_1 = \mu_2$, ryhmät turpoavat yhtä paljon. Vaihtoehtoinen hypoteesi $H_1: \mu_1 > \mu_2$, vesilasi 70 °C turpoaa enemmän.

T-arvoksi saadaan laskemalla 2,099, joka on pienempi kuin kriittinen arvo 3,307, eli nollahypoteesi jää voimaan. 0,1 %:n merkitsevyystasolla ei siis voida yleistää, että 70 °C:ssa kuivatut vesilasikappaleet turpoavat enemmän. Myös 1 %:n merkitsevyystasolla nollahypoteesi jää voimaan, koska t-arvo 2,099 on pienempi kuin kriittinen arvo 2,423.

Tarkasteltaessa eroja 5 %:n merkitsevyystasolla, kriittinen arvo on 1,684. T-arvo 2,099 on suurempi kuin kriittinen arvo 1,684, eli nollahypoteesi hylätään. 5 %:n merkitsevyystasolla 70 °C:ssa kuivatut vesilasikappaleet turpoavat siis enemmän. Tulos on tilastollisesti melkein merkitsevä.

Kyllästämätön 70 °C ja kyllästämätön 160 °C

Laskemalla saadaan selville, että kyllästämätön 70 °C turpoaa enemmän 0,1 %:n merkitsevyystasolla. Tulosta voidaan pitää tilastollisesti erittäin merkitsevänä.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vesilasikyllästetyn puun tulokset olivat sekä kosteudessa että dimensiostabiilisuudessa huonommat kuin kyllästämättömillä vertailukappaleilla. Tulokset olivat yllättäviä, koska testin alussa uskottiin, että vesilasikyllästyksellä voitaisiin parantaa puun dimensiostabiilisuutta ja vähentää kosteuden imeytymistä puuhun. Tämän tutkimuksen perusteella vesilasikyllästys ei siis parantanut tutkittuja ominaisuuksia. Toisaalta erot ryhmien kosteudessa alkoivat kasvaa suuriksi vasta kosteiden RH 90 % -jaksojen aikana. Sen sijaan kuivempien RH 20 % ja RH 65 % -jaksojen aikana kosteuserot eivät olleet niin merkittäviä. Tilastollisen tarkastelun perusteella tulokset ovat myös pääosin yleistettävissä.

Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan selvitetty syytä siihen, miksi vesilasikyllästetyt kappaleet imevät enemmän kosteutta ja turpoavat enemmän. Toisaalta kyllästyksen jälkeen puuta voidaan jälkikäsitellä eri tavoilla, joita ei tässä yhteydessä tutkittu. Esimerkiksi lämpökäsittely korkeammassa lämpötilassa olisi voinut vaikuttaa tuloksiin. Vesilasia on myös olemassa eri vahvuisina liuksina, joten eri liuosväkevyyksillä saattaisi tulla erilaisia tuloksia.

Vesilasikyllästyksellä on silti onnistuttu parantamaan monia muita puun ominaisuuksia, esimerkiksi kovuutta ja palonkestoa on saatu parannettua huomattavasti. Tärkein etu perinteisiin kyllästeisiin verrattuna on kuitenkin vesilasin myrkyttömyys ja ympäristöystävällisyys. Aihetta jatkotutkimuksille voisi olla siinä, mitkä tekijät vaikuttavat vesilasikyllästetyn puun hygroskooppisuuteen ja dimensiostabiilisuuteen.

LÄHTEET

- Arvonen, A. & Levonen, H. 2002. Ammattikorkeakoulun kemia. 1.-2. painos. Helsinki: Otava.
- Boren, H. 2009. Projektisuunnitelma: vesilasikyllästetyn puun ominaisuudet ja niihin vaikuttavat tekijät. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.
- Hautala, M. & Peltonen, H. 1999. Insinöörin (AMK) fysiikka osa I. 5. uudistettu painos. Jyväskylä: Gummerus.
- Holopainen, M. & Pulkkinen, P. 2003. Tilastolliset menetelmät. 1.-2. painos. Helsinki: WSOY.
- Jyväskylän messut Oy 2007. Uudet innovaatiot Puu ja Bioenergia 2007 – messuilla Jyväskylässä, Vesilasikyllästyksellä myrkytöntä puuta.
<http://www.jklpaviljonki.fi/puu2007/tiedote6.php> (viitattu 10.3.2010).
- Jämsä, S. & Viitaniemi, P. 1996. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. VTT:n julkaisuja 814. Espoo: VTT Offsetpaino.
- Koponen, S. & Lehtinen, M. 1997. Puuviilulevyjen tasapainokosteus. Talonrakennustekniikan laboratorio julkaisu 60. Teknillinen korkeakoulu. Espoo.
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Hämeenlinna: Karisto Oy 2003.
- Mansikkamäki, P., Nurmi, A. & Ylinen, R. 1983. Paineekyllästysprosessin automaattinen ohjaus. VTT:n tutkimuksia 241. Espoo: VTT Offsetpaino.
- Nuutinen, E. 1976. Puun kyllästyvyyteen vaikuttavat tekijät ja kyllästyvyyden parantaminen. VTT:n tiedonanto 15. Espoo: VTT Offsetpaino.

Piispanen, K. 1979. Kaksoistyhjökyllystys. VTT:n tiedonanto 24. Espoo: VTT Offsetpaino.

Siimes, H. 1983. Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980 - 1982. Sahataran kuivauskäsikirja. VTT:n tiedotteita 243. Espoo: VTT Offsetpaino.



Kuva 7. Vesilasin valumajäljet alustassa



Kuva 8. Vesilasin valumajäljet alustassa

Koekappaleiden mittaustaulukko

		Rn 20% tassaannutuksen jälkeen 3.3.2010						
Koepala nro:	Paks. mm	Lev. mm	Pit. mm	Tilavuus mm ³	Massa g	kosteus %	Tiheys kg/m ³	
70 °C Vesilasi	1.13A	15,05	24,98	50,20	18873	12,36	6,74	655
	2.13A	14,96	24,91	50,43	18793	13,09	6,42	697
	3.13A	15,11	25,01	50,31	19012	13,64	6,31	717
	4.13B	15,10	24,96	50,41	18999	12,74	6,52	671
	5.13A	15,23	25,07	50,45	19263	11,69	6,95	607
	6.13A	15,09	24,98	50,58	19066	13,41	6,43	703
	7.13C	15,05	24,87	50,44	18879	13,24	6,43	701
	8.13C	15,01	24,93	50,41	18863	13,27	6,59	703
	9.13B	15,09	25,13	50,34	19090	11,77	6,81	617
	11.13B	15,07	24,90	50,37	18901	13,94	6,25	738
	12.13A	15,03	24,95	50,41	18904	12,13	6,78	642
	13.13C	15,09	24,99	50,35	18987	12,48	6,76	657
	14.13A	15,08	24,94	50,34	18933	12,91	6,61	682
	15.13B	15,04	24,98	50,40	18935	12,19	6,74	644
	16.13C	14,95	24,88	50,36	18732	13,58	6,26	725
	17.13C	15,11	24,87	50,37	18928	13,17	6,38	696
	18.13B	15,08	25,06	50,46	19069	13,24	6,17	694
	19.13C	15,11	25,02	50,56	19114	11,93	6,90	624
	20.13A	15,11	25,04	50,51	19111	12,12	6,69	634
	21.13C	15,09	25,04	50,45	19063	12,63	6,58	663
keskiarvo	15,07	24,98	50,41	18976	12,78	6,57	673	
keskihajonta	0,06	0,07	0,09	126	0,67	0,23	38	
160 °C Vesilasi	1.16A	15,16	24,83	50,18	18889	12,14	7,34	643
	2.16A	14,93	24,75	50,38	18616	12,56	7,26	675
	3.16A	14,97	24,91	50,32	18764	13,44	6,84	716
	4.16B	15,03	24,93	50,44	18900	12,03	7,31	637
	5.16A	15,16	24,98	50,42	19094	11,04	7,50	578
	6.16A	14,99	24,91	50,48	18849	13,03	6,98	691
	7.16C	14,93	24,67	50,50	18600	13,17	6,99	708
	8.16C	15,02	24,86	50,41	18823	12,74	7,06	677
	9.16B	15,01	25,10	50,33	18962	11,36	6,87	599
	11.16B	14,96	24,77	50,50	18713	13,87	6,77	741
	12.16A	14,93	24,87	50,36	18699	11,87	7,52	635
	13.16C	15,04	24,87	50,33	18826	12,07	7,58	641
	14.16A	14,96	24,91	50,33	18756	12,85	7,26	685
	15.16B	14,97	24,97	50,40	18840	11,58	7,42	615
	16.16C	14,99	24,70	50,41	18664	13,31	7,17	713
	17.16C	15,09	24,71	50,41	18797	12,73	7,15	677
	18.16B	15,00	24,92	50,38	18832	12,67	6,83	673
	19.16C	15,08	24,88	50,48	18940	11,74	7,51	620
	20.16A	14,99	24,81	50,39	18740	11,92	7,29	636
	21.16C	15,04	24,85	50,48	18867	12,17	7,13	645
keskiarvo	15,01	24,86	50,40	18809	12,41	7,19	660	
keskihajonta	0,07	0,10	0,08	120	0,74	0,25	42	
Käsittelemättömät referenssi-kappaleet (70 °C)	1.15A	14,83	24,81	50,14	18448	9,90	5,43	537
	2.15A	14,82	24,70	50,18	18369	10,93	5,81	595
	3.15A	14,95	24,82	50,26	18649	11,66	5,33	625
	4.15B	14,87	24,86	50,24	18572	10,35	5,61	557
	5.15A	14,95	24,92	50,25	18721	9,10	5,32	486
	6.15A	14,81	25,02	50,35	18657	11,23	5,55	602
	7.15C	14,96	24,73	50,30	18609	11,39	5,86	612
	8.15C	14,88	24,85	50,25	18581	10,76	5,70	579
	9.15B	14,77	24,97	50,23	18525	9,37	5,52	506
	11.15B	14,91	24,88	50,38	18689	12,09	5,59	647
	12.15A	14,79	24,83	50,22	18443	9,74	5,64	528
	13.15C	14,87	24,89	50,22	18587	9,98	5,72	537
	14.15A	14,83	24,93	50,21	18563	10,76	5,70	580
	15.15B	14,79	24,90	50,24	18502	9,75	5,63	527
	16.15C	15,01	24,61	50,24	18558	11,63	5,63	627
17.15C	14,80	24,77	50,24	18418	10,86	5,44	590	
18.15B	14,85	24,87	50,23	18551	10,85	5,54	585	
19.15C	14,80	24,83	50,30	18484	9,41	5,61	509	
20.15A	14,81	24,81	50,30	18482	9,86	5,34	533	
21.15C	14,88	24,95	50,26	18659	10,39	5,70	557	
keskiarvo	14,86	24,85	50,25	18553	10,50	5,58	566	
keskihajonta	0,07	0,10	0,05	95	0,85	0,15	45	