

**Tuomo Väärä
Hannu Boren**

Puun modifiointiklusteri

Loppuraportti

**Kymenlaakson ammattikorkeakoulu
University of Applied Sciences
2012**



Tuomo Väärä
Lehtori
Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

Hannu Boren
MMT

Puun modifiointiklusteri Loppuraportti



Copyright: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu
Kustantaja: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu
Taitto: Tammerprint Oy, Tampere 2012

ISBN (NID.): 978-952-5963-50-2
ISBN (PDF.): 978-952-5963-51-9
ISSN: 1239-9094
ISSN: (verkkajulkaisu) 1797-5972

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	5
ABSTRACT	7
1 JOHDANTO	9
2 HANKKEEN TAUSTAA, TAVOITTEET JA TOTEUTUS	10
3 KYLLÄSTÄMÖIDEN SUUNNITTELUOHJEITA	12
3.1 Ohjeen käyttö	12
3.2 Suunnittelun lähtötiedot	12
3.3 Eri tekijöiden vaikutus kyllästämöiden teknisiin vaatimuksiin, mitoitukseen ja mahdollisiin ympäristölupaehdotuksiin	13
3.3.1 Käytettävät kemikaalit	13
3.3.2 Käytettävät prosessit	14
3.3.2.1 Bethell- ja Lowry-prosessit	14
3.3.2.2 LOSP-prosessit	15
3.3.2.3 Boulton- ja OHT-prosessit	16
3.3.2.4 Rüping-prosessi	17
3.3.2.5 HT-prosessi ja kyllästetyn puun jälkikäsittely	18
3.4 Kyllästämön prosessit, tekniset vaatimukset ja mitoitus esimerkkitapauksessa	19
3.4.1 Vesilasi ja käsittelyprosessi vesilasilla	19
3.4.2 Raakamäntyöljy, sen jalosteet ja käsittelylaitteisto mäntyöljyllä	20
4 MODIFIOIDUN PUUN OMINAISUUDET	26
4.1 Dimensiostabiilitteetti	26
4.1.1 Testimateriaali	26
4.1.2 Testimenetelmä	26
4.1.3 Tulokset	28
4.1.4 Johtopäätökset	30
4.2 Lujuusominaisuudet	30

4.2.1	Testimateriaali.....	30
4.2.2	Testaus.....	31
4.2.3	Tulokset.....	31
	4.2.3.1 Taivutuslujuus ja kimmokerroin taivutuksessa....	31
	4.2.3.2 Leikkauslujuus	33
4.2.4	Johtopäätökset.....	34
4.3	Liimattavuus.....	34
4.3.1	Testimateriaali.....	35
4.3.2	Testaus.....	35
4.3.3	Tulokset.....	36
	4.3.3.1 Liimasauman leikkauslujuus ja puustamurtuma .	36
	4.3.3.2 Liimasauman delaminointuminen.....	40
4.3.4	Johtopäätökset.....	41
4.4	Työstettävyys.....	42
4.4.1	Höyläyskoe	42
4.4.2	CNC-jyrsintäkoe.....	43
4.4.3	Johtopäätökset.....	45
4.5	Palo-ominaisuudet	45
4.5.1	Paloikkunan testaus.....	46
4.5.2	Seinäelementtien testaus SBI-palokokeella	47
4.6	Vesilasikutteripurun poltettavuus	51
5	YHTEENVETO	54

LIITTEET

Liite 1.	Kyllästysylinterin lujuustarkastelu.....	56
Liite 2.	Esimerkki alipainejärjestelmän mitoituksesta	63
Liite 3.	Mäntyöljyprosessin lämpöenergian ja siirtotehojen laskentaesimerkki	64

TIIVISTELMÄ

Puun modifiointiklusteri -hankkeen tavoitteena oli jatkaa Kymenlaakson ammatikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa aloitettua, painekyllästyksen perustuvaa puun modifioinnin tutkimus- ja kehitystyötä, jotta saataisiin uutta tietoa modifiointimenetelmistä ja modifiointiaineista. Tavoitteena oli myös perustaa Kymenlaaksoon moderni painekyllästyklusteri. Klusterin tarkoituksena oli, että laitevalmistajat voisivat yhteistyössä suunnitella ja valmistaa puun modifiointiin soveltuvan painekyllästyslaitteiston ja tarjota sitä edelleen puutavaraa valmistaville yrityksille uusien, modifioitujen puutuotteiden valmistamiseksi.

Hankkeessa laadittiin uusien, modifioitujen puutuotteiden tuotantoa varten ohjeet, joissa käsiteltiin kyllästysprosessien, kyllästysaineiden, kyllästämön teknisten vaatimusten, mitoituksen sekä ympäristö- ja turvallisuuskäsitteiden huomioon ottamista kyllästyslaitteiston suunnittelussa. Tämän selvitystyön perusteella hankkeessa mukana olleet kone- ja laitevalmistajat suunnittelivat yhteistyössä KyAMK:n kanssa pilottikyllästämön ja tarjosivat sitä puutuoteollisuudelle. Kyllästyslaitteiston suunnittelu ei kuitenkaan tässä hankkeessa johtanut kaupalliseen toimintaan.

Uutta tietoa puun modifiointimahdollisuuksista hankittiin suomalaisille puulajeille tehtyjen koekyllästysten ja kansainvälisten vierailujen avulla. Koekyllästyksillä ja kyllästysten jälkeisellä lämpökäsittelyllä tuotettiin erilaisia materiaaleja, joiden ominaisuuksia testattiin. Hankkeessa tuotettiin myös uudella tavalla modifioitua puuraaka-ainetta puujalostusyrityksille, jotka valmistivat siitä jatkotestausta varten tuotteita, mm. paloikkunoita, puupylväitä ja ulkoverhouslautoja.

Vesilasikyllästys ja sen jälkeinen lievä lämpökäsittely ei parantanut puumateriaalin mittapysyvyyttä kosteusvaihteluissa. Kyseessä oli kuitenkin alkukehitysvaiheessa oleva tuote, jota on myöhemmin kehitetty eri käyttökohteisiin mm. muuttamalla vesilasiliuoksen konsentraatiota ja lämpökäsittelyn lämpötilaa. Näillä toimilla on saatu parannettua mm. vesilasikyllästetyn puun dimensiostabiiliteettia.

Lujuustestien mukaan vesilasikyllästys ja siihen liitetty lämpökäsittely eivät vaikuta oleellisesti puun taivutus- ja leikkauslujuuteen. Kimmokerroin taivutuksessa sen sijaan hieman aleni vesilasikyllästetyllä ja lämpökäsittelyllä materiaalilla. Mäntyöljykeitto ei vaikuttanut puun kimmokertoimeen taivutuksessa, mutta taivutus- ja leikkauslujuus heikkenivät mäntyöljykäsittelyllä puulla jopa 20 %.

Liimauskokeissa käytettiin kylmäkovettuvaa melamiini-formaldehydihartsia, melamiini-urea-formaldehydihartsia, fenoli-resorsinoli-formaldehydihartsia ja kosteuskovettuvaa polyuretaaniliimaa. Vesilasikyllästys ja siihen liitetty lämpökäsittely eivät oleellisesti heikentäneet liimauksen laatua. Kuitenkin vesilasimateriaalilla

polyuretaaniliiman liimaustulos oli selvästi muita heikompi, myös referenssimateriaalilla, joten liimauksessa on saattanut tulla virhe. Mäntyöljykäsitteltyjen materiaalien liimasauman leikkauslujuudet olivat kaikilla liimoilla selvästi pienemmät kuin käsittelemättömien vertailukappaleiden. Toisaalta myös mäntyöljykäsitteltyyn puun leikkauslujuus on pienempi kuin vastaavan käsittelemättömän referenssimateriaalin.

Tässä hankkeessa vesilasikyllästetyn materiaalin työstökokeet tehtiin niin pienellä otoksella, ettei tullut esille selvästi suurempaa terän kulumista referenssimateriaaliin verrattuna. Kuitenkin vesilasikyllästetyn ulkoverhouslaudan höyrypalotestiä varten osoitti höylän sivukutterien terien kuluvaan erittäin nopeasti.

Paloikkunan testaus VTT:llä osoitti, että vesilasikyllästetystä puusta valmistetulla ikkunalla on mahdollisuus täyttää sekä sisä- että ulkopuolelta testattaessa paloluokan EI30 vaatimukset. SBI-palokoe MeKA:ssa Latviassa osoitti, että vesilasikyllästetyllä ulkoverhouspaneelilla on potentiaalia täyttää paloluokka D, s1, d0. SBI-testin tulosta heikensi se, että testimateriaalin sydänpuuosuus oli varsin suuri, mikä pienensi vesilasin jäämää tuotteessa.

Vesilasipurun poltto oli savukaasupäästöjen suhteen ongelmaton, mutta poltettaessa yksistään vesilasipurua, tuhka sintraantui ja tarttui tulipesän seinille ja ariinaan lasimaiseksi laataksi. Vesilasipurun sekoittaminen puoliksi pellettien kanssa poisti tämän ongelman, joten korkeajäämistä vesilasipurua ei tulisi polttaa yksistään, vaan se tulisi polttaa yhdessä muiden polttoaineiden kanssa.

ABSTRACT

The aim of the “Wood modification cluster” project was to continue the research and development work started in the wood technology laboratory of the Kymenlaakso University of Applied Sciences in order to obtain new information on the wood modification methods and substances. Another aim was to establish a modern pressure impregnation cluster in Kymenlaakso. The aim of the cluster was to build a chain for machinery producing companies to co-operate in designing and producing a pressure impregnation equipment suitable for wood modification and in offering it to the use of wood processing companies.

During the project, the design instructions were formed for the production of the new, modified wood products. The instructions included the impregnating processes, impregnation substances, technical requirements of impregnation plants, measuring requirements and environmental and safety aspects. Based on the abovementioned research, the participating machinery and equipment producing companies designed together with Kymenlaakso University of Applied Sciences a pilot impregnation plant and offered it to wood processing companies. However, the commercial manufacture of the impregnation plant was not realized during this project.

New information on the possibilities of wood modification was gathered by means of and trial impregnations made on Finnish wood species international symposiums. The different products were manufactured by means of the trial impregnations and post-impregnation heat treating. After the processing of these products, several properties of material were tested. During the project, new modified wood raw material was produced for the wood refining companies which manufactured products from this material for further testing, e.g. fire resistant windows, wooden poles, and exterior cladding boards.

The water glass impregnation and the subsequent heat treatment at relatively low temperature did not improve the dimensional stability caused by moisture changes. In this case, the tested product was at the beginning of its development cycle, but later the product was developed by changing the concentration of water glass liquid and the heat treating temperature. Both actions improved the dimensional stability of the water glass impregnated timber.

Based on the strength tests, the water glass impregnation combined with the heat treatment seems to have no essential impact on the bending or the shear strength of wood. On the other hand, the water glass impregnated material had a little lower modulus of elasticity in bending than the untreated reference material. Tall oil

treatment did not affect the modulus of elasticity in bending, but the bending strength and the shear strength declined as much as 20 % in tall oil treated wood.

Cold hardening melamine formaldehyde resin, melamine-urea formaldehyde resin, phenol-resorcinol formaldehyde resin and moisture hardening polyurethane glue were used in the gluing tests. The water glass impregnation combined with the heat treatment did not essentially degrade the bonding quality of the glue line. However, the water glass impregnated material glued with polyurethane glue had remarkably poorer glue line than the others, which was also the case in the reference material, so the gluing must have failed at some point. With all glues, the shear strengths of the glue lines of the tall oil treated material were clearly smaller than those of the untreated reference material. On the other hand, the shear strength of the tall oil treated wood material was smaller than that of the untreated reference material.

In this project, the machinability tests of the water glass impregnated material were carried out by using such a small sampling that no essential blunting of knives was noticed compared with the reference material. However, when planing the water glass impregnated exterior cladding boards for fire test walls, the side cutters of the plane machine became blunt rapidly.

The testing of the fire resistant window at VTT proved that the window made out of the water glass impregnated wood has potential to meet the requirements of the fire class EI30 when tested both inside and outside. SBI fire test at MeKA in Latvia showed that the exterior wall cladding material made out of the water glass impregnated wood has potential to meet the requirements of the fire class D, s1, d0. The result of the SBI test was somewhat compromised by the fact that the amount of heart wood in the test material was very great, which decreased the retention of water glass in the product.

The burning of the water glass impregnated cutter shavings was non-problematic with regard to exhaust emissions, but when burning solely water glass cutter shavings, the ashes glazed into glass-like plate which stuck on the walls and the fire grate of the furnace. This problem was eliminated by mixing water glass cutter shavings with pellets, at fifty-fifty ratio, so water glass cutter shavings with high water glass retention should not be burned solely, but instead they should be burned with other fuels.

1 JOHDANTO

Puun Modifiointiklusteri -hanke on Kymenlaakson ammattikorkeakoulun koor-
dinoima sekä Kymenlaakson Liiton ja ohjausryhmässä mukana olevien yritysten
rahoittama hanke, jolla pyritään edistämään uusien, modifioitujen puutuotteiden
valmistusta ja kauppaa sekä siirtämään Kymenlaakson ammattikorkeakoulun lait-
teisto-osaamista yrityksille. Tässä raportissa julkistetaan hankkeen pääasialliset
tulokset.

Raportti on jaettu kahteen osaan. Ensimmäinen osa antaa kone- ja laitevalmistajil-
le ja laitteistojen hankintaa suunnitteleville yrityksille perustiedot kyllästämöiden
teknisistä vaatimuksista ja kyllästämöiden mitoitusperusteista sekä taloudellisel-
ta että toiminnalliselta (prosessin sujuvuuden) kannalta. Tämän osan on kirjoitta-
nut Hannu Boren. Toisessa osassa esitellään ne tulokset, jotka on saatu hankkees-
sa tehdyissä kyllästyskokeissa ja modifioitujen puutuotteiden testauksessa. Tämän
osan on kirjoittanut Tuomo Väärä.

Hankkeen ohjaukseen on osallistunut projektin ohjausryhmä. Ohjausryhmään
ovat kuuluneet seuraavat henkilöt ja yhteisöt:

Jouko Luode, Cursor Oy

Martti Nakari, Cursor Oy

Mika Suikkanen, Key-Link Engineering Oy

Jari Hämäläinen, Kotkan Konepaja Oy

Hannu Boren, KyAMK

Risto Jetsonen, KyAMK

Erkki Reiman, KyAMK

Reeta Stöd, KyAMK

Tuomo Väärä, KyAMK

Riitta Kallström, Kymenlaakson Liitto

Jari Vuorimaa, Lasivuorimaa Oy

Janne Pynnönen, StoraEnso Wood Products Oy Ltd

Jouko Silen, StoraEnso Wood Products Oy Ltd

Esa Pesari, Tehomet Oy

Ilkka Sorsa, Visi-Systems Oy

Heikki Vehviläinen, Visi-Systems Oy

2 HANKKEEN TAUSTAA, TAVOITTEET JA TOTEUTUS

Projektin aloittamista tukivat samaan aikaan KyAMK:ssa käynnissä olleet puun modifiointiin liittyneet yritysveltoiset hankkeet ja Kymenlaakson Liiton rahoittama Palvaanjärven koerakentamishanke “Moderni painekyllästys ja uusien puutuotteiden testaus aidossa, rakennetussa ympäristössä -jatkoehanke”.

Hankkeen tavoitteina oli

1. siirtää KyAMK:ssa syntynyt taitotieto painelaitteilla tehtävästä puun modifioinnista alueen yrityksille ja rakentaa Kymenlaaksoon moderni painekyllästysklusteri,
2. siirtää ja levittää taitotietoa ja osaamista modifioitujen puutuotteiden ominaisuuksista ja mahdollisuuksista rakentamisessa alan yrityksiin, kauppiaille, rakentajille, suunnittelijoille, opiskelijoille ja muille alan ammattilaisille sekä
3. hankkia alustavaa tietoa uusista puun modifiointimahdollisuuksista kansainvälisten vierailujen ja suomalaisille puulajeille tehtävien koekyllästysten avulla.

Projektin avulla yritykset voivat käynnistää uutta liiketoimintaa, ja tuloksia voidaan hyödyntää myös KyAMK:n uudistetussa puutekniikan koulutusohjelmassa. Tuloksia hyödyntävät niin koko klusteri kuin julkiset organisaatiotkin.

Projektin kohderyhmänä on uusia, modifioituja puutuotteita valmistavat yritykset sekä painekyllästyslaitteita suunnittelevat ja valmistavat yritykset. Projektilla pyritään kehittämään uusia ympäristöystävällisiä puun modifiointimenetelmiä ja lisäämään puutuotteiden käyttöä rakentamisessa.

Yhteistyötahot valikoituivat puuta jalostavista yrityksistä, kone- ja laitevalmistajista sekä kone- ja laitesuunnitteluyrityksistä, koska tavoitteena oli perustaa Kymenlaaksoon moderni painekyllästysklusteri. Klusterin tarkoituksena oli, että laitevalmistajat voisivat yhteistyössä suunnitella ja valmistaa puun modifiointiin soveltuvan painekyllästyslaitteiston sekä tarjota sitä puutavaraa valmistaville yrityksille, jotka toimittaisivat modifioitua puumateriaalia puun jatkojalostajille.

Hankkeessa mukana olleet kone- ja laitevalmistajat suunnittelivat yhteistyössä KyAMK:n kanssa pilottikyllästämön. Kyllästämön suunnitteluun tarvittavaa uutta tietoa hankittiin koekyllästysten avulla ja osallistamalla kansainvälisiin seminaareihin. Laitteiston turvallisuutta suunniteltaessa oli mukana myös Tukes.

Koekyllästyksket tehtiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun kyllästyslaitteilla. Modifiointiin kuuluva puun lämpökäsittely tehtiin pääosin Mikkelin ammattikorkeakoulun lämpökäsittelylaitoksella. Koekyllästysten avulla ja kyllästetyn ja lämpökäsittelyn puutavaran testauksella (mittapysyvyys, lujuus, liimattavuus, työstöominaisuudet, palo-ominaisuudet) tuotettiin puualan yrityksille uutta tietoa uusista kyllästysmenetelmistä ja modifioidun puun materiaaliominaisuuksista. Puun jatkojalostusta harjoittavat yritykset toimittivat modifioidusta puusta valmistettuja tuotteita testattaviksi. Testaukset tehtiin joko KyAMK:n puutekniikan laboratoriossa tai alihankintana muissa testauslaitoksissa (esim. palokokeet VTT:llä ja MeKA:lla Latviassa).

Kemian alan kansainvälisten yritysten kanssa (J.M. Huber Finland ja Dynea) tehtiin yhteistyötä, kun selvitettiin vesilasin ja melamiinin käyttöä puun modifioinnissa.

Kansainvälisiä kontakteja haettiin vierailemalla modifioitujen puutuotteiden kehittäjien (Natwood Itävallassa ja TimberSIL-tuotteiden esittely Ruotsissa) luona ja osallistumalla puun modifiointiseminaariin Sveitsissä.

3 KYLLÄSTÄMÖIDEN SUUNNITTELUOHJEITA

3.1 Ohjeen käyttö

Tähän ohjeeseen on koottu keskeisiä asioita kyllästämöiden prosesseista, teknisistä vaatimuksista ja mitoitusperusteista huomioiden sekä taloudelliset että toiminnalliset (prosessin sujuvuus) näkökulmat. Tämä ohje ei ole täydellinen, mutta antaa kyllästämön hankintaa suunnitteleville yrityksille ja laitteiden valmistajille tarvittavia perustietoja investointisuunnitelman ja mahdollisen ympäristölupahakemuksen laatimiseksi.

Raportin lopussa esitetään kaksi esimerkkiä kyllästämön prosesseista, teknisistä vaatimuksista ja mitoitusperusteista, kun kemikaaleina käytetään vesilasia ja raakamäntyöljyä tai sen jalosteita. Vesilasi ja mäntyöljyt poikkeavat toisistaan hyvin paljon prosessien, teknisten vaatimusten ja mitoitusperusteiden suhteen.

3.2 Suunnittelun lähtötiedot

Kyllästämön suunnittelu aloitetaan määrittämällä tavoiteltu kyllästyskapasiteetti ja puun käsittelyssä käytettävät kemikaalit. On tunnettava kemikaalien ominaisuudet, kuten biosidisyys, palo- ja räjähdysvaaralliset ominaisuudet sekä reaktiivisuus. Lisäksi on määriteltävä kemikaalien käyttömäärät ja käsittelyprosessit. Käsittelyprosessien suhteen on selvítettävä perusprosessin tyyppi eli se, käytetäänkö Bethell-, Boulton-, HT-, LOSP-, Lowry-, OHT- vai Rüping-prosessia, sekä enimmäisprosessilämpötila ja -paine. Tarvittavia lähtötietoja ovat myös käsiteltävän puutavaran alkukosteus, pakettikoko ja paketoitintapa, dimensiot ja puulajit.

Kyllästämöä suunniteltaessa on myös määriteltävä, milloin tavoitteen mukainen alipaine, paine ja lämpötila saavutetaan ja milloin eri säiliöt täytetään ja tyhjenetään. Näiden mukaan mitoitetaan lämmitys-, jäähdytys-, alipaine- ja paineilmajärjestelmät sekä mm. siirtoputkistojen ja -pumppujen koko. Esimerkkejä laskelmista on esitetty liitteissä 1, 2 ja 3.

Mahdollisesta kyllästämön sijoituspaikasta tarvitaan seuraavat tiedot:

1. sijoituspaikka (pohjavesialueella vai muualla)
2. vesi- ja viemäröintitilanne
3. sähkön saatavuus
4. lämpöenergian saatavuus ja enimmäislämpötila verrattuna prosessivaatimukseen
5. valmiiden rakennusten käyttö- ja uusien rakentamismahdollisuus (mm. rakennuslupa, kaavoitustilanne)

6. alueen sisäinen logistiikka (mm. trukit, pyöräkuormaajat, varastot, kuivaamot, höyläys, lajittelu- ja paketoitijärjestelmät, lumityöt, jätteiden – myös mahdollisten ongelmajätteiden – käsittely)
7. logistiset yhteydet alueen ulkopuolelle
8. ympäristölupaehdoin vaikuttavat ulkoiset tekijät (mm. naapureiden läheisyys ja toiminnan luonne naapurialueilla)

Yllä mainituilla asioilla on suuri vaikutus investointisuunnitelmien sisältöön ja laajuuteen, investoinnin arvoon ja kannattavuuteen sekä mahdollisiin ympäristölupaehdoin. Luvussa 3.3 on esitetty, miten eri tekijät vaikuttavat teknisiin vaatimuksiin, mitoitukseen ja mahdollisiin ympäristölupaehdoin.

3.3 Eri tekijöiden vaikutus kyllästämöiden teknisiin vaatimuksiin, mitoitukseen ja mahdollisiin ympäristölupaehdoin

3.3.1 Käytettävät kemikaalit

Suurin vaikutus investointisuunnitelmiin ja mahdollisiin ympäristölupaehdoin on kyllästämössä käytettävillä kemikaaleilla ja niiden käyttömäärillä. Puun käsittelyssä käytettävät kemikaalit määrittävät käsittelyprosessin tyypin (Bethell, Boulton, HT, LOSP, Lowry, OHT tai Rüping) sekä prosessilämpötilan ja -paineen. Lisäksi käytettävät kemikaalit vaikuttavat laitteiston materiaalivaatimuksiin ja vaadittaviin turvaratkaisuihin. Korrosoivat aineet ja menetelmät sekä korkeat, yli 100 asteen lämpötilaa vaativat menetelmät vaativat yleensä ruostumattoman teräsmateriaalin, jollainen on esim. EN 1.4307 tai Duplex EN 1.4162.

Biosidisillä aineilla vaikutetaan eliöihin kemiallisesti tai biologisesti. Tällaisia aineita käytettäessä laitteistoratkaisun tulee olla suljettu, eli laitteistot on sijoitettava turva-altaiden päälle, joiden tilavuus vastaa vähintään kemikaalien enimmäissäilytysmäärää. Biosidisellä kemikaalilla käsitellystä puusta ei saa valua ja tihkua ainetta käsittelyn jälkeen. Mikäli tällainen riski on olemassa, yleensä vaaditaan asfaltointia tai betonointia ja viemärointiä siten, että valumavedet johdetaan puhdistettaviksi tai kyllästysprosessissa hyödynnettäviksi. Mahdolliset prosessisakat yms. tulee säilyttää erillisessä, lukitussa ongelmajätevarastossa.

Palavien ja räjähdysherkkien kemikaalien käyttö voi tuoda normaalia tiukemmat turva- ja laitevaatimukset kyllästämölle (ks. ATEX-direktiivi), vaikka käyttölämpötilat olisivat 5 astetta alle kemikaalin leimahduspisteen. Kemikaalien leimahduspiste ei ole vakio, eli se voi vaihdella eri olosuhteissa. Oman riskilisänsä tuovat kuumat putkistot, sähkömoottorit tai jopa pyöräkuormaajan kuuma pakoputkisto yhdessä kuivan puupölyn ja haihtuvien sekä höyrystyvien kemikaalien kanssa esim. vuotojen yhteydessä. Nämä riskit täytyy kartoittaa jokaisen kemikaalin yhteydessä ja varautua investointeja suunniteltaessa hyvään tuuletukseen, puhtaana- pidon helppouteen, erillisiin ATEX-luokiteltuihin tiloihin ja laitteisiin sekä niiden

kaapelointiin, automaattisiin turvaratkaisuihin ja sammutusjärjestelmiin, pelastussuunnitelmiin sekä normaalia parempaan henkilökunnan koulutukseen.

Kyllästämö suunnitellaan yleensä tiettyä prosessia ja kemikaalia varten. Jos kyllästämöä suunnitellaan siten, että useiden erilaisten kemikaalien ja prosessien käyttö on mahdollista, investointikustannukset kasvavat huomattavasti. Näin on erityisesti silloin, kun jokin käytettävistä kemikaaleista tai prosesseista aiheuttaa räjähdys- ja tulipalovaaran. Tällöin osa tai jopa koko laitteisto joudutaan rakentamaan ATEX-direktiivin mukaisesti.

Myös biosidisten lisäaineiden ja väriaineiden käyttö yhdessä varsinaisen kemikaalin kanssa voi nostaa huomattavasti investointikustannuksia verrattuna ei-biosidiin aineisiin tai väriaineettomiin vaihtoehtoihin. Pigmentit ja muut lisäaineet vaativat yleensä lisää varastosäiliöitä ja sekoitusjärjestelmiä. Myös laitteiston puhdistusmahdollisuuden on varauduttava.

Syövyttävät, polymeroituvat, jähmettyvät tai sakkautuvat kyllästysaineet, jollaisia ovat esim. vesilasi ja hartsit, aiheuttavat ongelmia putkistoissa, pumpuissa ja venttiileissä, jotka voivat tukkeutua tai vioittua. Ongelmat voivat olla niin suuria, että siirtopumpuista on luovuttava ja käytettävä joko paineilmaa tai -tyyppä kemikaalien siirrossa. Jähmettyviä aineita käytettäessä putkistot on eristettävä ja jopa niiden lämmitykseen on varauduttava.

3.3.2 Käytettävät prosessit

3.3.2.1 Bethell- ja Lowry-prosessit

Bethell-prosessia käytetään yleensä vesiliukoisilla kyllästeillä, jolloin kemikaalia voidaan liuottaa veteen haluttu määrä. Kokemuksesta tiedetään, että pohjoismainen männyn pintapuu imee käyttöliuosta 400–600 litraa / kuutio. Mitä kuivempaa puu on, sitä enemmän se imee. Puuhun imeytyvä kemikaalin määrä voidaan säätää liuosväkevyyden avulla kohtuullisen tarkasti. Bethell-prosessissa imetään aluksi alkutyhjö kyllästys sylinteriin, jolloin myös puun sisälle muodostuu alipaine. Tämän jälkeen avataan venttiilit käyttöliuossäiliöön, jolloin alipaineen vaikutuksesta kyllästeliuos siirtyy käyttöliuossäiliöstä kyllästys sylinteriin. Tämän jälkeen muodostetaan kyllästys sylinteriin yleensä noin 12 baarin paine joko paineilamalla tai neste-painepumpulla. Paineajan päättymisen jälkeen liuos siirretään käyttöliuossäiliöön takaisin joko painovoiman, paineilman tai siirtopumpun avulla. Lopuksi kyllästys sylinteriin imetään mahdollisimman voimakas lopputyhjö, jonka tarkoituksena on poistaa kaikki puusta mahdollisesti ulostihkuva kylläste. Näin estetään valumat kuivauksessa, varastoinnissa, kuljetuksessa ja loppukäytössä. Lopputyhjön kuivausvaikutusta voidaan edistää lämmittämällä sylinteriä esim. höyryllä tai käyttämällä normaalia lämpimämpää kyllästysliuosta. Joillakin aineilla (esim. CCA:lla) tämä johtaa kuitenkin aineen sakkautumiseen. Mitä korkeampi lämpöti-

la lopputyhjössä on, sitä kuivempi tuote saadaan aikaan. Rimoitus vaikuttaa tietysti lopputulokseen paljon. Korkea lopputyhjön lämpötila tarkoittaa toisaalta myös sitä, että alipainepumpun tiivisteveesisäiliö tai -syöttö täytyy mitoittaa suuremmaksi (ks. liite 2). Jos alipainepumpun lämpötila nousee liian korkeaksi, sen toiminta heikkenee.

Lowry-prosessi poikkeaa Bethell-prosessista siten, että alkutyhjööä ei imetä vaan käyttöliuos siirretään siirtopumpulla normaalipaineessa kyllästyssylinteriin. Koska puun sisälle jää tällöin ilmaa, kyllästettä imeytyy puuhun noin puolet vähemmän kuin Bethell-prosessissa eli 200–300 litraa/kuutio. Kyllästämillä, jolla voidaan toteuttaa molemmat prosessit, voidaan siis saada kaksi erilaista pitoisuutta puuhun samalla käyttöliuosväkevyydellä. Useimmiten tätä ei kuitenkaan voida hyödyntää optimaalisesti, koska pitoisuusvaatimukset eri kemikaaleilla ja käyttötarkoituksissa vaihtelevat paljon.

Keskeisiä mitoitusasioita Bethell- ja Lowry-prosesseissa ovat käyttöliuossäiliön koko ja sijoituspaikka verrattuna sylinterin kokoon ja puumäärään, alipaine- ja siirtopumpun koko, paineen tuoton mitoitus sekä tyhjennystavan valinta ja mitoitus. Mikäli paineilmaa käytetään nestepaineen korotukseen, tulee huomioida, että kylästyssylinterissä nestepinta laskee voimakkaasti, kun liuosta imeytyy puuhun painevaiheen aikana. Tällöin voi käydä niin, että osa ylimmäisistä puista jää kuiviksi eikä kyllästy kunnolla. Tämä mahdollisuus tulee huomioida sylinterin mitoituksessa.

Koska Bethell-prosessia käytetään yleensä vesipohjaisilla aineilla, ei laitteistolle aseteta ATEX-vaatimuksia. Öljyjä, vahoja ja muita veteen liukenemattomia kyllästeitä voidaan toki käyttää kyllästettäessä puuta Bethell-prosessin mukaisesti, mutta yleensä se johtaa liian suureen pitoisuuteen puussa (400–600 kg/m³), jolloin lopputuotteesta tulee kallis, painava ja jopa joiltain ominaisuuksiltaan, esim. tahraavuudeltaan, huonompi kuin pienemmillä pitoisuuksilla. Toisaalta nämä ongelmat poistuvat, jos käytetään öljy-vesiemulsioita tai haihtuvia liuottimia kylläste-seoksessa (LOSP = Light Organic Solvent-borne Preservatives). Nämä menetelmät taas vaativat Bethell-prosessin jälkeen toteutettavan jälkikäsitteilyn höyryllä tai lämmöllä tai molemmilla. Tässä jälkikäsitelyssä vesi tai liuotin poistetaan hallitusti puusta (ks. luku 3.3.2.5 HT-prosessi ja kyllästetyn puun jälkikäsitely).

3.3.2.2 LOSP-prosessit

LOSP on lyhenne sanoista Light Organic Solvent-borne Preservatives. LOSP tarkoittaa kyllästekemikaaleja ja -menetelmiä, jotka viedään puuhun Bethell- tai Lowry-prosessilla kevyiden, orgaanisten liuottimien avulla. Käyttöliuos ei siis sisällä vettä. Kyllästyksen jälkeen nämä liuottimet haihdutetaan puusta hallitusti kyllästyssylinterissä ja kerätään talteen. Vaarattomien liuottimien voidaan jopa antaa haihtua kesäaikana ulkoilmavarastossa, muuten tuuletetussa sisävarastossa tai kuivaamossa. Nykyisin on suositeltavaa kerätä liuotin mahdollisimman hyvin tal-

teen heti kyllästyksen jälkeen joko kyllästyssylinterissä tai erillisessä jälkikäsitteily-sylinterissä lämmityksen ja jäähdytettävän alipainejärjestelmän avulla. Liuottimena käytetään yleensä alkoholia, tärpättiä tai vastaavaa liuotinta.

LOSP-prosesseissa kyllästäminen on yleensä samankaltaista kuin Bethell- tai Lowry-prosesseissa, mutta painevaiheen jälkeen toteuttavassa jälkikäsitteilyssä alipaineen ja lämmön avulla haihdutetaan puusta pois liuotinta. Puusta haihtuva liuotin kerätään ennen alipainepumppua olevaan, jäähdytettävään keräyssäiliöön. Alipaineen, kyllästyssylinterissä olevan puun lämpötilan säädön ja keruusäiliön jäähdytyksen mitoitus täytyy aloittaa käytettävän liuottimen kiehumispisteen määrittämisellä eri paineissa. Tärkeää on myös tietää, missä lämpötilassa liuotin saadaan tiivistymään keruusäiliöön. Lisäksi tulee huomioida, että liuottimen haihtuminen on hidasta paketin sisäosissa, etenkin umpipaketista. Toisaalta rimapakettien käsittely pienentää kyllästyserän kokoa, mutta nopeuttaa prosessia, kun liuottimen haihtuminen on nopeampaa.

Koska LOSP-prosesseissa käytettävät liuottimet ovat palavia ja räjähdysherkkiä kemikaaleja ja hengitettynä jopa terveydelle vaarallisia, laitteisto täytyy yleensä suunnitella ATEX-vaatimusten mukaan. Ongelmia saattaa syntyä myös kyllästeen sakkautumisesta tai jähmettymisestä, jos liuottimen vaikutus pienenee esim. kemikaalien suhteiden muutosten vuoksi.

3.3.2.3 Boulton- ja OHT-prosessit

Boulton-prosessissa tuore puu laitetaan kyllästyssylinteriin, joka täytetään kuumalla kyllästysaineella, joka käytännössä aina on jokin öljy. Tavoitteena on lämmittää puita kuumalla öljyllä ja poistaa tämän jälkeen puusta ylimääräistä kosteutta alipaineen avulla ennen varsinaista kyllästystä. Lämmitysvaihe kestää dimensiosta ja tavoitelämpötilasta riippuen 1–24 tuntia. Kreosootilla tyypillinen lämpötila on 80–90 °C. Lämmitysvaiheen jälkeen sylinteriin imetään alipaine, jolloin puusta poistuu vettä tehokkaasti kyllästysaineen joukkoon. Jos järjestelmä on riittävän tehokas eli lämpötila pysyy veden kiehumispisteen yläpuolella, vesi höyrystyy eikä jää kyllästysaineeseen. Höyrystyvä vesi tulee tällöin lauhduttaa ennen alipainepumppua ja kerätä erilliseen säiliöön. Puut ovat tämän jälkeen jo kokonaan tai osittain kyllästyneet. Hyvän ja luotettavan kyllästystuloksen saavuttamiseksi kannattaa kuitenkin tehdä vielä varsinainen kyllästys Boulton-käsittelylle puulle. Alle 100 °C:n lämpötiloissa ATEX-vaaran aiheuttavat vain mahdollisista vuodoista syntyvät öljyhöyryt.

Oil Heat Treatment (OHT) -käsittelyssä eli öljylämpökäsittelyssä tavoitteena on lämpökäsitellä puu kuumana, yli 140-asteisen öljyn avulla. Puu voi olla tuoretta, puolikuivaa (kosteus noin 28 %) tai kuivaa. Mitä enemmän puussa on vettä ennen käsittelyä, sitä tehokkaampi lämmitysjärjestelmä ja poistuvan veden käsittelyjärjestelmä täytyy rakentaa. Mikäli puu on tuoretta, OHT-prosessin alussa käytetään yleensä Boulton-prosessia poistamaan puusta ylimääräistä vettä ja lämmittämään

puita. Puiden lämmitys on tärkeää, koska ilman lämmitystä puuhun voi syntyä halkeamia, koska lämpötilaero puun ja kuuman öljyn välillä voi olla jopa 200 °C. Näin suuri lämpötilaero aiheuttaa jännityksiä nopeasti lämpenevän puun pintaosan ja kylmän sisäosan välille, jolloin halkeiluriski kasvaa. Puun laadun kannalta tärkein vaihe OHT-prosessissa on kuitenkin jäähdytys, sillä liian nopea ja halitsematon jäähdytys johtaa halkeiluun. Suurissa yksiköissä paketin pinta- ja sisäosien lämpötilaerot ovat suurempia, jolloin jäähdytysaikojen tulee olla pidempiä. Jäähtymistä voidaan tehostaa esim. kierrättämällä sylinterin vaipassa tai sisälle asennetussa kierukassa kylmää vettä tai jopa sumuttamalla kylmää vettä suoraan sylinteriin.

OHT-prosessissa on tärkeää, että sylinterin ja puun sisäpaine on koko ajan veden kiehumispainetta korkeammalla. Mikäli puun sisäpaine laskee nopeasti ja puussa oleva vesi höyrystyy, höyrystyvä vesi voi jopa puusta ulos pyrkiessään rikkoa puun solukon. Erityisesti tämä pätee yli sadan asteen lämpötiloissa paineesta riippumatta. Mikäli käsitellään lähes täysin kuivaa puuta, halkeilun riski pienenee.

3.3.2.4 Rүping-prosessi

Rүping-prosessia käytetään yleensä öljykylästeillä. Kokemuksesta tiedetään, että pohjoismainen männyn pintapuu imee käyttöliuosta 400–600 litraa / kuutio; mitä kuivempaa puu on, sitä enemmän se imee. Koska öljyt ovat kalliita ja niiden tehokkuus on hyvä, pitoisuudeksi riittää yleensä noin 100 litraa / kuutio. Jäämää säädellään erityisesti alkupaineen avulla. Kun sylinteri paineistetaan, myös puun sisälle muodostuu painetta. Kun painevaiheessa öljy tunkeutuu puuhun, puristuu ilma edelleen, ja paine puun sisällä kasvaa. Kun painevaihe päättyy ja öljy siirretään pois kyllästys sylinteristä, puun sisällä oleva paine purkautuu ja työntää öljyä pois puusta. Mitä suurempi alkupaine on, sitä enemmän öljyä poistuu ja sitä vähemmän öljyä jää lopulta puuhun.

Rүping-prosessissa kyllästys sylinteriin muodostetaan siis aluksi alkuilmanpaine, jolloin myös puun sisälle muodostuu ylipaine. Tyypillinen alkupaine on 4 baaria, jolloin öljymäärä puussa prosessin jälkeen on noin 100 kg/m³. Tämän jälkeen avataan venttiilit lämmitys sylinteriin, joka etenkin vanhoissa laitteissa sijaitsee lämmitys sylinterin yläpuolella. Tällöin öljy siirtyy painovoimalla yläpuolella olevasta lämmitys sylinteristä kyllästys sylinteriin. Nykyaikaisemmissa laitteistoissa käytetään ATEX-luokiteltuja siirtopumppuja kuuman öljyn siirtämiseen. Tämän jälkeen muodostetaan kyllästys sylinteriin yleensä noin 12 baarin paine joko paineilmalla tai ATEX-luokitellulla nestepainepumpulla. Paineajan päättymisen jälkeen liuos siirretään käyttöliuossäiliöön takaisin joko paineilman tai siirtopumpun avulla. Paineilmalla ei kuitenkaan enää nykyisin pääsääntöisesti saa siirtää palavia ja räjähdysherkkiä nesteitä. Lopuksi kyllästys sylinteriin imetään mahdollisimman voimakas lopputyhjö, jonka tarkoituksena on poistaa kaikki puusta mahdollisesti ulostihkuva kyläste, jotta estettäisiin valumat kuivauksessa, varastoinnissa, kuljetuksessa ja loppukäytössä. Lopputyhjön kuivausvaikutusta voidaan edistää

lämmittämällä sylinteriä esim. höyryllä. Mitä korkeampi lämpötila lopputyhjössä on, sitä kuivempi tuote saadaan aikaan. Rimoitus vaikuttaa tietysti lopputulokseen paljon. Korkea lopputyhjön lämpötila tarkoittaa toisaalta myös sitä, että alipaine-pumpun tiivistevesisäiliö tai -syöttö täytyy mitoittaa suuremmaksi. Jos alipaine-pumpun lämpötila nousee liian korkeaksi, sen toiminta heikkenee.

3.3.2.5 HT-prosessi ja kyllästetyn puun jälkikäsitteily

Paineastiassa tehtävän lämpökäsittelyn (Heat Treatment = HT) tavoitteena on lämpökäsitellä normaali tai kyllästetty puu yli 140 asteessa puun ja mahdollisen kemikaalin reaktioiden edistämiseksi. Mitä enemmän puussa on vettä ennen käsittelyä, sitä tehokkaampi lämmitysjärjestelmä ja poistuvan veden käsittelyjärjestelmä täytyy rakentaa. Poistuvan veden mukana on myös aina puun uuteaineita. Jos käsiteltävässä puussa on kemikaalia, sitä myös poistuu puusta lämpökäsittelyn aikana, ja siksi on järjestettävä poistuville kemikaaleille asianmukainen käsittely. Samoin kuin OHT-prosessissa myös HT-prosessissa puiden esilämmitys on tärkeää, koska ilman lämmitystä puuhun voi syntyä halkeamia. Puun laadun kannalta tärkein vaihe HT-prosessissa on kuitenkin jäähdytys, sillä liian nopea ja hallitsematon jäähdytys johtaa halkeiluun. Suurissa yksiköissä paketin pinta- ja sisäosien lämpötilaerot ovat suurempia, jolloin jäähdytysaikojen tulee olla pidempiä. Jäähtymistä voidaan tehostaa esim. kierrättämällä sylinterin vaipassa tai sisällä kylmää vettä tai jopa sumuttamalla kylmää vettä suoraan sylinteriin.

Myös HT-prosessissa on tärkeää, että sylinterin ja puun sisäpaine on koko ajan veden kiehumispainetta korkeammalla. Mikäli puun sisäpaine laskee nopeasti ja puussa oleva vesi höyrystyy, höyrystyvä vesi voi puusta ulos pyrkiessään jopa rikkoa puun solukon. Erityisesti tämä pätee yli sadan asteen lämpötiloissa paineesta riippumatta. Mikäli käsitellään lähes absoluuttisen kuivaa puuta, halkeilun riski pienenee.

Sylinteri voidaan lämmittää kuumavesipattereilla, thermoöljypattereilla tai -kierukalla tai höyryllä. Yleensä suojakaasuna ja lämmön välittäjänä käytetään sylinterin sisällä höyryä. Toimintaperiaate on yksinkertainen: Sylinterin pohjalla on lämmityskierukka tai -patteri, jonka päälle lasketaan vettä. Lämmityselementti höyrystää veden, joka taas tiivistyy kylmän puun pinnalle luovuttaen sille lämpönsä. Tiivistynyt vesi valuu alas puhdistuen samalla puun pintaa mahdollisesta kemikaalista ja lopulta höyrystyy uudestaan kuumen lämmityselementin päällä. Mikäli käytetty kemikaali polymeroituu lämmön vaikutuksesta, kemikaalia kerääntyy vain vähäisiä määriä sylinterin pohjalle. Syntyneen sakan keruu on kuitenkin muistettava järjestää asianmukaisesti. Samaa lämmityselementtiä on mahdollista käyttää myös jäähdytykseen kierrättämällä siinä prosessilämpötilaa kylmempää vettä tai thermoöljyä.

3.4. Kyllästämön prosessit, tekniset vaatimukset ja mitoitus esimerkkitapauksissa

3.4.1 Vesilasi ja käsittelyprosessi vesilasilla

Natriumsilikaatit (vesilasi) koostuvat piidioksidista ja natriumoksidista. Näiden paino- ja moolisuhdetta voidaan vaihdella tarpeen mukaan sovellutuksesta riippuen. Ne ovat palamattomia, hajuttomia, ympäristölle vaarattomia, eikä niillä ole terveydelle haitallisia ominaisuuksia korkeaa pH:ta lukuun ottamatta. Natriumsilikaattien vesiliuosten pH riippuu piidioksidin ja natriumoksidin moolisuhteesta liuoksessa sekä liuoksen konsentraatiosta. pH nousee konsentraation kasvaessa ja toisaalta moolisuhteen laskiessa. 3,3-moolisuhteisen natriumsilikaattiliuoksen pH on noin 11,2 ja 2,5-moolisuhteisen vesilasin puolestaan 12,6.

Muita vesilasin käyttäytymiseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat kuiva-ainepitoisuus, tiheys ja viskositeetti. Viskositeetti riippuu moolisuhteesta, kuiva-ainepitoisuudesta ja lämpötilasta. Liuoksen kuiva-ainepitoisuutta voidaan nostaa moolisuhdetta laskemalla. 3,3- ja 2,5-moolisuhteisten liuosten kuiva-aineet ovat vastavasti 36 % ja 43 %. Vesilasiliuokset ovat stabiileja alkaalisissa oloissa. Vesilasin polymeroituminen alkaa pH:n laskiessa kymmeneen.

Vesilasin käyttöä puun kyllästysaineena on tutkittu paljon. Kyllästyksen jälkeen vesilasi kovettuu puun huokosissa veden haihtumisen seurauksena ja polymeroituu reagoidessaan puusolukossa olevien happamien karboksyyliiryhmien kanssa. Polymeroitumista voidaan edistää termisellä käsittelyllä, metallisuoloilla ja erilaisilla hapoilla. Vesilasin luontainen liukoisuus veteen pienenee moolisuhteen noustessa. Myös puussa olevan ligniinin liukoisuus vähenee natriumsilikaatin moolisuhteen noustessa ja pH:n laskiessa.

Vesilasin käytöllä puun kyllästyksessä on todettu saavutettavan monia etuja. Palamattomana aineena vesilasi suojaa selluloosakuidut mekaanisesti ja estää palamisreaktion hapen kanssa. Lisäksi vesilasin on todettu lisäävän puun kovuutta, vähentävän kosteuden imeytymistä ja parantavan dimensiostabiilisuutta. Vesilasi suojaa puuta myös pieneliöiltä ja vähentää homehtumisriskiä ulkokäytössä.

Vesilasikyllästys tehdään yleensä normaalilla Bethell-prosessilla, jossa lämpötila pidetään yli 20 asteen (ks. luku 3.3.2.1). Mitä korkeampi lämpötila on, sitä puhtaampi lopputuote syntyy. Korkeita, yli sadan asteen lämpötiloja vesipohjaisilla kyllästeillä ei voida kuitenkaan käyttää veden höyrystymisen vuoksi. Alipainevaiheissa veden höyrystymisongelmia esiintyy jo paljon alhaisemmissakin lämpötiloissa. Vesilasiprosessissa ei synny kuitenkaan räjähdysvaarallisia ilma-kaasuseoksia, eli laitteistossa ei tarvitse varautua ATEX-direktiivin mukaisiin toimenpiteisiin. Kuivuessaan vesilasi sakkautuu ja kovettuu putkistoihin, venttiileihin, pumppuihin ja säiliöiden pohjalle. Se myös tukkii antureita. Tämän vuoksi vesi-

lasia kannattaa siirtää alipaineen ja paineilman avulla. Myös paineistus kannattaa toteuttaa paineilmalla.

Kyllästyksen jälkeen tuotteet on kuivattava ja lämpökäsiteltävä. Lämpökäsittely ja osin myös siihen liittyvä kuivaus voidaan tehdä kyllystysylinterissä (ks. luku 3.3.2.5). Koska vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa lämpökäsittely on useita, suunnittelussa on arvioitavana useiden erilaisten logististen ketjujen edut ja haitat:

1. Kyllästys tehdään kovana pakettina (tarvittaessa syrjällään) ja lämpökäsitellään samassa kyllystysylinterissä. Tässä vaihtoehdossa investointitarve on pienin, ja kyllystyslaitteisto soveltuu tällöin laajalle valikoimalle kemikaaleja ja prosesseja. Toisaalta kapasiteetin riittävyys voi aiheuttaa ongelmia.

2. Kyllästys tehdään kovana pakettina (tarvittaessa syrjällään) ja lämpökäsitellään erillisessä jälkikäsitteilyylinterissä. Tämä tuo enemmän joustavuutta ja kapasiteettia toimintaan verrattuna ensimmäiseen vaihtoehtoon. Toisaalta investointi- ja tilatarve kasvaa. Erillinen jälkikäsitteily sylinteri voidaan tosin rakentaa tehokkaaksi yksiköksi, jossa kuivaus ja lämpökäsittely voidaan toteuttaa jopa alle vuorokaudessa, jos jäähdytys on järjestetty. Tämä lisää kuitenkin investointikustannuksia saman verran kuin normaalin lämpökäsittely-yksikön rakentaminen. Mikäli tuotteesta irtoaa lämpökäsittelyssä haitallisia yhdisteitä, niiden talteenotto on teknisesti helpompaa jälkikäsitteilyylineristä kuin normaalista lämpökäsittelylaitteistosta.

3. Kyllästys tehdään kovana pakettina (tarvittaessa syrjällään) ja lämpökäsitellään normaalissa lämpökäsittelyuunissa rimapakettina. Tässä vaihtoehdossa tarvitaan paketointiyksikkö hoitamaan paketointia. Toisaalta kuivaus ja lämpökäsittely ovat huomattavasti nopeampia perinteisessä lämpökäsittelylaitteistossa kuin kyllystysylinterissä (vaihtoehto 1).

4. Kyllästys tehdään rimapakettina ja lämpökäsitellään normaalissa lämpökäsittelyuunissa rimapakettina. Tässä vaihtoehdossa sekä kyllystysylinterin läpimittaa että pituutta voidaan joutua kasvattamaan huomattavasti normaalia suuremmiksi, koska rimapaketin kyllystys syö huomattavasti kyllystyskapasiteettia. Normaalit kuivausrimapaketit ovat myös niin suuria, että ne eivät sovi halkaisijaltaan normaaliin kyllystysylinteriin. Toisaalta näin vältytään edestakaisin paketoinnilta ennen höyläystä tai muuta jatkojalostusta.

Liitteissä 1, 2 ja 3 on esitetty esimerkkilaskelmia kyllystämön mitoitukseen vaikuttavista tekijöistä.

3.4.2. Raakamäntyöljy, sen jalosteet ja käsittelylaitteisto mäntyöljyllä

Selluteollisuuden sivutuotteena saatava raakamäntyöljy ja siitä muodostetut jalosteet ovat ympäristölle vaarattomia ja puun suojaamiseen hyvin soveltuvia aineita. Myös eräiden muiden kasviöljyjen käyttö on mahdollista, mutta raakamäntyöljyn

on todettu olevan tarkoitukseen sopivinta, koska sitä on hyvin saatavilla ja se on suhteellisen edullista. Lisäksi viime aikoina tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet, että sen sisältämien hartsi- ja rasvahappojen ansiosta raakamäntyöljyllä voidaan suojata puuta tehokkaasti lahottajasiementen ja muiden mikrobien puuta tuhoavilta vaikutuksilta, kun puun sisäosiin saadaan riittävä määrä raakamäntyöljyä. Esim. suomalaisella männyllä suojausvaikutusta on havaittu yli 100 kg:n jäämillä puukuutiota kohti. Tämä määrä vastaa noin 20 % männyn kuivapainosta. Raakamäntyöljyn määrän pitää kuitenkin olla noin kaksinkertainen verrattuna esim. kreosoottiöljyyn, jotta riittävä suojausvaikutus lahoamista vastaan saavutetaan. NTR-A-luokan jäämävaatimus kreosoottiöljylle on ollut vuoteen 2005 asti 135 kg kyllästettyä pintapuukuutiota kohti.

Koska kasviöljyjä sisältäviä puunsuoja-aineita tulee olla puussa suuria määriä, on ongelma muodostunut se, että puunsuoja-aine pyrkii tihkumaan puun pinnalle painekyllästyksen jälkeen. Tämän ongelman aiheuttaa erityisesti puunsuoja-aineiden suotautuminen, joka tarkoittaa, että puun pintakerrokseen jää huomattavasti enemmän puunsuoja-ainetta kuin syvemmälle puuhun. Tämä ilmiö on korostunut erityisesti kyllästettäessä kostea puuta tai muusta syystä läpäisevyydeltään (permeabiliteetti) huonoa puuta. Mitä huonompaa puun läpäisevyys on, sitä suurempaa on suotautuminen, ja sitä herkemmin puunsuoja-aine tihkuu puun pinnalle. Suotautuminen voi olla hyvin voimakasta, eli puun pintakerroksessa voi olla moninkertainen määrä puunsuoja-ainetta verrattuna puun sisäosiin. Tihkumista esiintyy myös puun käytön aikana, erityisesti silloin, kun puun pinta lämpenee esim. auringon lämmön vaikutuksesta. Pinnalle tihkuva puunsuoja-aine tekee puun ulkopinnat tahmaisiksi. Tahmainen puun pinta on sellaisenaan epämiellyttävä ja helposti likaantuva, eikä sen pintakäsittely esim. maalaamalla onnistu.

Suomalaisessa patentissa FI 114295 B ongelma on ratkaistu kuivaamalla puu alle 10 % kosteuteen ennen kasviöljypitoisen puunsuoja-aineen imeyttämistä ja kuumentamalla puu käsittelyn lopuksi yli 150 °C:n lämpötilaan puunsuoja-aineen sisältämien öljyjen polymeroimiseksi ja kuivaamiseksi. Öljypitoisen puunsuoja-aineen määrä näin käsitellyssä puussa on kuitenkin pieni (vain n. 30 litraa käsiteltyä puukuutiota kohti), koska tässä menetelmässä puuta ei painekylläestetä, vaan puunsuoja-aine vain imeytetään puuhun. On siis selvää, että pienestä puunsuoja-aineepitoisuudesta johtuen tihkumisongelmaa ei ole juurikaan esiintynyt imeyttämällä suojakäsitellyn puun tapauksessa. Käytännössä on kuitenkin havaittu, että esim. männyn tapauksessa öljypitoisen puunsuoja-aineen tihkuminen lisääntyy huomattavasti, kun puunsuoja-aineen keskimääräinen pitoisuus puussa kasvaa yli 100 kg:n kyllästettyä puukuutiota kohti. Tämän verran puunsuoja-ainetta sisältävän männyn pintakerroksessa voi olla puunsuoja-ainetta jopa yli 200 kg/m³. Ongelmaa on yritetty ratkaista polymeroimalla puunsuoja-ainetta, kuivaamalla korkeissa, yli 130 °C:n lämpötiloissa sekä lisäämällä katalyytteja ja kuivikeaineita puunsuoja-aineeseen. Näillä tihkuminen on saatu vähenemään, koska jähmeämpi puunsuoja-aine tukkii puun pintakerrosten solurakenteen niin, että kuumentessaan laajeneva puunsuoja-aine ei pääse helposti poistumaan puun sisältä. Menetelmällä ei ole kuitenkaan pystytty täysin estämään puunsuoja-aineen tihkumista ja

siitä aiheutuvia haittoja. Lisäksi menetelmän käyttö haittaa kyllästysprosessia, koska se vaikeuttaa puunsuoja-aineen tunkeutumista puun sisälle, jolloin puunsuoja-aine ei jakaudu tasaisesti puusolukkuun. Todennäköisesti polymerointi myös heikentää suoja-aineen kykyä torjua homehtumista ja lahoamista, koska tällöin öljyn biosidiset komponentit eivät enää kykene vaikuttamaan homehtumista ja lahoamista edistäviin eliöihin. Lisäksi esim. kyllästettyjen puupylväiden tapauksessa kuivikkeet ja öljyn polymerointi estävät öljypitoisen puunsuoja-aineen luonnollista valumista pylvään juurelle ja maanrajaan, jossa lahoamisen riski on suurin.

Mäntyöljyllä kyllästetty puu on mahdollista saada pintakuivaksi myös prosessiteknisin menetelmin: Ennen kyllästysvaiheen aloittamista puuta lämmitetään niin, että ainakin osa sen sisäosista lämpenee vähintään 50 °C:n lämpötilaan ja että painekyllästyksen jälkeen puun puuta ympäröivään tilaan muodostetaan alipaine. Samanaikaisesti puun pintakerroksia kuumennetaan veden kiehumispistettä korkeampaan lämpötilaan puunsuoja-aineen poistamiseksi puun pintakerroksista. Tällaisella menetelmällä painekyllästetyn puun pintakerrokseen muodostuu laajenemistilaa niin, että puun sisällä oleva puunsuoja-aine voi laajentua ilman, että se alkaa tihkua puun pinnalle. Näin ollen tällä tavoin saadaan kasviöljyä sisältävällä puunsuoja-aineella kyllästettyyn puuhun kuivana pysyvä pinta ilman polymerointia tai kuivikkeiden käyttöä. Menetelmällä painekyllästetyn puun sisältämä keskimääräinen puunsuoja-aineen määrä voi olla jopa 300 kg/m³, ja silti puun pinta pysyy kuivana ja tahraamattomana.

Puun pintakerroksen öljymäärän säätämiseen on monia erilaisia menetelmiä. Puun sisäosien vesi saadaan höyrystymään voimakkaasti, kun puuta lämmitetään vähintään 50 °C:n lämpötilaan ennen kyllästysvaiheen aloittamista. Useat puulajit voidaan lämmittää jopa kiehumispistettä korkeampaan lämpötilaan. Tällöin puun solujen paine nousee nopeasti aiheuttaen repeytymiä puun soluseiniin. Jos kuumentamisen jälkeen ympäröivään tilaan muodostetaan vielä alipaine, saadaan soluseinämien repeytymistä edelleen tehostettua. Soluseinämien repeily lisää puun läpäisevyyttä ja siten kyllästettävyyttä erityisesti silloin, kun puu on kosteaa tai muuten huonosti kyllästävää, kuten esim. männyn sydänpuu. Kun painekyllästyksen jälkeen puuta ympäröivään tilaan muodostetaan alipaine ja lämpötila nostetaan puun pintakerroksessa mieluiten painekyllästysvaiheen öljyn lämpötilan tasolle tai ainakin yli veden kiehumispisteen, saadaan puunsuoja-ainetta poistumaan puun pintakerroksista esim. alipaineisella tai kylläisellä höyryllä. Näin puun pintakerrokseen muodostuu edellä kuvattua laajenemistilaa. Puunsuoja-aineen poistamiseen puun pintakerroksista voidaan käyttää myös tulistettua höyryä. Tällöin puusta poistuva vesi nostaa puunsuoja-ainetta puun pinnalle, josta puunsuoja-aine on myöhemmin helppo poistaa alipaineisella tai kylläisellä höyryllä. Tämä menetelmä on erityisen sopiva kosteana kyllästetylle puulle, sillä samalla puusta saadaan poistettua siinä olevaa kosteutta.

Kyllästyskammioon voidaan puhaltaa ennen kyllästysvaiheen aloittamista yli 50 °C:n lämpötilaan lämmitettyä paineilmaa niin, että kyllästyskammion paine nousee normaalipaineen yläpuolelle. Tällä tavoin kyllästyskammion ilma saadaan

lämmitettyä erittäin nopeasti ja puuta ympäröivän ilman paine nostettua niin, että kuuma ilma pyrkii puun sisälle, jolloin se lämmittää puuta myös sen sisäosista. Kyllästyskammiota voidaan myös lämmittää alipainevaiheen aikana kyllästyskammion sisällä olevilla lämmityslaitteilla. Kyllästyskammion paineen laskeminen alipainevaiheen aikana laskee myös kyllästyskammion lämpötilaa. Tämä kasvattaa puun sisällä olevan puunsuoja-aineen viskositeettiä ja vaikeuttaa siten puunsuoja-aineen poistumista puun pintakerroksista. Lämmittämällä kyllästyskammiota alipainevaiheen aikana sopivalla lämmityslaitteella, esim. kuumavesipatterilla, saadaan vähennettyä jäähtymistä ja tehostettua puunsuoja-aineen poistumista puun pintakerroksista.

Olennaista on kasviöljypitoisen puunsuoja-aineen saaminen puun sisälle siten, että puun pintakerrokseen jää riittävästi laajenemistilaa niin, ettei suoja-aine ala tihkua puun pinnalle heti pesuvaiheen jälkeen eikä myöhemmin puun käytön aikana. Tarvittavan laajenemistilan aikaansaamista puun sisäosissa voidaan edesauttaa seuraavilla tavoilla:

1. Kuivataan puu ennen painekyllästystä riittävän kuivaksi (esim. niin, että puun kosteus on alle 28 %), jolloin pääosin kasviöljyä sisältävän puunsuoja-aineen on helpompi tunkeutua tasaisesti myös syvemmälle puuhun. Mikäli puu on kosteaa, estää puussa oleva vesi öljyn tunkeutumista puuhun. Jos tavoitteena on saada puuhun esim. sata kiloa puunsuoja-ainetta kuutiota kohti, puun pintakerrokseen jää puunsuoja-ainetta enemmän kosteata puuta kyllästettäessä kuin kuivaa puuta kylästettäessä. Kosteuden vaikutusta voidaan kuitenkin eliminoida sopivilla prosessimuutoksilla.

2. Lämmitetään käsiteltävät puut ja puunsuoja-aine mahdollisimman kuumiksi ennen kyllästystä. Puut voidaan lämmittää esim. johtamalla kuuma puunsuoja-aine kyllästystilaan ennen varsinaisen kyllästysvaiheen aloittamista ja palauttamalla lämmityksessä käytetty kyllästysaine tämän jälkeen uudelleen lämmitettäväksi ennen varsinaista kyllästysvaihetta. Puiden ja puunsuoja-aineen lämmittäminen notkistaa puunsuoja-ainetta ja parantaa puun läpäisevyyttä erityisesti, jos puun lämpötila nostetaan yli veden kiehumispisteen. Kun samalla muodostetaan kyllästystilaan alipaine, saavutetaan tilanne, jossa höyrystyvä vesi aiheuttaa repeytyimiä soluseinien rengashuokosten läheisyyteen. Tämä parantaa puun läpäisevyyttä, jolloin suoja-aineen tasainen tunkeutuminen puuhun on mahdollista.

3. Jos käytetään Rüpung-prosessia, lämmitetään käytettävä paineilma kuumaksi.

4. Pyritään kohottamaan lämpötilaa kyllästysprosessin edetessä. Varsinkin alipainevaiheen aikana kyllästys sylinteriä tulisi lämmittää esim. pattereilla, jotta käytettävä puunsuoja-aine ei jäähmettyisi puuhun vaan olisi notkeaa ja poistuisi voimakkaan alipaineen vaikutuksesta.

5. Alipainevaiheen jälkeen käytetään alipaineista, kylläistä tai ylipaineista höyryä tai niiden yhdistelmiä, jolloin saadaan poistettua ja pestyä puun pinnasta kaikki

mahdollisesti ulos tihkuva puunsuoja-aine. Höyryn sijasta voidaan puita lämmit-
tää myös muulla menetelmällä, jolloin pintakerroksessa oleva puunsuoja-aine laa-
jenee ja tihkuu ulos. Tämä tihkuva puunsuoja-aine on kuitenkin paras pestä pois
kyläisellä höyryllä.

6. Kierrätetään kylästyskammiossa kuumaa höyryä tai ilmaa kylästysvaiheen jäl-
keen ennen alipaineen muodostamista kylästyskammioon tai sen aikana. Tämä
tapahtuu esim. asentamalla alipainepumppuun taajuusmuuttaja, jolloin pumpun
avulla voidaan saada aikaiseksi pieni imu kylästyskammion toiseen päähän sa-
malla, kun toisesta päästä syötetään kylästyskammioon venttiilin kautta sopivasti
höyryä, kuumaa paineilmaa tai vain kuumaa ilmaa. Tällöin höyry tai kuuma ilma
virtaa tehokkaasti puiden läpi.

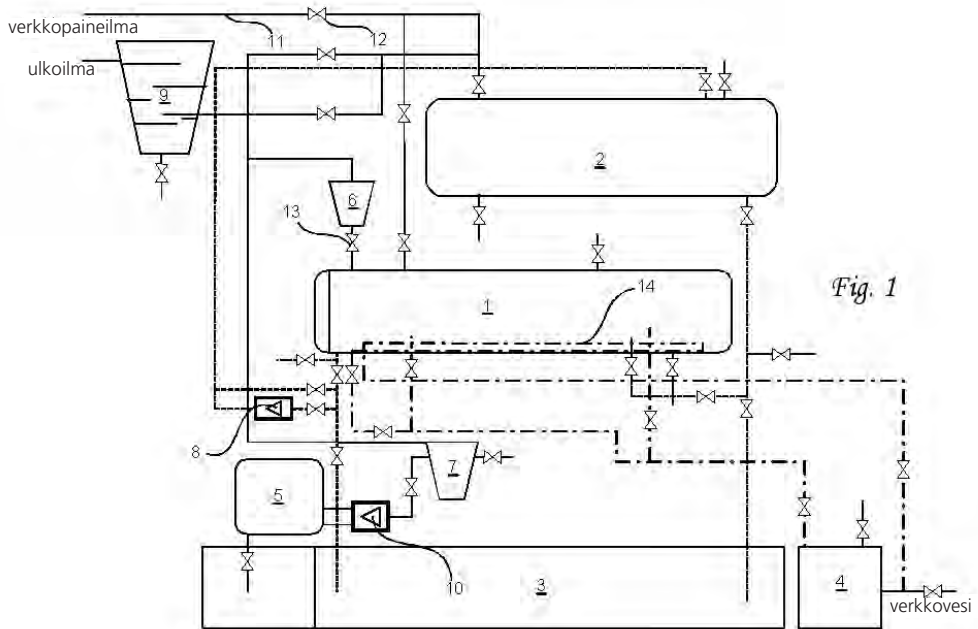
Usein laajenemistilan aikaansaamista vaikeuttaa heikko puun läpäisevyys. Tähän
voivat olla syinä puun kosteus, sydänpuu, sinistymä tai muuten luontaisesti huo-
nosti kylästytävä puulaji, kuten esim. kuusi (*Picea abies*). Kuten edellä on todettu,
heikkoa puun läpäisevyyttä voidaan parantaa höyrystämällä puussa oleva vesi, jol-
loin paine puun soluissa kasvaa niin, että soluseinien rengashuokosten läheisyy-
teen muodostuu repeytymiä. Tämä helpottaa nesteiden liikkumista puun sisällä
niin, että kasviöljyä sisältävä puunsuoja-aine pääsee tunkeutumaan helposti puun
sisäosiin.

Mikäli kylästetty puutuote tihkuu tai on tahraava kylästykseen jälkeen esim. suu-
ren puun kosteuden vuoksi, voidaan ylimääräinen puunsuoja-aine poistaa puun
pintakerroksesta höyryttämällä uudelleen tai toistamalla koko prosessi, jolloin pai-
nevaihe voidaan lyhentää vain muutama minuutti eikä öljynpainetta tarvitse
korottaa. Tavoitteena on, että puu on pinnaltaan kuiva ja tahraamaton.

Edellä esitellyistä käsittelytavoista voidaan valita ne, jotka parhaiten sopivat kysei-
selle puulajille ja puunsuoja-aineen sisältämälle kasviöljytyypille. Huomattakoon
vielä, että kylästykseen voidaan käyttää myös muuta kuin raakamäntyöljyä sisält-
ävää puunsuoja-ainetta tai raakamäntyöljystä voidaan jalostaa sopiva puunsuoja-
aine lisäämällä raakamäntyöljyyn sopivia seosaineita, jotka voivat olla esim. mui-
ta puun suojaamiseen sopivia kasviöljyjä tai muita luonnolle ja ihmisen terveydel-
le vaarattomia seosaineita.

Kuvassa 1 on esitetty periaatekaavio yhdenlaisesta kylästyslaitteistosta, jossa män-
työljykylästys voidaan toteuttaa. Tähän laitteistoon kuuluvat kylästys sylinteri (1),
lämmitys sylinteri (2) ja suoja- ja käyttöliuosallas (3). Laitteistossa ovat myös tar-
vittavat siirtokanavat ja siirtopumppu (8), jotta puunsuoja-ainetta voidaan pum-
pata siirtokanavia myöten käyttöliuosaltaasta (3) lämmitys sylinteriin (2), sieltä
kylästys sylinteriin (1) ja sieltä takaisin suoja- ja käyttöliuosaltaaseen (3). Lisäk-
si laitteistoon kuuluvat mm. ulospuhallussäiliö (9), alipainepumppu (10) tyhjä- ja
jäähdytysvesisäiliöineen (5–7) sekä paineilman syöttökanavisto (11), paineilman
syöttöventtiili (12) ja paineilman poistoventtiili (13), joilla kylästys sylinterin pai-
netta voidaan säätää kylästykseen aikana. Edelleen laitteistoon kuuluvat kylästys-

sylinteriin (1) höyrösyöttökanavilla kytketyt höyrystyslaitteet (4), joilla kyllästys-
 sylinterin sisälle voidaan johtaa vesihöyryä tai kierrättää höyryä kyllästysylinterin
 pohjalla sijaitsevassa lämmityskierukassa (14), ja tarvittava määrä muita kuvassa 1
 esitetyjä, sinänsä tunnettuja puunsuoja-aineen, paineilman ja höyrön siirtokana-
 vissa tarvittavia osia, jotka ovat välttämättömiä laitteiston toiminnan mahdollista-
 miseksi. Mikäli käsiteltävistä puista poistuu vettä öljyn joukkoon, se on mahdol-
 lista haihduttaa pois kuumentamalla öljy-vesiseos lämmityssylinterissä (2) yli ve-
 den kiehumispisteen, ulospuhallussäiliössä (9) tai erillisessä haihduttamossa, jota
 ei ole piirretty kuvaan.



Kuva 1. Prosessikaavio mäntyöljykyllästyslaitteistosta.

4 MODIFIOIDUN PUUN OMINAISUUDET

4.1 Dimensiostabiliteetti

Testin tarkoituksena oli vertailla vesilasilla kyllästetyn ja lievästi lämpökäsitellyn männyn sekä lämpökäsitellyn männyn ja kuusen mittapysyvyyttä kosteusvaihteluissa. Referenssimateriaalina oli käsittelemätön, normaalisti keinokuivattu mänty. Kunkin testimateriaalin dimensiostabiliteetti kosteusvaihteluissa määritettiin standardin EN 1910 mukaan.

4.1.1 Testimateriaali

Testimateriaalina oli lämpökäsiteltyä mäntyä (*Pinus Sylvestris*, luokat Thermo-S ja Thermo-D), lämpökäsiteltyä kuusta (*Picea Abies*, luokka Thermo-D) ja vesilasikyllästettyä mäntyä (*Pinus Sylvestris*, vesilasiliuoksen konsentraatio 11 % ja lämpökäsittely 125 °C:ssa). Referenssimateriaalina oli normaali käsittelemätön mänty (*Pinus Sylvestris*). Kaikki testimateriaali oli höylättyä terassilautaa (SHP), dimensio 26 mm x 92 mm. Lämpökäsitelty puutavara oli pääosin sydänpuuta, vesilasikyllästetty ja käsittelemätön referenssipuutavara pintapuuta. Testikappaleiden pituus oli 250 mm, ja testissä yhtä materiaalityyppiä oli edustamassa 10 testikappaletta. Testimateriaalille käytetään jatkossa merkintöjä:

- Mänty TD: mänty, Thermo-D-luokka
- Mänty TS: mänty, Thermo-S-luokka
- Kuusi TD: kuusi, Thermo-D-luokka
- Mänty VL: mänty, vesilasikyllästys 11-prosenttisellä liuoksella ja lämpökäsittely 125 °C:ssa
- Mänty ref: käsittelemätön mänty

4.1.2 Testimenetelmä

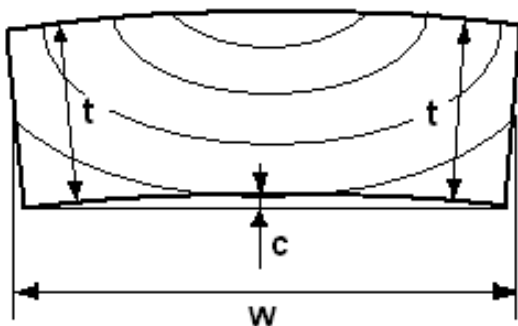
Testimateriaalien dimensiostabiliteetti määritettiin standardin EN 1910 mukaan Kymenlaakson ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratorioissa. Testi alkoi joulukuussa 2009 ja päättyi helmikuussa 2010. Dimensiostabiliteetti määritettiin taasaannuttamalla testikappaleet seuraavissa olosuhteissa:

- RH (65 ± 5) % ja T (20 ± 2) °C
- RH (85 ± 5) % ja T (20 ± 2) °C
- RH (30 ± 5) % ja T (20 ± 2) °C

Testikappaleiden katsottiin tasaantuneen tasapainokosteuteen, kun kappaleen massan muutos oli 24 tunnin aikana enintään 0,1 %. Tasaannutusaika oli kuitenkin enintään 4 viikkoa.

Kukin kappale punnittiin ja niiden dimensiot mitattiin jokaisen tasaannutusjakson jälkeen. Kappaleen pituus mitattiin yhdestä kohtaa testikappaleen keskeltä. Kappaleen leveys (w) mitattiin kuvan 2 mukaisesti kummankin syrjän keskikohdalta. Kappaleen paksuus (t) mitattiin kuvan 2 mukaisesti kummankin syrjän keskikohdalta ja paksuus ilmoitettiin näiden mittausten keskiarvona. Kappaleen kuperuus (c) mitattiin kuvan 2 mukaisesti pintalappeelta kappaleen keskikohdalta. Kuperuus on positiivinen, jos sydänlape on kupera, ja negatiivinen, jos sydänlape on kovera. Kaikki dimensiot ja kuperuus mitattiin 0,01 mm:n tarkkuudella ja kappaleet punnittiin 0,01 g:n tarkkuudella. Lopuksi koekappaleet kuivattiin absoluuttisen kuiviksi, jotta voitiin määrittää kappaleiden kosteus kunkin tasaannutusjakson jälkeen.

Edellä mainittujen testien lisäksi vesilasilla kyllästetyt ja käsittelemättömät mäntykappaleet pantiin kuivauksen jälkeen tasaantumaan 85 % ilman suhteelliseen kosteuteen ja 23 °C:n lämpötilaan, jossa seurattiin kappaleiden kosteuden muutosta.



Kuva 2. Testikappaleen mittauskohdat (w on leveys, t on paksuus, c on kuperuus). Tässä tapauksessa kuperuus on positiivinen.

Koekappaleiden suhteelliset dimensiomuutokset (dcr) laskettiin kaavan 1 mukaan (Standardi EN 1910). Kuperuus ilmoitettiin absoluuttisena kuperuutena (mm) kappaleen koko leveyttä kohti.

$$dcr = 100 \frac{D_h - D_d}{D_i} \% \quad (1),$$

jossa

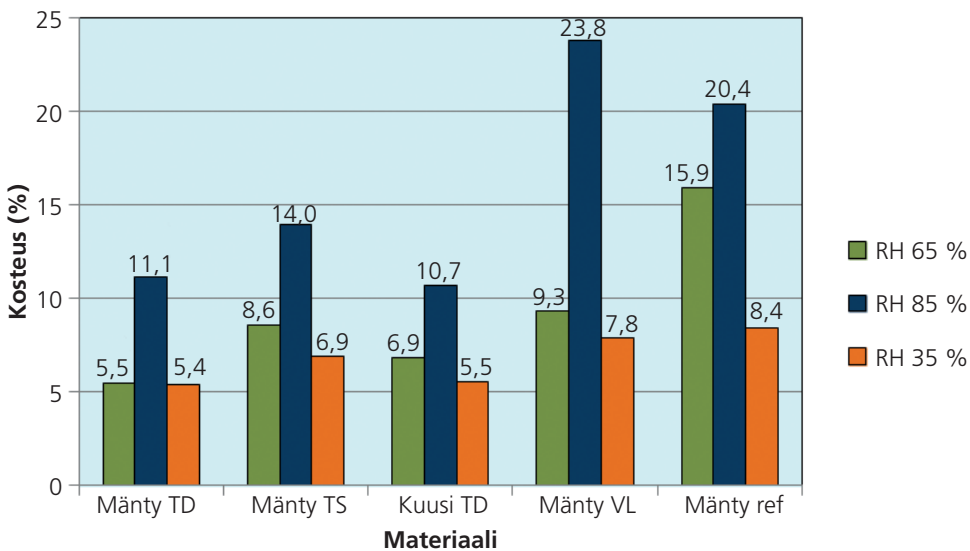
D_i on dimensio tasaannutuksen jälkeen RH 65 %:ssa

D_h on dimensio tasaannutuksen jälkeen RH 85 %:ssa

D_d on dimensio tasaannutuksen jälkeen RH 30 %:ssa

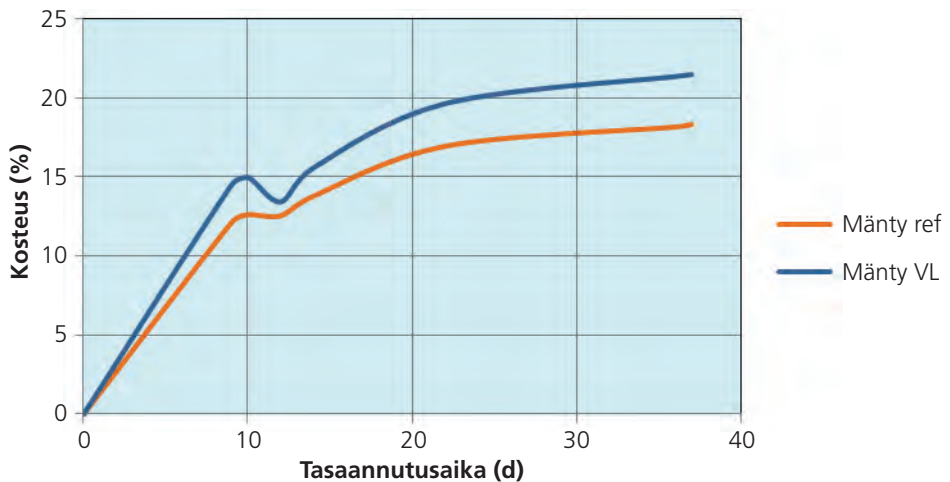
4.1.3 Tulokset

Eri testimateriaalien kosteudet kunkin tasaannusjakson jälkeen on esitetty kuvassa 3. Lämpökäsitellyn puun tasapainokosteudet ovat selvästi pienemmät kuin vesilasikyllästetyn ja käsittelemättömän puun. Thermo-D-käsitellyt materiaalit tasaantuvat alempaan kosteuteen kuin Thermo-S-käsitelty materiaali. Vesilasilla kyllästetty (liuosväkevyys 11 %) ja 125 °C:ssa lämpökäsittely mänty (Mänty VL) näyttää tasaantuvan etenkin kosteassa ilmassa korkeampaan kosteuteen kuin käsittelemättömän mänty (Mänty ref). Vesilasikyllästetyn ja käsittelemättömän männyn suuri kosteusero RH 65 %:ssa johtuu siitä, että vesilasikyllästetty materiaali oli suhteellisen kuivaa, jolloin kappaleen kosteus lisääntyi tasaannutuksessa (adsorptio), kun taas käsittelemättömän referenssimateriaali oli kosteampaa, jolloin kappaleen kosteus aleni tasaannutuksessa (desorptio).



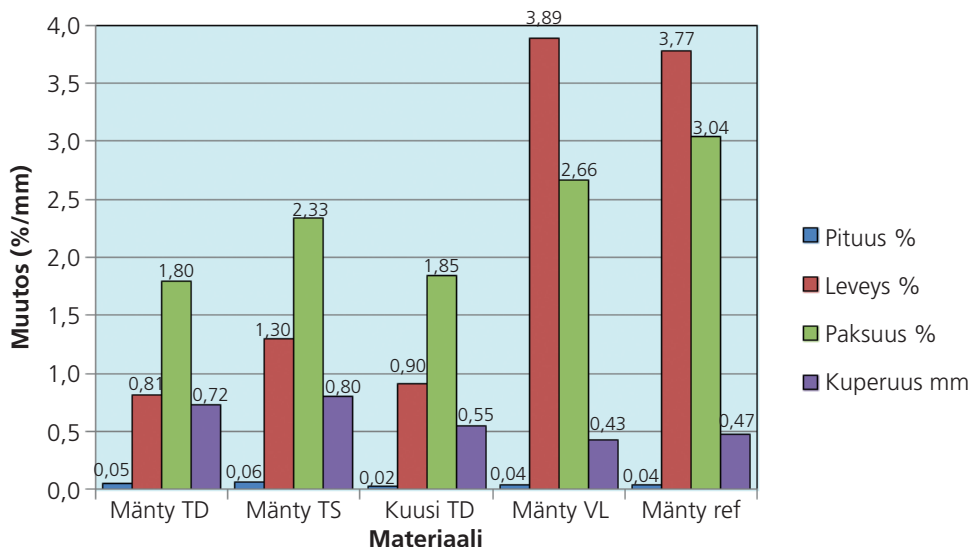
Kuva 3. Eri materiaalien tasapainokosteudet eri tasaannusjaksojen jälkeen.

Kuvassa 4 on esitetty vesilasilla kyllästetyn männyn ja käsittelemättömän männyn kosteuden muutos ajan funktiona, kun absoluuttisen kuivat kappaleet on pantu tasaantumaan RH 85 %:iin 23 °C:n lämpötilaan. Notkahdus kosteuskäyrissä 10 vuorokauden jälkeen johtuu tasaannutushuoneesta olleesta häiriöstä. Vesilasikyllästetyn ja 125 °C:ssa lämpökäsitellyn männyn kosteus nousee nopeammin ja tasaantuu korkeampaan tasapainokosteuteen kuin käsittelemättömän mänty.



Kuva 4. Vesilasilla kyllästetyn (11-prosenttinen liuos) ja 125 °C:ssa lämpökäsitellyn männyn sekä käsittelemättömän männyn kosteuden muutos ajan funktiona. Kuivat kappaleet on pantu tasaantumaan RH 85 %:iin.

Eri materiaalien suhteelliset dimensiomuutokset eri suunnissa ja kuperuuden muutos ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa 85 %:sta 30 %:iin ovat nähtävissä kuvassa 5. Lämpökäsitellyn männyn ja kuusen mittapysyvyys kosteuden muuttuessa on parempi kuin vesilasikyllästetyn tai käsittelemättömän männyn, joiden välillä ei ole merkittävää eroa. Huomattavaa tuloksissa on se, että lämpökäsitellyn puutavaran suhteellinen dimensiomuutos on paksuussuunnassa suurempaa kuin leveysuunnassa, kun taas vesilasikyllästetyn ja käsittelemättömän männyn tilanne on päinvastainen. Tämä ero johtuu puun anisotrooppisesta kosteuselämisestä. Lämpökäsitelty puutavara oli sydäntavaraa mutta vesilasikyllästetty ja käsittelemätön puutavara pintalautaa.



Kuva 5. Eri materiaalien suhteelliset mittojen muutokset ja absoluuttinen kuperuuden muutos ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa 85 %:sta 30 %:iin.

4.1.4 Johtopäätökset

Lämpökäsitellyn männyn ja kuusen kosteuseläminen on huomattavasti pienempää kuin vesilasikyllästetyn ja lievästi lämpökäsitellyn tai käsittelemättömän männyn. Tämä johtuu lämpökäsitellyn puun alemmasta tasapainokosteudesta käsittelemättömään puuhun verrattuna. Kupertuminen sen sijaan näyttää olevan lämpökäsitellyllä materiaalilla jonkin verran suurempaa kuin vesilasikyllästetyllä tai käsittelemättömällä puulla. Vesilasikyllästys näyttää lisäävän puun hygroskooppisuutta, jota kyllästyksen jälkeinen lämpökäsittely 125 °C:ssa ei tunnu poistavan. Tässä hankkeessa ei tutkittu uudemman sukupolven vesilasikyllästettyjä tuotteita, joissa vesilasijäämää on vähennetty ja lämpökäsittelylämpötilaa nostettu jopa 190 °C:een. Vesilasikyllästetyn puun dimensiostabiliteettia on saatu parannettua edellä kuvatuilla toimilla.

4.2 Lujuusominaisuudet

Testin tarkoituksena oli vertailla vesilasilla kyllästetyn ja lämpökäsitellyn sekä raakamäntyöljyllä käsitellyn männyn taivutuslujuutta, kimmokerrointa taivutuksessa ja leikkauslujuutta pienillä virheettömillä koekappaleilla. Referenssimateriaalina oli käsittelemätön mänty.

4.2.1 Testimateriaali

Testimateriaali oli männyn pintalautaa (dimensio 32 mm x 100 mm). Testimateriaali valittiin kokeeseen siten, että lauta halkaistiin, jolloin tuloksena oli 32 mm x 48 mm:n kokoista rimaa. Toinen rima käsiteltiin vesilasilla tai mäntyöljyllä. Rinakkainen rima testattiin käsittelemättömänä. Kullakin testattavalla kyllästysaineella kyllästettiin noin 30 rimaa (pituus n. 1300 mm). Otoksen hajauttamiseksi rimat valittiin eri laudoista.

Vesilasimateriaali painekyllästettiin 6,6 %:n vahvuisella liuoksella ja lämpökäsiteltiin 4 tunnin ajan 160 °C:ssa. Lämpökäsittely tehtiin KyAMK:n lämpökaapissa normaali-ilmassa suojakaasua käyttämättä, joten käsittely ei täysin vastaa teollista lämpökäsittelyprosessia. Mäntyöljykäsittelyt tehtiin raakamäntyöljykeittona lämpötiloissa 148 °C ja 136 °C.

Testattavista materiaaleista käytetään jatkossa seuraavia merkintöjä:

- VL+160°C: Vesilasikyllästys 6,6-prosenttisella liuoksella ja uunikuuminen 4 tuntia 160 °C:ssa
- MÖ1: Raakamäntyöljykeitto 148 °C
- MÖ2: Raakamäntyöljykeitto 136 °C

Lisäksi kaikilla materiaaleilla oli vastaavasta käsittelemättömästä materiaalista tehdyt referenssikappaleet, joissa on käytetty lisämerkintää REF. Laskennallinen vesilasijäämä oli testikappaleissa keskimäärin 29 kg/m³.

4.2.2 Testaus

Testaukset tehtiin talvella ja keväällä 2011 Kymenlaakson ammattikorkeakoulun puutekniikan laboratoriossa. Taivutuslujuus ja kimmokerroin määritettiin soveltuvin osin standardin ISO 3133 mukaan kolmipistetaivutuksena visuaalisesti virheettömillä koekappaleilla (poikkileikkaus 20 mm x 20 mm, jänneväli 300 mm). Leikkauslujuus testattiin soveltuvin osin standardin ISO 3347 mukaan virheettömillä kappaleilla, joissa leikkauspinta oli 30 mm x 20 mm ja kuormitus puun pituussuuntaan. Kummassakin testissä kuormitusaika oli 1,5–2,0 min. Kustakin testikappaleesta määritettiin myös tiheys testaustilassa ja joka neljänestä kappaleesta määriteltiin kosteus. Otokoko oli sekä taivutus- että leikkauslujuustestissä vesilasikyllästetyllä materiaalilla 30 kappaletta ja mäntyöljykäsitetyillä 15 kappaletta kummassakin keittolämpötilassa. Referenssikappaleita oli vastaava määrä. Ennen testausta koekappaleet tasaannutettiin olosuhteissa RH = (65 ± 5) % ja LT = (20 ± 2) °C.

4.2.3. Tulokset

4.2.3.1 Taivutuslujuus ja kimmokerroin taivutuksessa

Taulukossa 1 on esitetty vesilasikyllästetyn ja mäntyöljykäsitellyn materiaalin sekä näiden referenssimateriaalin keskimääräiset tiheydet testaustilassa, laskennalliset kuivatiheydet, kosteudet, taivutuslujuudet ja kimmokertoimet taivutuksessa.

Taulukko 1. Eri materiaalien tiheyden, kosteuden, taivutuslujuuden ja kimmokertoimen keskiarvot ja keskihajonnat.

Materiaali	Otos		Tiheys*	Kosteus	Taivutuslujuus	Kimmo-kerroin	Kuiva-tiheys**
	kpl		kg/m ³	%	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³
VL+160°C	29	ka.	574	9,8	78,9	9216	523
		kh.	53	0,9	13,6	1588	
VL+160°C REF	30	ka.	584	13,8	75,5	10322	513
		kh.	46	0,3	6,9	1279	
MÖ1	15	ka.	493	10,7	68,2	8042	445
		kh.	43	0,6	11,2	1501	
MÖ1 REF	15	ka.	467	14,3	75,9	8107	409
		kh.	48	0,5	10,5	1624	
MÖ2	15	ka.	439	9,1	62,1	7380	403
		kh.	32	0,4	11,9	1010	
MÖ2 REF	15	ka.	445	12,6	75,3	7722	395
		kh.	31	0,3	7,2	683	

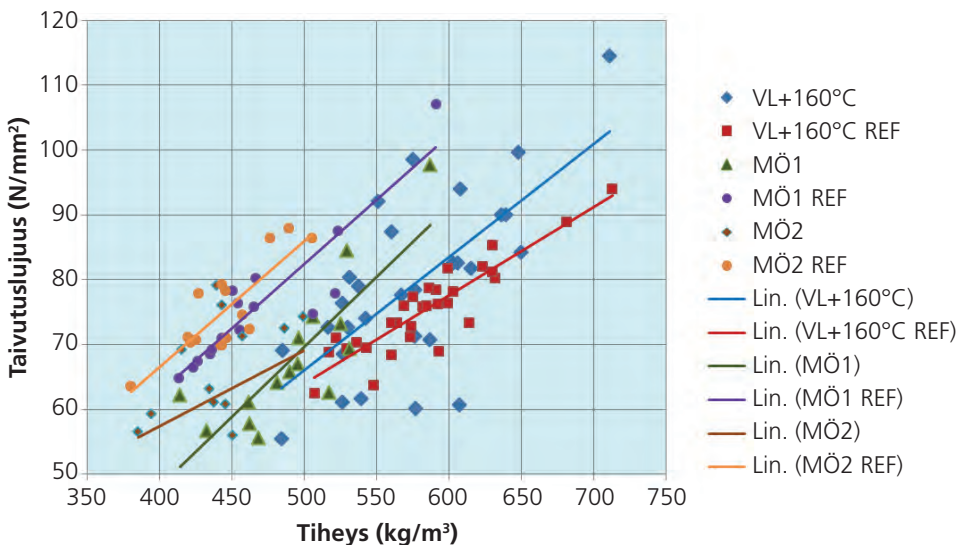
* Tiheys testauskosteudessa

** Laskennallinen kuivatiheys

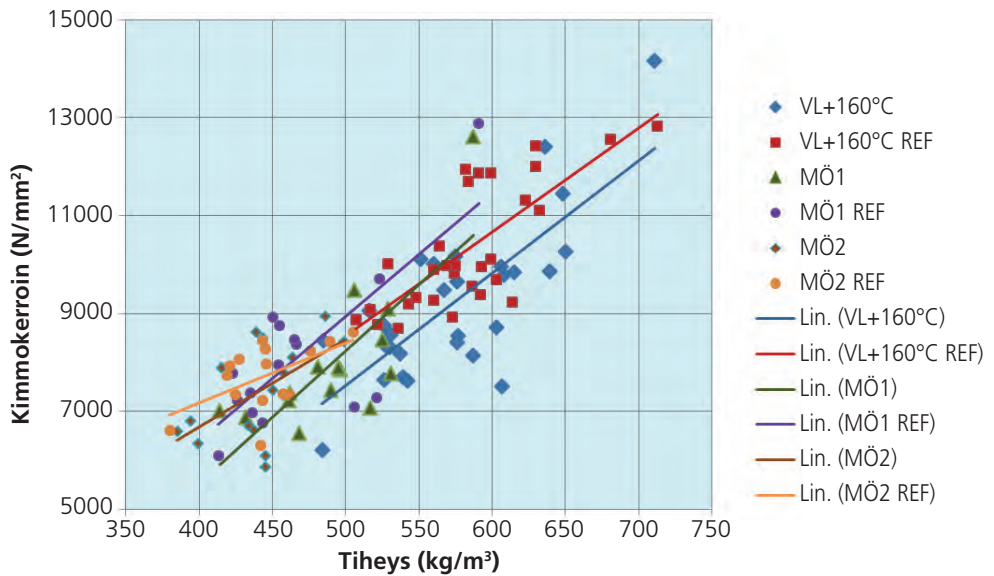
Sekä vesilasilla että mäntyöljyllä käsitelty materiaali tasaantuu samoissa olosuhteissa (RH 65 % ja T 20 °C) selvästi alempaan tasapainokosteuteen kuin käsittelemättömän materiaali. Tähän vaikuttaa puun modifiointeihin liittyvä lämpökäsittely. Koska käsittelemättömän ja käsitellyn puun kosteudet poikkeavat, on taulukkoon 1 laskettu myös eri materiaalin keskimääräiset laskennalliset kuivatiheydet, ja näin kosteuden vaikutus tiheyteen on eliminoitu pois. Vesilasikyllästys ja sen jälkeinen lämpökäsittely lisäsi puumateriaalin kuivatiheyttä keskimäärin 10 kg/m³ (vesilasikyllästykseen osuus keskimäärin +29 kg/m³ ja uunikuumentuksen osuus keskimäärin -19 kg/m³). Mäntyöljykeitossa 1 kuivatiheyden keskimääräinen kasvu oli 34 kg/m³ ja mäntyöljykeitossa 2 keskimäärin 8 kg/m³.

Eri materiaalien välinen tiheysvaihtelu on melko suurta. Mäntyöljyllä käsitellyn materiaalin tiheys on ollut selvästi pienempi kuin vesilasilla kyllästetyn. Ero on nähtävissä sekä käsittelemättömällä referenssimateriaalilla että modifioidulla materiaalilla. Puun tiheydellä on varsin suuri vaikutus lujuusominaisuuksiin. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty eri materiaalien taivutuslujuus ja kimmokerroin tiheyden funktiona. Näin tuloksista voidaan eliminoida tiheyden vaikutus.

Vesilasikyllästys ja siihen yhdistetty lämpökäsittely eivät näytä heikentävän puun taivutuslujuutta, pikemminkin päinvastoin. Lujuusero ei ole kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä. Mäntyöljykeitto sen sijaan näyttäisi heikentävän puun taivutuslujuutta. Etenkin MÖ2-kappaleilla tämä on selvästi nähtävissä (lujuusero tilastollisesti erittäin merkitsevä). Jos tiheys vakioidaan, mäntyöljyllä käsitellyillä ja vesilasilla käsitellyillä kappaleilla ei näytä olevan merkittävää lujuuseroa.



Kuva 6. Eri materiaalien ja niiden referenssimateriaalien taivutuslujuudet tiheyden funktiona.

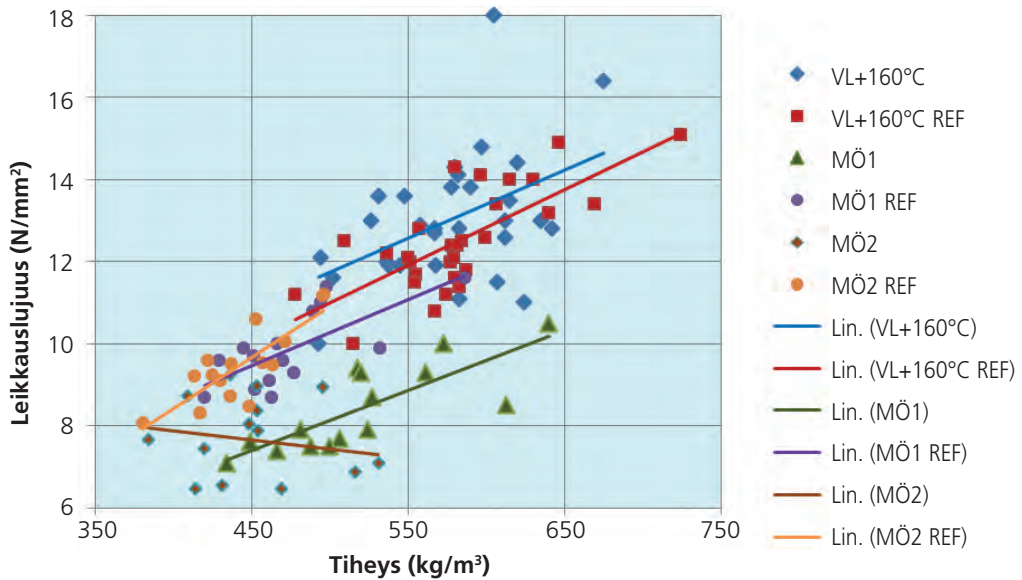


Kuva 7. Eri materiaalien ja niiden referenssimateriaalien kimmokertoimet tiheyden funktiona.

Sekä vesilasi- että mäntyöljykäsittely näyttävät hieman heikentävän puun kimmokerrointa. Vesilasikyllästetyllä ja lämpökäsitellyllä materiaalilla ero referenssimateriaaliin on tilastollisesti merkitsevä. Vesilasikyllästys sinänsä ei heikennä puuta, mutta vesilasikyllästyksen jälkeinen lämpökäsittely heikentää. Mäntyöljyllä käsiteltyjen kappaleiden kimmokertoimet ovat myös hieman heikompia kuin referenssimateriaalin, mutta erot eivät ole tilastollisesti merkitseviä. Kimmokerroin määritettiin samoista kappaleista kuin taivutuslujuus.

4.2.3.2 Leikkauslujuus

Myös leikkauslujuuskappaleiden tiheysvaihtelu oli varsin suurta eri modifiointimenetelmien välillä ja sisällä, joten lujuuden tarkastelu tiheyden funktiona on paikallaan (kuva 8). Vesilasikyllästetyn ja lämpökäsitellyn materiaalin leikkauslujuusarvot olivat hieman suuremmat kuin referenssimateriaalin, mutta ero ei ole tilastollisesti merkitsevä. Mäntyöljykäsittely sen sijaan heikentää leikkauslujuutta merkittävästi (ero mäntyöljykäsitellyn ja referenssimateriaalin välillä on tilastollisesti erittäin merkitsevä).



Kuva 8. Eri materiaalien ja niiden referenssimateriaalien leikkauslujuudet.

4.2.4. Johtopäätökset

Tässä hankkeessa lujuustestit tehtiin pienille, virheettömille koekappaleille, joten tietoa saatiin vain puumateriaalista ilman puussa itsessään olevia vikoja tai mahdollisia modifioinnista aiheutuvia vikoja suuremmille kappaleille. Tämä edellyttää jatkotutkimuksia todellisilla sahatavarakappaleilla. Testit pienillä koekappaleilla osoittivat, että vesilasikyllästys 6,6-prosenttisella liuoksella ja siihen yhdistetty lämpökäsittely 160 °C:n lämpötilassa eivät oleellisesti vaikuta puun taivutus- tai leikkauslujuuteen. Sen sijaan kimmokerroin taivutuksessa aleni hieman. Mäntyöljykäsittely ei juuri vaikuttanut kimmokertoimeen taivutuksessa, mutta puun taivutuslujuutta ja erityisesti leikkauslujuutta se näyttää alentavan.

4.3 Liimattavuus

Testin tarkoituksena oli vertailla vesilasilla kyllästetyn + lämpökäsitellyn ja raakamäntyöljyllä käsitellyn männyn liimattavuutta ja liimasauman lujuutta ja kestävyttä käyttämällä erilaisia kylmäkovettuvia liimoja. Tarkoituksena oli myös selvittää, miten eri tavalla modifioidun puumateriaalien liimasauman lujuus muuttuu eri liimoja käytettäessä. Referenssimateriaalina oli käsittelemätön mänty.

4.3.1 Testimateriaali

Testimateriaali oli männyn pintalautaa (dimensio 32 mm x 100 mm). Vesilasikyllästys tehtiin täysikokoiselle dimensiolle ja referenssimateriaali valittiin satunnaisesti samasta erästä, jotta vertailtavuus vesilasikyllästetyn ja käsittelemättömän männyn välillä olisi mahdollisimman luotettava. Mäntyöljykeittoa varten laudat sahattiin keskeltä halki, jolloin toinen puolisko käsiteltiin mäntyöljyllä ja toinen puolisko otettiin referenssimateriaaliksi.

Vesilasimateriaali painekyllästettiin 6-prosenttisella liuoksella ja lämpökäsiteltiin 4 tunnin ajan 160 °C:ssa. Mäntyöljykäsittelyt tehtiin raakamäntyöljykeittona lämpötiloissa 148 °C ja 136 °C.

Käytetyt materiaalit ja niiden merkinnät ovat seuraavat:

- VL+160°C: Vesilasikyllästys 6-prosenttisellä liuoksella ja lämpökäsittely 4 tuntia 160 °C:ssa
- MÖ1: Raakamäntyöljykeitto 148 °C
- MÖ2: Raakamäntyöljykeitto 136 °C

Lisäksi kaikilla materiaaleilla oli vastaavasta käsittelemättömästä materiaalista tehty referenssikappaleet, joissa on käytetty lisämerkintää REF. Tässä tapauksessa vesilasikyllästetyn materiaalin lämpökäsittely tehtiin normaalin teollisen prosessin mukaisesti Mikkelin ammattikorkeakoulussa.

4.3.2 Testaus

Testejä varten kustakin materiaalista (VL+160°C, MÖ1 ja MÖ2) liimattiin yksi viisilamellinen, 1,8 m pitkä liimapuupalkki seuraavilla kylmäkovettuvilla liimoilla: melamiini-formaldehydiharts (MF), melamiini-urea-formaldehydiharts (MUF), fenoli-resorsinoli-formaldehydiharts (PRF) ja kosteuskovettu polyuretaaniliima (PUR). Lamellien dimensiot valmiissa palkissa olivat seuraavat: VL: 27 mm x 91 mm, MÖ1: 25 mm x 38 mm ja MÖ2: 24 mm x 27 mm. Vastaava liimaus tehtiin referenssimateriaalille. Liimasaumojen leikkauslujuus ja puustamurtuma testattiin standardin EN 392 mukaan KyAMK:n puutekniikan laboratorioissa ja delaminointuminen standardin EN 391 mukaan Stora Enso Wood Products Oy Ltd:n Uimaharjun sahalla. Otokoko oli liimasauman leikkauslujuustestissä 20 koekappaletta puumateriaalia ja liimaa kohti. Delaminointikokeessa otokoko oli 10 kappaletta puumateriaalia ja liimaa kohti. Ennen testausta koekappaleet tasaannutettiin 65 %:n ilman suhteellisessa kosteudessa ja 20 °C:n lämpötilassa.

4.3.3 Tulokset

4.3.3.1 Liimasauman leikkauslujuus ja puustamurtuma

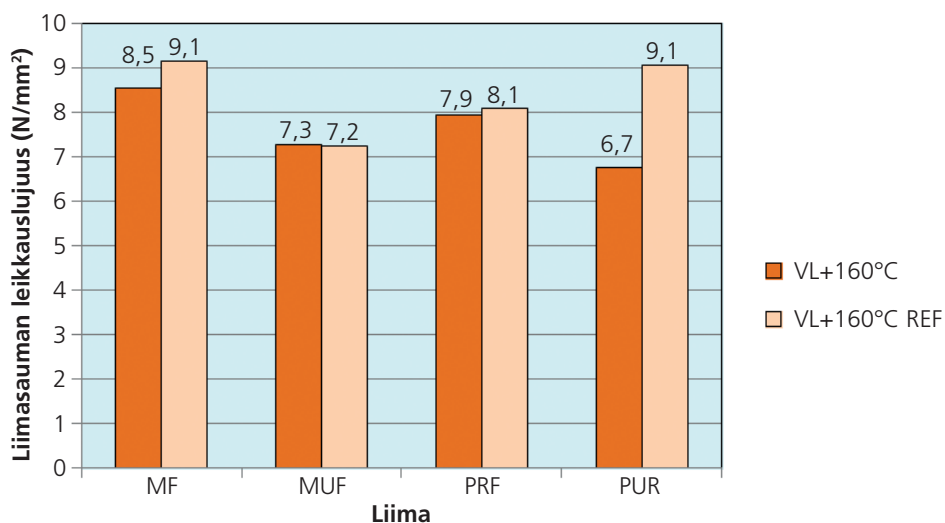
Vesilasi- ja mäntyöljykäsiteltyjen leikkauslujuuskappaleiden ja näiden referenssikappaleiden keskimääräinen tiheys ja kosteus on esitetty taulukossa 2. Vesilasi- ja mäntyöljykäsiteltyjen koekappaleiden kosteus oli noin 9 % ja käsittelemättömien referenssikappaleiden noin 12 %. Kullakin materiaalilla tiheyserot käsitellyn ja käsittelemättömän referenssimateriaalin välillä tietyllä liimalla liimattaessa ovat varsin pienet, joten tiheyserot eivät juurikaan selitä mahdollisia leikkauslujuuseroja käsitellyn ja käsittelemättömän referenssimateriaalien välillä; poikkeuksena oli vesilasikyllästetty ja PUR-liimalla liimattu materiaali.

Taulukko 2. Vesilasi ja mäntyöljykäsiteltyjen leikkauslujuuskappaleiden tiheys ja kosteus.

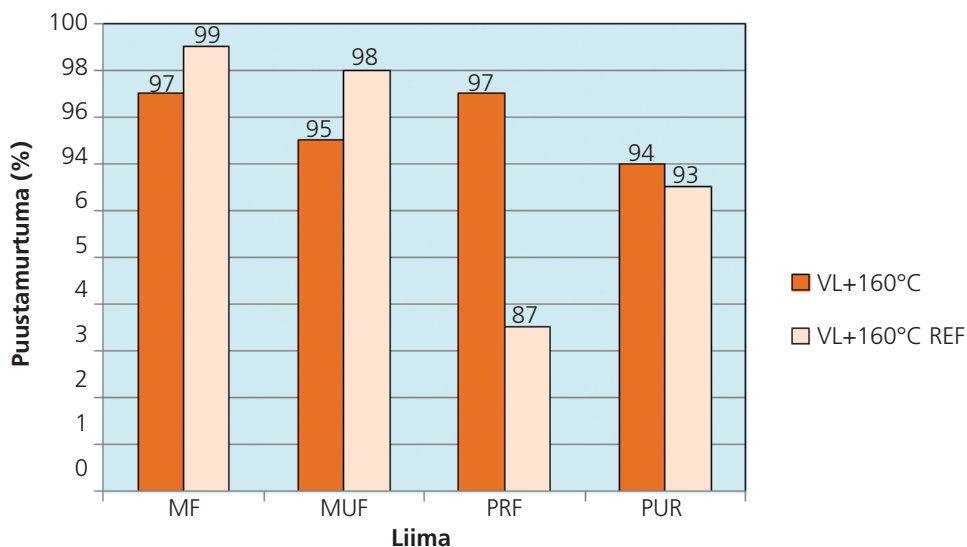
	Vesilasi + lk 160°C		Mäntyöljy 1		Mäntyöljy 2	
Liima	Käsitelty		Käsitelty		Käsitelty	
	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Tiheys kg/m ³	Kosteus %
MF	526	8,8	491	9,3	455	9,4
MUF	531	9,4	523	9,6	483	9,0
PRF	548	9,2	471	9,2	472	9,0
PUR	499	9,2	512	9,0	481	7,6
Keskiarvo	526	9,2	499	9,3	473	8,8
Liima	Referenssi		Referenssi		Referenssi	
	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Tiheys kg/m ³	Kosteus %	Tiheys kg/m ³	Kosteus %
MF	515	11,2	462	11,5	434	12,1
MUF	508	11,7	503	11,9	465	11,6
PRF	530	11,9	469	11,6	471	12,1
PUR	558	11,4	491	11,6	463	11,6
Keskiarvo	528	11,6	481	11,7	458	11,9

Vesilasilla kyllästetyn ja lämpökäsitellyn materiaalin liimasauman leikkauslujuus ei poikennut merkittävästi referenssimateriaalista, paitsi polyuretaaniliiman kohdalla, jolla ero oli huomattava (kuva 9). Tämä ei välttämättä selity huonolla liimattavuudella, koska polyuretaaniliimalla liimasauman puustamurtumissa ei ollut eroa (kuva 10). Mäntyöljykäsitellyn materiaalin leikkauslujuusarvot olivat selvästi huonommat käsittelemättömän referenssimateriaalin verrattuna (kuvat 11 ja 13). Tämä ei kuitenkaan välttämättä selity huonolla liimattavuudella, koska testissä saadut puustamurtuma-arvot olivat suuret (kuvat 12 ja 14). Todennäköisesti mäntyöljyllä käsitellyn materiaalin huonommat leikkauslujuusarvot selittyvät itse

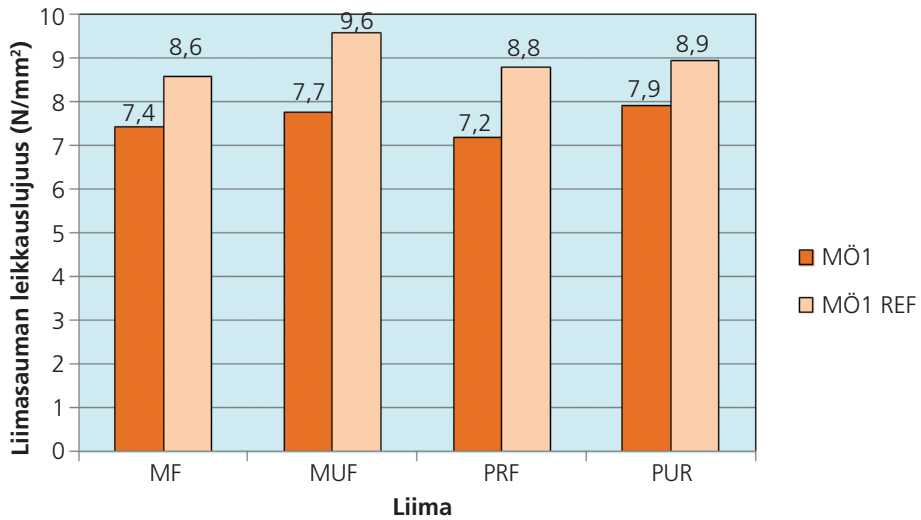
puumateriaalin huonommalla leikkauslujuudella (vrt. puuaineen leikkauslujuustulokset). Kannattaa huomata, että tämän testin leikkauslujuusarvot eivät ole suoraan verrattavissa puun leikkauslujuustestin referenssikappaleiden leikkauslujuuksiin (luku 4.2.3.2 Leikkauslujuus), koska testausstandardi oli erilainen. Kappale oli tässä testissä suurempi kuin puun leikkauslujuuden testauksessa. Erilaisesta testustavasta johtuen tämän testin leikkauslujuusarvot ovat samalla materiaalilla noin 10 % pienemmät kuin puun leikkauslujuutta testattaessa.



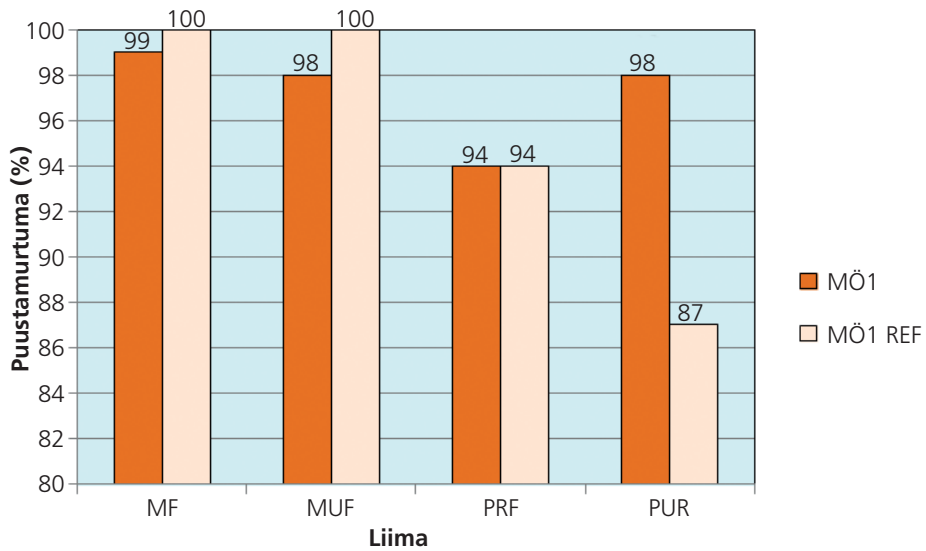
Kuva 9. Vesilasi- ja sen vertailumateriaalin liimasauman leikkaukisuus eri liimoilla.



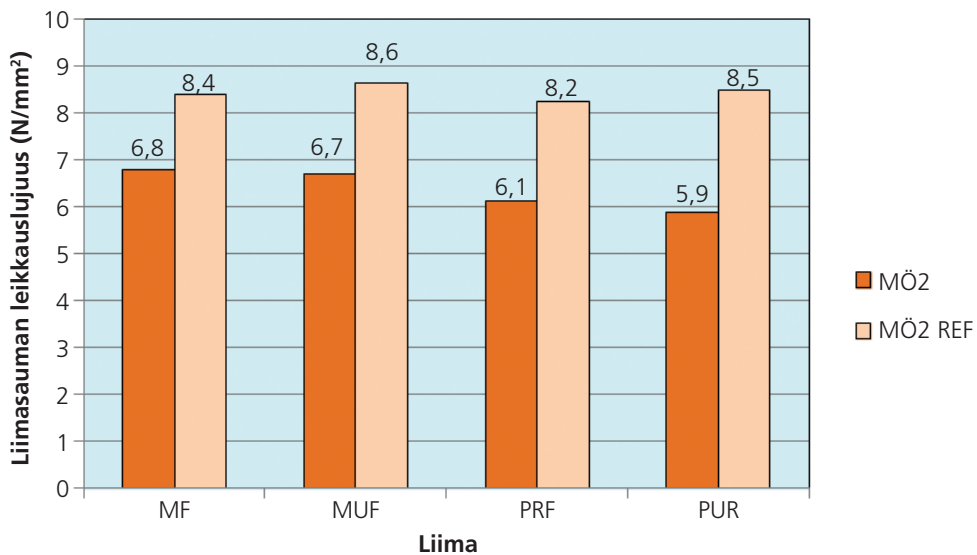
Kuva 10. Vesilasi- ja sen vertailumateriaalin liimasauman puustamurtumat eri liimoilla.



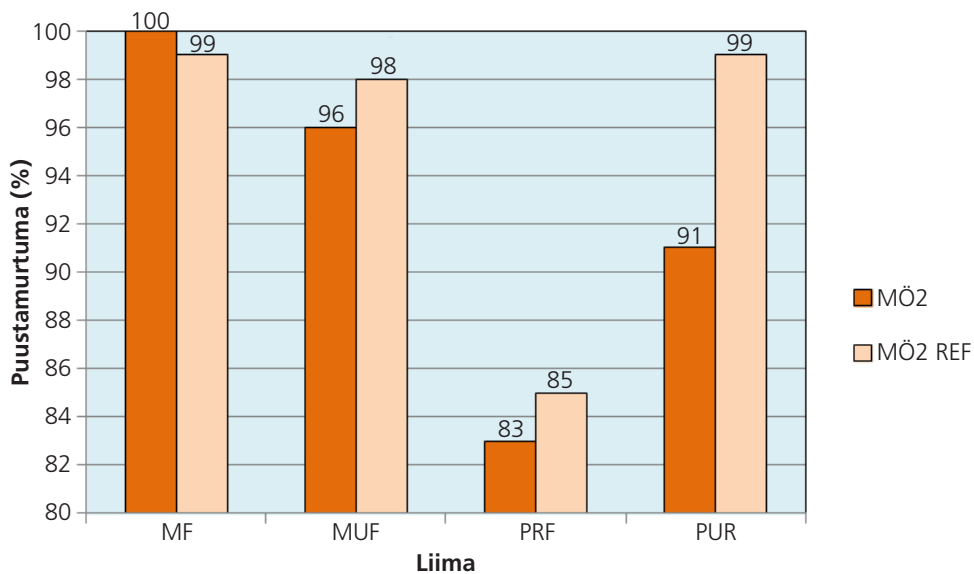
Kuva 11. Mäntyöljy 1 ja sen vertailumateriaalin liimasauman leikkauslujuus eri liimoilla.



Kuva 12. Mäntyöljy 1 ja sen vertailumateriaalin liimasauman puustamurtumat eri liimoilla.



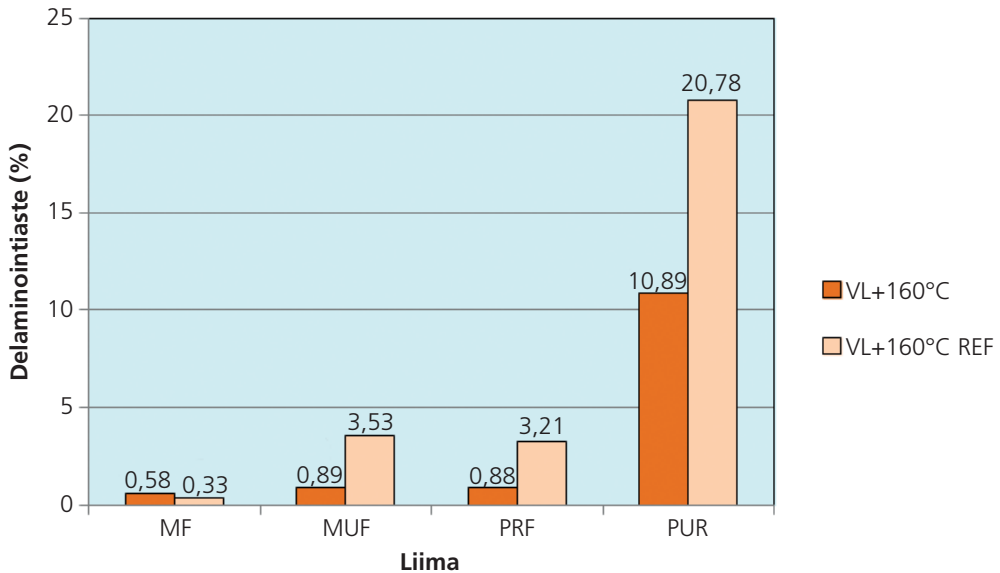
Kuva 13. Mäntyöljy 2 ja sen vertailumateriaalin liimasauman leikkauslujuus eri liimoilla.



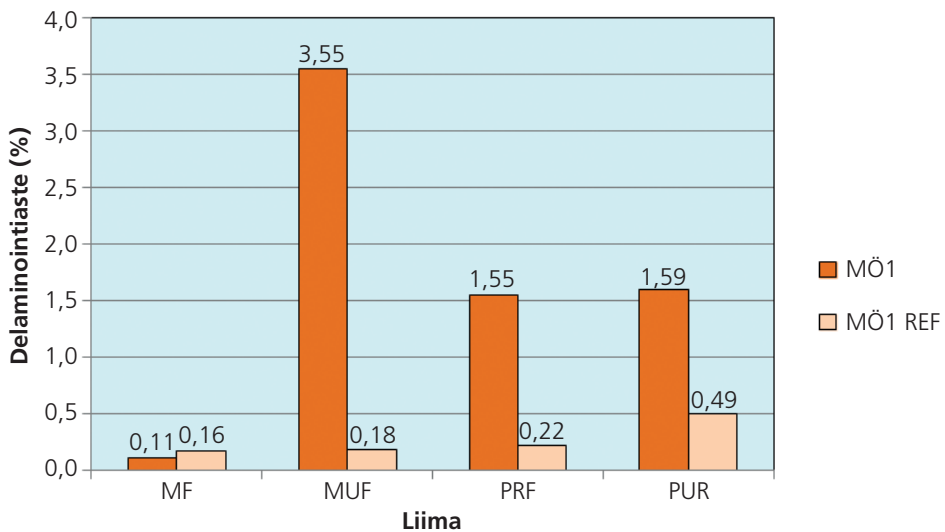
Kuva 14. Mäntyöljy 2 ja sen vertailumateriaalin liimasauman puustamurtumat eri liimoilla.

4.3.3.2 Liimasauman delaminointuminen

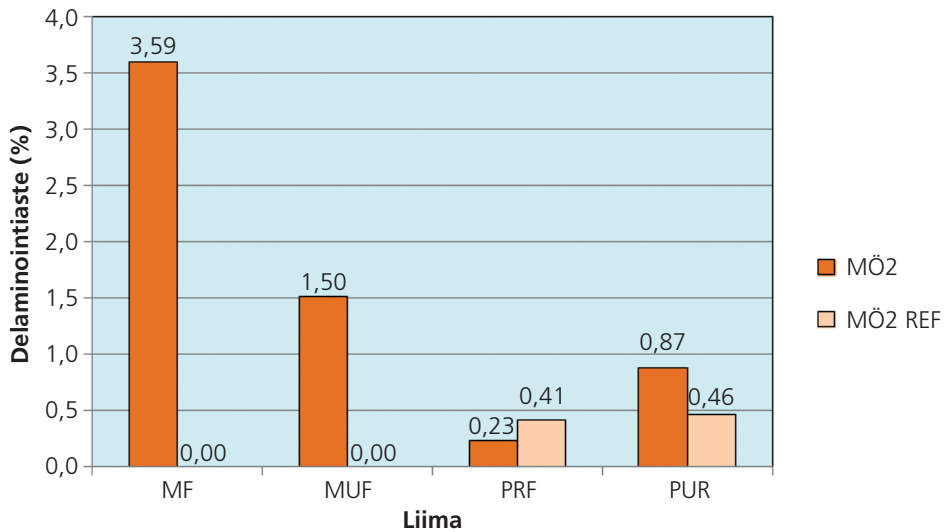
Liimasaumojen kokonaisdelaminointiprosentti on esitetty kuvissa 15–17. Tu-loksista on poistettu kappaleet, joissa delaminointuminen on johtunut oksasta tai muusta viasta.



Kuva 15. Vesilasi- ja sen vertailumateriaalin liimasauman kokonaisdelaminointiaste eri liimoilla.



Kuva 16. Mäntyöljy 1 ja sen vertailumateriaalin liimasauman kokonaisdelaminointiaste eri liimoilla.



Kuva 17. Mäntyöljy 2 ja sen vertailumateriaalin liimasauman kokonaisdelaminointiaste eri liimoilla.

Delaminointumisosuudet ovat varsin hyviä, paitsi polyuretaaniliimalla vesilasimateriaalia ja sen referenssiä liimattaessa. Kaikilla muilla materiaali- ja liimayhdistelmillä keskimääräinen kokonaisdelaminointiosuus jäi alle 5 %:n, useilla jopa alle 1 %:n.

4.3.4 Johtopäätökset

Vesilasikäsittely ja siihen yhdistetty lämpökäsittely eivät oleellisesti heikennä liimasauman leikkauslujuutta. Poikkeuksena tästä on polyuretaaniliima, jolla myös liimasauman delaminointumisen oli varsin suurta (n. 11 %), kun se muilla materiaaleilla ja liimoilla oli korkeintaan n. 3,5 %. On mahdollista, että vesilasimateriaalin liimauksessa polyuretaaniliimalla on tullut jonkinlainen liimausvirhe, koska myös vesilasimateriaalin referenssikappaleiden delaminointumisen oli hyvin suurta (21 %). Polyuretaaniliimalle suositellaan käytettäväksi varsin pientä liiman levitysmäärää, jolloin pienetkin vaihtelut liiman levityksessä voivat aiheuttaa liimausvirheen. Mäntyöljykäsiteltyjen materiaalien liimasauman leikkauslujuudet olivat kaikilla liimoilla selvästi pienemmät kuin käsittelemättömien vertailukappaleiden. Liimasauman delaminointumisen oli myös suurempaa mäntyöljykäsitellyillä kappaleilla kuin käsittelemättömillä. Puustamurtumaprosenteissa ei kuitenkaan ollut merkittävää eroa. Voidaan siis olettaa, että mäntyöljykäsittely heikentää hieman puun liimattavuutta tutkituilla liimoilla.

Liimapuun vaatimuksia kuvaava standardi EN 386 edellyttää kokonaisdelaminointiosuuden olevan enintään 5 %. Tämä vaatimus täyttyi kaikilla muilla materiaali- ja liimayhdistelmillä paitsi vesilasimateriaalin ja sen referenssimateriaalin PUR-liimauksessa. Standardi EN 386 edellyttää liimasauman leikkauslujuuden olevan vähintään 6,0 N/mm² jokaisessa tukitussa saumassa. Tämä ehto täyttyy

keskimäärin kaikissa muissa liimauksissa paitsi mäntyöljy 2 -materiaalin PUR-liimauksessa. Tässäkin liimauksessa alle 6,0 N/mm² olleiden liimasaumojen puustamurtumat olivat pääasiassa 100 %, millä voidaan kompensoida liimasauman leikkauslujuus aina 4,0 N/mm² asti.

4.4 Työstettävyys

Vesilasikyllästetyn materiaalin työstettävyyttä tutkittiin kahdella eri kokeella. Höylän tehomittaus tehtiin syksyllä 2010 vesilasikyllästettyä puuta höylättäessä ja CNC-jyrsimen tehomittaus keväällä 2011 vesilasikyllästettyä puuta jyrsittäessä. Tehomittaukset teki Visi-Systems Oy, jonka raportointiin perustuvat höyläyskokeen tulokset.

4.4.1 Höyläyskoe

Höylän terien kulumaa mitattiin höyläämällä vesilasikyllästettyä puuta. Tutkimus tehtiin mittaamalla höylän yhden reunakutterin ottamaa sähkötehoa. Tähän ratkaisuun päädyttiin koko höylän sähkötehon mittaamisen sijasta siksi, että kyseisellä terällä on aiemmin havaittu epänormaalia kulumaa. Oletus on, että kyseisen terän kohdalla lautaan on kyllästysvaiheessa jäänyt eniten vesilasia, ja leikkausvastus on siksi suurin. Oletettiin, että kun seurataan kuormitettumman terän tylsämistä, saadaan selkein signaali kuormituksen ja sähkötehon kasvamisesta.

Höylättävänä materiaalina oli

- noin 85 m kyllästämätöntä puutavaraa, jolla todettiin lähinnä höylän tyhjäkäyntiteho ja höylän käyttäytyminen kuormitettuna sekä eliminoitiin höyläkoneen lämpenemisestä aiheutuvan mekaniikan sisäisten vastusten alenemaa, sekä
- noin 560 m vesilasikyllästettyä puutavaraa, josta osa oli lämpökäsiteltyä ja osa lämpökäsittämätöntä. Tämän materiaalin avulla tehtiin varsinaiset mittaukset ja seuranta.

Höylättävä materiaali oli terassilautaa (profiili PHL ja dimensio 28 mm x 95 mm).

Mittausarvot on esitetty taulukossa 3. Arvo on suora virtamittarin (virta-jännitemuunnospihtivirtamittari liitettynä digitaaliseen muistioskilloskooppiin) tuottama jännitearvo, josta käyvät ilmi suhteelliset erot puun leikkaamiseen käytetyssä tehossa. Mittauksen huippuarvot ovat hetkittäisiä. Käytännössä ne ovat puun ok-sakohtia.

Taulukko 3. Virtamittarin tuottama jännitearvo höyläyskokeen eri vaiheissa.

Höyläyksen vaihe	Jännite V
Höylän tyhjäkäynti mittauksen alussa	1,6
Kyllästämättömän materiaalin höyläys, keskiarvo	1,7
Vesilasikyllästetyn materiaalin höyläys, keskiarvo	1,8
Vesilasikyllästetyn materiaalin höyläys, leveämpi, keskiarvo	1,9
Vesilasikyllästetyn materiaalin höyläys, huippuarvo	2,0
Vesilasikyllästetyn materiaalin höyläys, leveämpi, huippuarvo	2,3
Höylän tyhjäkäynti mittauksen lopussa	1,6

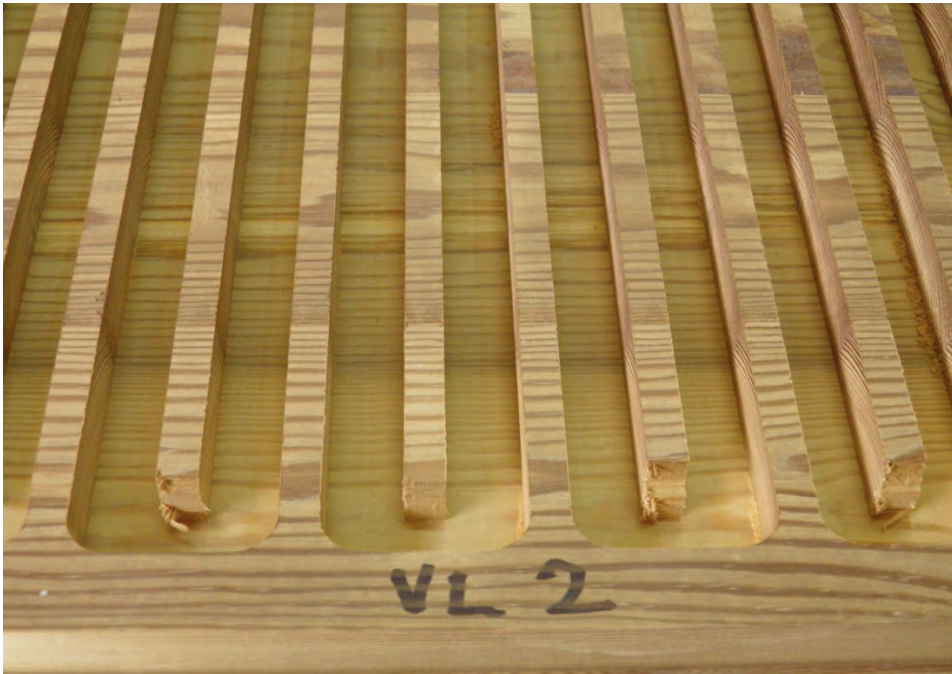
Mittausten perusteella vesilasikyllästetyn puun höyläminen vaatii enemmän tehoa kuin kyllästämättömän. Mittaukset eivät osoittaneet käytännössä minkäänlaista tehonkulutuksen kasvua erien aikana. Lastun laatu ja höylän leikkuuääni pysyivät samanlaisina koko mittauksen ajan, eikä terissä ollut havaittavissa ilmeistä kulumaa.

Kokeen taustalla vaikuttaneisiin, aistinvaraisiin kokemuksiin (mustunut ja tylsynyt höylän terä, karkea leikkuuääni, lastun laatu) verrattuna erottava tekijä oli mitä ilmeisimmin tässä testissä mukana olleen materiaalin olennaisesti laimeampi kyllästysliuos.

Kyseisellä liuosväkevyydellä, kyseisillä terillä ja kyseisellä höyläysmäärällä vesilasikyllästys ei rajoita puun höylättävyyttä. Varsinainen ero leikkausvastuksessa tulee ilmi korostuneemmin teollisessa mittakaavassa, jossa ajonopeudet ja -määrät ovat kertaluokkia suuremmat.

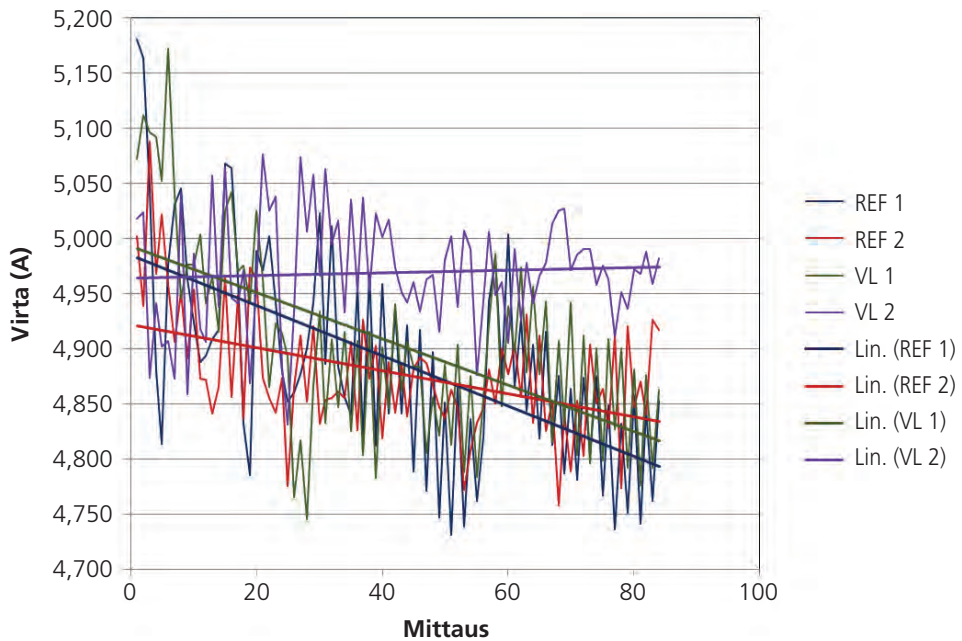
4.4.2 CNC-jyrsintäkoe

CNC-jyrsintäkokeet tehtiin mäntyliimalevyille (kaksi levyä / materiaali). Testissä oli mukana 6,2-prosenttisella vesilasiliuoksella kyllästetty ja 160 °C:ssa lämpökäsitelty materiaali (VL). Vertailun vuoksi mukana oli käsittelemättömästä männyistä tehty liimapuulevyt (REF). Materiaalin tiheys oli noin 550 kg/m³ ja kosteus 13 %. Jyrsintä tehtiin kuvan 18 mukaista leikkuurataa pitkin. Terä oli yksileikkuinen, pikateräksestä valmistettu terä. Terän halkaisija oli 20 mm, pyörimisnopeus 16 000 r/min, työstösyvyys 10 mm ja syöttönopeus 3 m/min. Uraa jyrsittiin syysuuntaan ja poikkisyin, yhteensä noin 100 m yhtä materiaalia kohden. Teräpala vaihdettiin uuteen materiaalin vaihtuessa, jotta terän kulumasta johtuvat erot saataisiin eliminoitua. Työstöpään ottama virrankulutus kirjattiin ylös 50–100 mm ennen kutakin käännöstä.



Kuva 18. CNC-työstökokeen työstöjälki vesilasikyllästetyssä materiaalissa.

Virrankulutyslukemat on esitetty kuvassa 19. Erot virrankulutuksessa työstön edetessä ovat niin pieniä, ettei virrankulutuksen perusteella voida tehdä johtopäätöksiä terän kulumisesta. Tosin toista vesilasilevyä työstettäessä virrankulutus ei laskenut samalla tavalla kuin ensimmäistä työstettäessä. Tämä saattaa johtua terän lievästä kulumisesta. Myöskään silmämääräinen tarkastelu ei osoittanut terän kulumista. Työstöjälki oli loppuun asti hyvä, eikä esim. terän aiheuttamaa palamista esiintynyt. Vesilasimateriaalin työstössä syntyi runsaasti hienoa pölyä, joten pölyn poistoon on kiinnitettävä erityistä huomiota. Runsaan pölyämisen selittää todennäköisesti vesilasimateriaalin valmistukseen liittynyt lämpökäsittely.



Kuva 19. CNC-koneen työstöpään virrankulutus ajan funktiona. Ensin työstettiin levy 1 ja sitten levy 2.

4.4.3 Johtopäätökset

Edellä kuvatuissa työstökokeissa työstettävät määrät olivat niin pienet, etteivät tulokset kerro koko totuutta teollisen mittakaavan työstöistä. Työstökokeet suuremmilla materiaalimäärillä ovat tarpeen. Vesilasimateriaalin kehityksen alkuvaiheessa kyllästeen vesilasikonsentraatiot olivat suurempia kuin uudemmissa versioissa, ja esimerkiksi tuolloin oli havaittavissa terien nopeampaa kulumista höylättäessä oikohöylällä. Myös ulkoverhouspaneelin höyläys keväällä 2012 osoitti sivukutterien terien nopeaa tylsymistä. Tämä näkyi työstettäessä ponttien leikkuupinnan palamisena jo noin 100 jm:n höyläyksen jälkeen. Kyseessä oli 7- ja 11-prosenttisella vesilasiliuoksella kyllästetty, 190 °C:ssa lämpökäsitelty materiaali.

4.5 Palo-ominaisuudet

Tässä hankkeessa testattiin vesilasikyllästetystä materiaalista valmistetun paloikkunan palonkestävyys, sekä vesilasikyllästetystä ulkoverhouslaudasta valmistettujen seinäelementtien palokäyttäytyminen. Paloikkunan testaus tehtiin VTT Expert Services Oy:ssä Espoossa. Seinäelementtien palotestaus tehtiin MeKA:ssa Latviasa.

4.5.1 Paloikkunan testaus

Testattava tuote oli Ikkunatehdas Lasivuorimaa Oy:n valmistama MSE-ALU-paloikkuna. Ikkunan koko oli 14M x 18M. Ikkunan karmi (42 mm x 157 mm) ja sisäpuite (61 mm x 63 mm) olivat vesilasilla kyllästettyä ja lämpökäsiteltyä mäntyä. Ulkopuite oli tehty alumiinista. Kokeella haluttiin määrittää kyseisen ikkunan palonkestävyys.

Ikkunan puumateriaali oli 11-prosenttisella vesilasiliuoksella kyllästettyä mäntyä. Kyllästyksen jälkeen materiaali lämpökäsiteltiin 4 tunnin ajan 170 °C:n lämpöti-

Taulukko 4. Koetulokset ja niiden vertailu arviointiperusteisiin nähden. Koe A: tuli ulkopuitteen puolella, koe B: tuli sisäpuutteen puolella.

Ominaisuus	Koetulos	
	Koe A (kokeen kesto 62 min)	Koe B (kokeen kesto 42 min)
<p>Liikkien esiintyminen (vaatimus: ei yli 10 s kestäviä liekkejä = jatkuvia liekkejä)</p>	Ei liekkejä	Ei liekkejä
<p>Puuvillatukkokoe (vaatimus: ei saa syttyä ts. ei saa syttyä tai hehkua)</p>	Ei syttynyt	Ei tehty
<p>Rakotulkikoe (vaatimus: ø6 mm:n rakotulkki saa lävistää koekappaleen, mutta ei liikkua ≥ 150 mm, ø25 mm:n rakotulkki ei saa lävistää koekappaletta)</p>	Ei aukkoja	Ei aukkoja
Eistävyys I ₁	Max ΔT (tc nro)	
	t = 47 min	t = 40 min
<p>Keskimääräinen lämpötilan nousu (kriteeri: ΔT ≤ 140 °C) tc 1 - 5</p>	144 °C	6 °C
<p>Korkein ovilevyn lämpötilan nousu (kriteeri: ΔT ≤ 180 °C) tc 1 - 10, 16 - 20</p>	160 °C ⁽⁴⁾	205 °C ⁽¹⁷⁾
<p>Korkein lämpötilan nousu karmissa (kriteeri: ΔT ≤ 180 °C) tc 11 - 15</p>	58 °C ⁽¹²⁾	84 °C ⁽¹²⁾
Eistävyys I ₂	Max ΔT (tc nro)	
	t = 47 min	t = 40 min
<p>Keskimääräinen lämpötilan nousu (kriteeri: ΔT ≤ 140 °C) tc 1 - 5</p>	144 °C	6 °C
<p>Korkein ovilevyn lämpötilan nousu (kriteeri: ΔT ≤ 180 °C) tc 1 - 10</p>	160 °C ⁽⁴⁾	12 °C ⁽⁷⁻⁹⁾
<p>Korkein lämpötilan nousu karmissa (kriteeri: ΔT ≤ 360 °C) tc 11 - 15</p>	58 °C ⁽¹²⁾	84 °C ⁽¹²⁾

lassa. Analyysin perusteella vesilasijäämä oli keskimäärin 53 g/ kg kuivaa puuta. Puumateriaalin keskimääräinen tiheys oli 517 kg/m³ 12 %:n kosteudessa. Muut ikkunaa koskevat tekniset tiedot on esitetty VTT:n testausselesteessa Nro VTT-S-02643-12.

Palotestit tehtiin standardin SFS-EN 1634-1:2008 mukaan. Ikkuna asennettiin kevytsoraharkoista muurattuun seinään. Palokoe tehtiin ikkunan molemmille puolille tammikuun alkupuolella 2012. Taulukossa 4 on esitetty kokeen tulokset tiiviiden ja eristävyiden suhteen (lähde: Testausseleste Nro VTT-S-02643-12).

Yhteenvedona voidaan mainita, että testatut puurunkoiset ikkunat täyttivät palonkestävyysskoeksessa standardien SFS-EN 13501-2, SFS-EN 1634-1 ja SFS-EN 1363-1 vaatimukset taulukon 5 mukaisesti (lähde: VTT:n testausseleste Nro VTT-S-02643-12):

Taulukko 5. Yhteenvedo paloikkunan koetuloksista. Koe A: tuli ulkopuitteen puolella, koe B: tuli sisäpuitteen puolella.

Ominaisuus	Koe A	Koe B
Tiiviyys (E)	60 minuuttia	42 minuuttia
Eristävyys (I1)	46 minuuttia	39 minuuttia
Eristävyys (I2)	46 minuuttia	42 minuuttia

Ikkunan palotestin koetuloksia ei saa hyödyntää ilman, että testausseleste Nro VTT-S-02643-12 on huomioitu kokonaisuudessaan.

4.5.2 Seinäelementtien testaus SBI-palokokeella

Testin tarkoituksena oli selvittää, parantaako puun vesilasikyllästys puun palonkesto-ominaisuuksia. Testattava tuote oli vesilasilla kyllästetystä männystä höylättyä ulkoverhouslautaa (profiili UTV, dimensio 28 mm x 120 mm). Materiaali oli kyllästetty kahdella eri liuosväkevyydellä, joista toisen vesilasipitoisuus oli 7 % ja toisen 11 %. Molemmat materiaalit lämpökäsiteltiin kyllästyksen jälkeen 4 tuntia 190 °C:ssa. Kummastakin materiaalista valmistettiin viisi palonurkkaa (korkeus 1500 mm, nurkan seinien pituus 500 mm ja 1000 mm). Neljä nurkkaa kumpaakin materiaalia testattiin ilman pintakäsittelyä ja yksi nurkka kummastakin materiaalista käsiteltiin Valtti-pohjusteella ja maalattiin kahteen kertaan vaaleanharmaalla Vinha-akrylaattimaalilla. Testinurkat rakennettiin vaakapanelointina siten, että verhouslaudat ruuvattiin 40 mm x 40 mm kuusirimoihin, jolloin verhouslautojen ja tuulensuojalevyn väliin jäi 40 mm:n tuuletusrako, jonka takana oli kipsilevy. Tämä vastaa normaalia ulkoverhousrakennetta. Palotestit tehtiin standardin EN 13238:2010 mukaan (SBI-palotesti) maaliskuussa 2012 Forest and Wood Products Research and Development Institutessa (MeKA) Latviassa. SBI-palotestissä lähelle testiseinän sisänurkkaa asetetaan noin 30 kW:n palokuorma, jota pidetään

yllä 20 minuuttia. Testissä seurataan lämmön ja savun tuottoa sekä tehdään visuaalisia havaintoja palon etenemisestä. Kuvassa 20 on esitetty 7-prosenttisella vesilasiliuoksella kyllästetystä materiaalista valmistettu testiseinä palokokeen lopussa (lähde: MeKA:n testiraportit Test Report No.984-1/2012). Nurkka on läpipalanut, mutta tuli on levinnyt rajalliselle alueelle.



Kuva 20. 7-prosenttisella vesilasiliuoksella kyllästetty seinäelementti SBI-palokokeen lopussa (Lähde: MeKA:n testiraportti Test Report No.984-1/2012).

Taulukoissa 6 ja 7 on yhteenveto testien tuloksista (lähde: MeKA:n testiraportit Test Report No. 984-1/2012 ja Test Report No. 694-2/2012, joista löytyvät yksityiskohtaisemmat tulokset). Maalaamattomien tulos on neljän nurkan keskiarvo, ja maalatulla viitataan tässä yhden nurkan tulokseen.

Taulukko 6. SBI-palotestin mittaustulokset ja havainnot, 7-prosenttinen vesilasiliuos.

Mitattu ominaisuus	Maalaamaton, 4 testiseinää		Maalattu
	Keskiarvo	Keskihajonta	Yksittäistulos
FIGRA _{0,2 MJ} , W/s	309,3	38,0	607,5
FIGRA _{0,4 MJ} , W/s	309,1	38,2	607,5
THR _{600s} , MJ	17,8	1,8	23,3
SMOGR _A cm ² /s ²	3,9	1,6	2,5
TSP _{600s} , m ²	52,9	16,0	48,7
Visuaalinen havainto	Maalaamaton		Maalattu
Liekki etenee vaakatasossa pitkän siiven reunaan?	Ei		Ei
Putoavia palavia pisaroita tai kappaleita?	Ei		Ei
Pinnan leimahdus?	Ei		Ei
Putoavia testikappaleen osia?	Ei		Ei
Savu ei etene huuvaan?	Ei		Ei
Paneelin kiinnitys takalevyyn petti?	Ei		Ei
Testiseinän vääntyminen tai romahtaminen?	Ei		Ei

Taulukko 7. SBI-palotestin mittaustulokset ja havainnot, 11-prosenttinen vesilasiliuos.

Mitattu ominaisuus	Maalaamaton, 4 testiseinää		Maalattu
	Keskiarvo	Keskihajonta	Yksittäistulos
FIGRA _{0,2 MJ} , W/s	274,7	31,6	575,7
FIGRA _{0,4 MJ} , W/s	274,4	32,0	575,7
THR _{600s} , MJ	16,4	1,8	20,2
SMOGR _A cm ² /s ²	3,3	1,7	2,8
TSP _{600s} , m ²	47,6	6,0	48,1
Visuaalinen havainto	Maalaamaton		Maalattu
Liekki etenee vaakatasossa pitkän siiven reunaan?	Ei		Ei
Putoavia palavia pisaroita tai kappaleita?	Ei		Ei
Pinnan leimahdus?	Ei		Ei
Putoavia testikappaleen osia?	Ei		Ei
Savu ei etene huuvaan?	Ei		Ei
Paneelin kiinnitys takalevyyn petti?	Ei		Ei
Testiseinän vääntyminen tai romahtaminen?	Ei		Ei

Taulukko 8. Testiparametrien selitys

Parametri	Selitys
FIGRA _{0,2 MJ} , W/s	Suurin lämmöntuoton kasvunopeus, kun kokonaislämmöntuotto jää alle 0,2 MJ.
FIGRA _{0,4 MJ} , W/s	Suurin lämmöntuoton kasvunopeus, kun kokonaislämmöntuotto jää alle 0,4 MJ.
THR _{600s} , MJ	Kokonaislämmöntuotto 600 s:n aikana pääpolttimon sytytyksestä.
SMOGRA cm ² /s ²	Suurin savuntuoton kasvunopeus testin aikana.
TSP _{600s} , m ²	Kokonaissavuntuotto 600 s:n aikana pääpolttimon sytytyksestä.

Testitulokset osoittavat, että 11-prosenttisella vesilasiliuoksella kyllästetyn materiaalin lämmön- ja savuntuotto on hieman pienempi kuin 7-prosenttisellä liuoksella kyllästetyn. Maalauksella ei testin mukaan ollut merkittävää vaikutusta savuntuottoon, mutta maalaus lisäsi hieman lämmöntuottoa ja erityisen paljon suurimman lämmöntuoton maksimaalista kasvunopeutta. Käsittelemätöntä referenssimateriaalia ei ollut testissä mukana, joten tämän testin perusteella on vaikea arvioida vesilasikyllästyksen merkitystä materiaalin palonkestävyyteen. Testausstandardissa EN 13238:2010 on kuitenkin tietoa useiden rakennusmateriaalien SBI-testin tuloksista, jotka perustuvat materiaalista riippuen 12–15 eri testauslaboratorion tuloksiin. Taulukkoon 9 on koottu kyseisestä standardista muutamien puumateriaalien SBI-testin tuloksia (eri laboratorioiden mittausten keskiarvo).

Taulukko 9. Eräiden puumateriaalien SBI-testin tuloksia (lähde standardi EN 13238:2010).

Ominaisuus	Lakattu kuusilauta paksuus 12 mm tiheys 380 kg/m ³	Vakiolastulevy paksuus 12 mm tiheys 700 kg/m ³	Vakiokoivuvaneri paksuus 12 mm tiheys 650 kg/m ³
FIGRA _{0,2 MJ} , W/s	681	404	399
FIGRA _{0,4 MJ} , W/s	681	404	399
THR _{600s} , MJ	15,1	26,9	21,7
SMOGRA cm ² /s ²	2	25	36
TSP _{600s} , m ²	410	29	19

Taulukossa 10 on esitetty testausraportissa mainittu potentiaalinen paloluokka eri testikappaleille.

Taulukko 10. Eri testikappaleiden potentiaalinen paloluokka.

Materiaali	Kappale	Luokka	Savun-tuotto	Palava pisarointi
VL 7 %, maalamaton	1	D	s2	d0
VL 7 %, maalamaton	2	D	s1	d0
VL 7 %, maalamaton	3	D	s1	d0
VL 7 %, maalamaton	4	D	s1	d0
VL 7 %, maalattu	1	D	s1	d0
VL 11 %, maalaamaton	1	D	s2	d0
VL 11 %, maalaamaton	2	D	s1	d0
VL 11 %, maalaamaton	3	D	s1	d0
VL 11 %, maalaamaton	4	D	s1	d0
VL 11 %, maalattu	1	D	s1	d0

Tässä testissä ei saatu selkeää näyttöä siitä, että vesilasikyllästys parantaisi oleellisesti puun palonkesto-ominaisuuksia. Kuitenkin suurin lämmöntuoton kasvunopeus ja nopein savuntuoton kasvu oli vesilasimateriaalilla selvästi pienempi kuin esim. vanerilla tai lastulevyllä. Aiemmin KyAMK:ssa tehdyissä tutkimuksissa on vesilasikyllästykseen todettu parantavan puun palonkesto-ominaisuuksia. Tämän testin aiempia testejä heikommät tulokset johtuvat todennäköisesti testimateriaalin vaihtelevasta vesilasijäämästä, koska osalla materiaalista sydänpuuosuus oli varsin suuri (visuaalisen arvion mukaan VL 7 %:n materiaalilla keskimäärin 50 % ja VL 11 %:n materiaalilla keskimäärin 70 %, joillakin laudoilla jopa 90 %). Painekyllästyksessä vesilasi ei juuri imeydy sydänpuuhun. Näytteiden tuhkapitoisuuden perusteella (10 näytettä per vesilasikonsentraatio) vesilasijäämä oli höylätyssä puutavarassa molemmilla vesilasikonsentraatioilla noin 30 kg/m³ ja yksittäisissä laudoissa jopa alle 20 kg/m³.

4.6 Vesilasikutteripurun poltettavuus

Testin tarkoituksena oli selvittää vesilasilla kyllästetyn männyn höyläkutteripurun käyttäytymistä arinapoltossa. Vesilasipurun palamiskäyttäytymistä verrattiin tavallisen höyläkutteripurun palamiskäyttäytymiseen. Lisäksi tehtiin polttokoe vesilasipuru-pellettiseoksella. Koepoltossa ollut vesilasipuru sisälsi vesilasia noin 13 % purun kuivapainosta. Polttoaineiden kosteus oli poltettaessa noin 10 %.

Mittaukset tehtiin kevään ja kesän 2012 aikana Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratoriossa. Käytössä oli 100 kW:n monitoimikattila. Palokäyttäytymisen arvioinnin lisäksi savukaasuista mitattiin O₂, CO₂, CO, NO_x

ja hiukkaset. Poltto ja mittaukset kestivät noin 5 tuntia polttoainetta kohti. Ennen mittauksia kattilaa käytettiin pelkällä purulla oikeiden säätöjen löytämiseksi. Koe-polttoaineet olivat

- vesilasipuru 100 %
- puhdas puru 100 %
- vesilasipuru-pellettiseos 50 % + 50 %

Taulukossa 11 on esitetty päästömittausten tulokset.

Taulukko 11. Päästömittausten tulokset

Komponentti	Vesilasipuru	Puhdas puru	Pelletti-vesilasipuruseos	Yksikkö
O ₂	10	8	11	%
CO ₂	10	13	10	ppm
CO	1023	701	356	ppm
NO _x	66	88	62	ppm
Hiukkaset	58	52	46	mg/m ³ (n)

Kattilan säädöistä johtuen eri polttoaineiden palamispäästöjä on vaikea arvioida. Myös kuivan ja tiheydeltään kevyen purun polttaminen arinakattilassa on hankalaa. Mittaustulosten perusteella vesilasipuru palaa samalla tavalla muiden polttoaineiden kanssa. Tärkeimmiksi huomioiksi mittauksista jäivät seuraavat:

- Vesilasipurun tuhka sintraantuu sekä jää kattilan arinalle ja seinäpinnoille lasimaisena laattana yksistään poltettaessa. Testikattilan arina tuhoutui polttokoikeissa ja jouduttiin vaihtamaan. Kuvassa 21 nähdään sintraantunutta tuhkaa.
- Vesilasipuru (50 %) seoksena muun polttoaineen (pelletti, 50 %) ei aiheuttanut sintraantumista.
- Vesilasipurua ei ainakaan näin suurella vesilasijäämällä tule käyttää yksistään polttoaineena, vaan se on sekoitettava muun polttoaineen joukkoon.



Kuva 21. Vesilasipurun poltossa syntynyttä sintraantunutta tuhkaa.

Polttokokeen tiedot perustuvat Mikko Nykäsen Kymenlaakson ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratoriossa laatimaan tutkimusmittausraporttiin T01/12: Vesilasipurun polttokokeet.

5 YHTEENVETO

Puun modifiointiklusteri -hankkeen tavoitteena oli jatkaa Kymenlaakson ammatti-korkeakoulun puutekniikan laboratoriossa alulle pantua painekyllästykseen perustuvaa puun modifioinnin tutkimus- ja kehitystyötä, jotta saataisiin uutta tietoa modifiointimenetelmistä ja modifiointiaineista, joilla voidaan parantaa ja monipuolistaa puun käyttöominaisuuksia. Yhteistyökumppanit valikoituivat puuta jalostavista yrityksistä, kone- ja laitevalmistajista sekä kone- ja laitesuunnitteluyrityksistä, koska tavoitteena oli perustaa Kymenlaaksoon moderni painekyllästysklusteri. Klusterin tarkoituksena oli, että laitevalmistajat voisivat yhteistyössä suunnitella ja valmistaa puun modifiointiin soveltuvan painekyllästyslaitteiston ja tarjota sitä edelleen puutavaraa valmistaville yrityksille uusien modifioitujen puutuotteiden valmistamiseksi, jotka edelleen toimittaisivat modifioitua puumateriaalia puun jatkojalostajille.

Hannu Boren laati uusien modifioitujen puutuotteiden tuotantoa varten kyllästämöjen suunnitteluohjeet, joissa käsitellään kyllästysprosessien, kyllästysaineiden, kyllästämön teknisten vaatimusten, mitoituksen sekä ympäristö- ja turvallisuuskäsitteiden huomioon ottamista kyllästyslaitteiston suunnittelussa. Selvitystyön pohjalta hankkeeseen osallistuneet kone- ja laitevalmistajat suunnittelivat yhteistyössä KyAMK:n kanssa pilottikyllästämön ja tarjosivat sitä puutuoteteollisuudelle. Kyllästyslaitteiston suunnittelu ei kuitenkaan tässä hankkeessa johtanut kaupalliseen toimintaan.

Uutta tietoa puun modifiointimahdollisuuksista hankittiin kansainvälisten vierailujen ja suomalaisille puulajeille tehtyjen koekyllästysten avulla. Koekyllästyksillä ja kyllästysten jälkeisellä lämpökäsittelyllä tuotettiin erilaisia tuotteita, joiden ominaisuuksia, kuten mittapysyvyyttä, lujuusominaisuuksia, liimattavuutta, työstettävyyttä ja palo-ominaisuuksia, testattiin. Hankkeessa tuotettiin myös uudella tavalla modifioitua puuraaka-ainetta puujalostusyrityksille, jotka valmistivat niistä jatkotestausta varten tuotteita, mm. paloikkunan, puupylväitä ja ulkoverhouslautaa.

Vesilasikyllästys ja sen jälkeinen lämpökäsittely 125 °C:ssa ei parantanut puumateriaalin mittapysyvyyttä kosteusvaihteluissa. Kyseessä oli kuitenkin alkukehitysvaiheessa oleva tuote, jota on myöhemmin kehitetty mm. muuttamalla vesilasiliuoksen konsentraatiota ja lämpökäsittelylämpötilaa. Näillä toimilla on vesilasikyllästetyn puun dimensiostabiliteettia saatu parannettua.

Tässä hankkeessa puun taivutuslujuus, kimmokerroin taivutuksessa ja leikkauslujuus testattiin pienillä virheettömillä koekappaleilla. Testit osoittivat, että vesilasikyllästys 6,6-prosenttisella liuoksella ja siihen yhdistetty uunikuuminen 160 °C:n lämpötilassa eivät oleellisesti vaikuta puun taivutus- tai leikkauslujuuteen. Sen sijaan kimmokerroin taivutuksessa aleni hieman tätä käsittelyä käytettäessä. Raa-

kamäntyöljykeitto 148 °C:ssa ja 136 °C:ssa ei vaikuttanut kimmokertoimeen taivutuksessa, mutta puun taivutuslujuutta ja erityisesti leikkauslujuutta se näyttää alentavan. Tämän testin tuloksia ei voi suoraan soveltaa puurakenteissa, koska kyseessä olivat pienet, virheettömät koekappaleet. Jatkotutkimuksia tarvitaan todellisilla sahatavaradimensioilla.

Liimattavuutta tutkittiin vastaavilla materiaaleilla kuin lujuusominaisuuksia. Käytetyt liimat olivat kylmäkovettuvat melamiini-formaldehydihartsit, melamiini-urea-formaldehydihartsit, fenoli-resorsinoli-formaldehydihartsit ja kosteuskovettuva polyuretaani-liima. Vesilasikyllästys ja sen jälkeinen lämpökäsittely 160 °C:ssa eivät oleellisesti heikentäneet liimasauman leikkauslujuutta. Ainoa poikkeus oli polyuretaani-liima, jolla liimasauman leikkauslujuus oli vesilasimateriaalissa selvästi alempi kuin käsittelemättömässä referenssimateriaalissa. On mahdollista, että vesilasimateriaalia polyuretaani-liimalla liimattaessa on tapahtunut jokin virhe, koska vesilasimateriaalin ja sen referenssikappaleiden liimasauman delaminointuminen oli hyvin suurta. Referenssikappaleiden liimasauman kokonaisdelaminointiaste oli peräti 21 %, kun sen pitäisi liimapuupalkissa olla alle 5 %. Mäntyöljykäsitteltyjen materiaalien liimasauman leikkauslujuudet olivat kaikilla liimoilla selvästi pienemmät kuin käsittelemättömien vertailukappaleiden. Liimasauman delaminointuminen oli myös suurempaa mäntyöljykäsitteltyillä kappaleilla kuin käsittelemättömillä. Puus-tamurtumaprosenteissa ei kuitenkaan ollut merkittävää eroa. Voidaan siis olettaa, että mäntyöljykäsittely heikentää hieman puun liimattavuutta tutkituilla liimoilla.

Tässä hankkeessa tehdyt vesilasikyllästetyn materiaalin höyläys- ja jyrsintäkokeet eivät osoittaneet terien suurempaa kulumista vesilasimateriaalilla kuin käsittelemättömällä referenssimateriaalilla. Todennäköisesti testierät olivat niin pienet, ettei eroja terien kulumisessa ehtinyt tulla esille. Vesilasikyllästetyn ulkoverhouslaudan höyläys palotestiseiniä varten kuitenkin osoitti höylän sivukutterien terien erittäin nopeaa kulumista, mikä näkyi ponttien työstöpinnan palamisena jo noin 100 jm:n höyläyksen jälkeen.

Paloikkunan testaus VTT:llä osoitti, että vesilasikyllästetystä puusta valmistetulla ikkunalla on potentiaalia täyttää sekä sisä- että ulkopuolelta testattaessa paloluokan EI30 vaatimukset. SBI-palonkestotesti MeKA:ssa Latviassa osoitti, että vesilasikyllästetyllä ulkoverhouspaneelilla on potentiaalia täyttää paloluokka D, s1, d0. SBI-testin tulokseen tulee suhtautua varauksella, koska testimateriaalin vesilasijäämä on suuren sydänpuuosuuden takia jäänyt varsin pieneksi.

Vesilasikyllästetyn höyläkutteripurun (vesilasipitoisuus 13 % puun kuivapainosta) polttokoe osoitti, että savukaasupäästöt (O₂, CO₂, CO, NO_x, hiukkaset) eivät oleellisesti poikenneet käsittelemättömän kutteripurun savukaasupäästöistä. Vesilasipurun poltto oli muuten ongelmaton, mutta poltettaessa yksistään vesilasipurua, tuhka sintraantui sekä tarttui tulipesän seinille ja arinaan lasimaiseksi laataksi. Vesilasipurun sekoittaminen puoliksi pellettien kanssa poisti tämän ongelman, joten korkeajäämäistä vesilasipurua ei tulisi polttaa yksistään vaan yhdessä muiden polttoaineiden kanssa.



23.04.2010

ETTEPLAN
Lappeenranta
Heikki Tenovaara

KyAMK

Modifiointiklusteri/KyAMK

**KYLLÄSTYSSYLINTERI
KL100617**

**LUJUUSTARKASTELU
EN 13445-3**

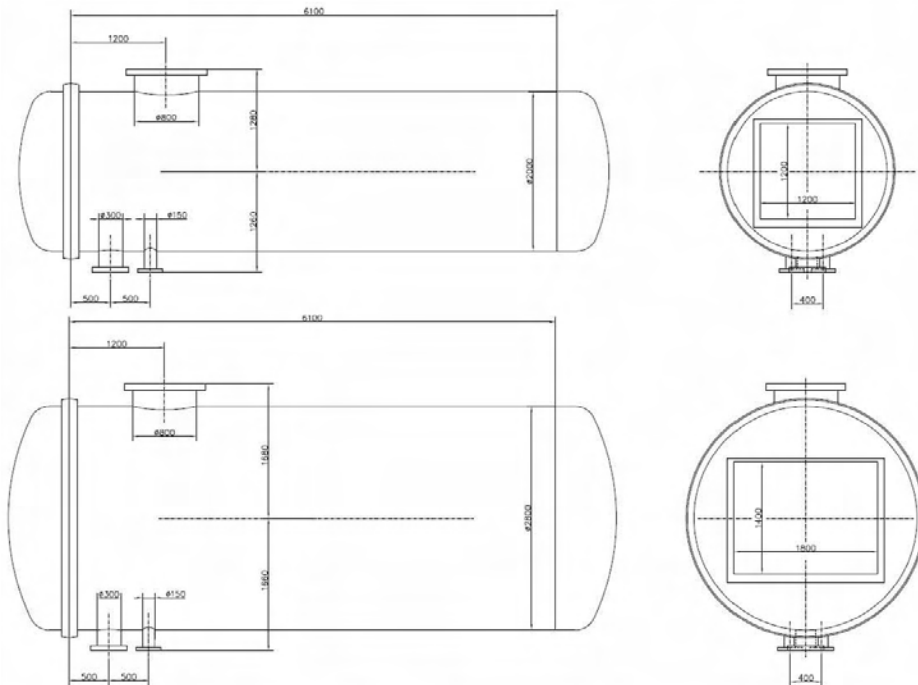
Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Laskenta	4
2.1	Kuormitukset ja materiaalit	4
2.1.1	Kuormitukset	4
2.1.2	Materiaalit	4
2.2	Tulokset	4
2.2.1	Seinämänvahvuusvaatimukset	4
2.2.2	Vaipan aukkojen vahvistukset	5
2.2.3	Yhteiden sijainti	5
2.2.4	Vaipan lommahdusjäykisteet	6
3	Yhteenveto	6
	LIITE 1: Piirustukset	7

1 Johdanto

Tässä lujuustarkastelussa on tutkittu kyllästyssylinterien seinämävahvuusvaatimuksia. Tutkitut osat ovat sylinterin vaippa, kaaripäädät sekä kolme erikokoista yhdettä aukkovahvistuksineen. Laskenta tehtiin standardin EN 13445-3 mukaisesti käyttäen *Visual Vessel Design 10.2* -ohjelmaa.

Laskennassa ei ole tarkastelu eikä mitoitettu päädyn laippaliitosta, vaipan lommahdusjäykisteitä eikä sylinterin tuentaa.



Kuva 1. Kyllästyssylinterit D2000 ja D2800.

2 Laskenta

2.1 Kuormitukset ja materiaalit

2.1.1 Kuormitukset

Lujuuslaskenta tehtiin seuraavilla lähtöarvoilla kahdelle eri sylinterikoolle (D2000 ja D2800). Mikäli joku luetelluista arvoista muuttuu tai poikkeaa todellisuudessa tai mikäli rakenteeseen kohdistuu merkittäviä ulkoisia kuormituksia, tulee laskenta suorittaa uudelleen tai vähintään tarkistaa muutoksen vaikutus lopputulokseen.

- Paine 15 bar / -1 bar
- Lämpötila +220 °C / +100 °C
- Testausryhmä 3 (hitsien lujuuskerroin 0.85)
- Korroosiovara 0 mm
- Levyjen alitoleranssi 0.3 mm; putkien alitoleranssi 10 %

2.1.2 Materiaalit

- Vaippa: Hitsattu levyistä EN 1.4307
- Päädyt: Levyistä hitsatut kaaripäädyt EN 1.4307; laskennassa käytetty päätytyyppiä SMS 482 / Korbogen (seinämänvahvuusvaatimus voi muuttua käytettäessä erityyppistä päätyä)
- Yhteet (D150...D800): Hitsattu putki EN 1.4307
- Yhteiden vahvistusrenkaat: Levy EN 1.4307

Taulukko 1. Materiaaliarvot EN 10028-7 1.4307. Sallittu jännitys EN 13445-3 mukaisesti.

Lämpötila T	Myötöraja R _{p0.2}	Myötöraja R _{p1.0}	Murtolujuus R _m	Sallittu jännitys f	Kimmomoduli E
+20 °C	200 MPa	240 MPa	500 MPa	167 MPa	200 000 MPa
+100 °C	147 MPa	181 MPa	410 MPa	137 MPa	190 000 MPa
+220 °C	114 MPa	143 MPa	356 MPa	119 MPa	183 000 MPa

2.2 Tulokset

2.2.1 Seinämänvahvuusvaatimukset

Taulukkoon 2 on koottu D2000 ja D2800 kyllästysylinterien minimiseinämänvahvuusvaatimukset eri olosuhteissa. Tyhjiöpaineiden kohdalla on esitetty seinämävaatimus sekä jäykistämättömälle että jäykistetyille vaipalle. Taulukossa esitetyt yhteiden seinämänvahvuudet ovat yksittäisen putken minimivaatimuksia; on tärkeää huomata, että

kaikki vaipan aukot vaativat yhteiden seinämien paksuntamisen lisäksi erillisen lisävahvistuksen.

Taulukko 2. Tulokset.

D [mm]	P [bar]	T [°C]	e _{vaippa} [mm]	e _{paaty} [mm]	e _{D800} [mm]	e _{D300} [mm]	e _{D150} [mm]	Huom.
2000	15	+ 220	16	15	8 ⁽¹⁾	4 ⁽²⁾	2 ⁽³⁾	
2000	15	+ 100	14	13	6 ⁽¹⁾	4 ⁽²⁾	2 ⁽³⁾	
2000	- 1	+ 100	26 / 14 ⁽⁴⁾	19	7	3	2	
2800	15	+ 220	22	20	8 ⁽⁵⁾	4 ⁽⁶⁾	2 ⁽³⁾	
2800	15	+ 100	20	18	6 ⁽⁵⁾	4 ⁽⁶⁾	2 ⁽³⁾	
2800	- 1	+ 100	32 / 20 ⁽⁷⁾	26	7	3	2	

¹⁾ Aukko vaatii yhteeltä seinämänvahvuuden 16 mm sekä molemminpuolisen vahvistusrankaan (2 kpI) 12x160

²⁾ Aukko vaatii yhteeltä seinämänvahvuuden 8 mm sekä vahvistusrankaan 8x140

³⁾ Aukko vaatii yhteeltä seinämänvahvuuden 6 mm sekä vahvistusrankaan 6x60

⁴⁾ Vaipan seinämänvahvuus 14 mm vaatii jäykisterenkaat; vahvuus 26 mm toimii ilman jäykisteitä

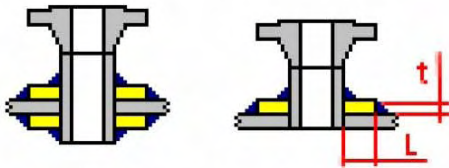
⁵⁾ Aukko vaatii yhteeltä seinämänvahvuuden 16 mm sekä molemminpuolisen vahvistusrankaan (2 kpI) 15x180

⁶⁾ Aukko vaatii yhteeltä seinämänvahvuuden 8 mm sekä vahvistusrankaan 10x150

⁷⁾ Vaipan seinämänvahvuus 20 mm vaatii jäykisterenkaat; vahvuus 32 mm toimii ilman jäykisteitä

2.2.2 Vaipan aukkojen vahvistukset

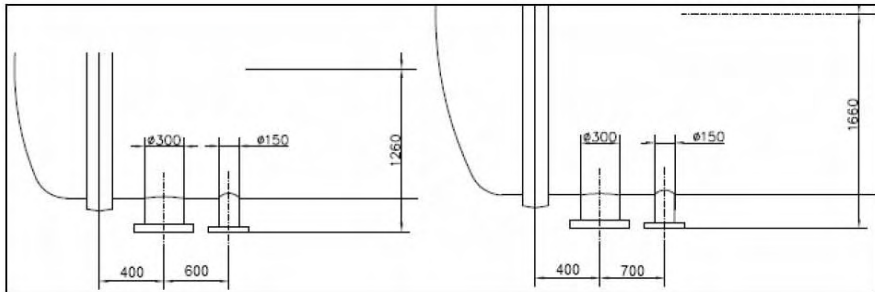
Kaikki vaipan yhteydet vaativat taulukossa 2 esitettyjen vaipan seinämien arvoilla vahvistusrenkaat. D800-yhteydet vaativat vahvistusrankaan sekä vaipan ulko- että sisäpuolelle. D300- ja D150-yhteisiin riittää ulkopuolinen rengas. Rakenneperiaatteet näkyvät kuvassa 2.



Kuva 2. Yhteiden vahvistusrenkaiden rakenneperiaatteet; vasen D800, oikea D300 ja D150. Esimerkiksi D300-yhteen vahvistusrengas $t=8$ ja $L=140$.

2.2.3 Yhteiden sijainti

Kuvassa 3 on esitetty sylinterin alapuolen yhteiden minimietäisyydet toisistaan sekä päätylaipasta. Kaikki yhteydet on pyrittävä sijoittamaan siten, etteivät ne osu vaipan hitsisaumojen kohdalle.



Kuva 3. Yhteiden D300 ja D150 sijoittelu; vasen D2000, oikea D2800.

2.2.4 Vaipan lommahdusjäykisteet

Vaippojen minimiseinämvahvuudet laskettuna sisäisen ylipaineen (15 bar) mukaan eivät riitä kantamaan 1 bar alipainetta. Vaippa D2000 seinämävahvuudella 14 mm on tuettava jäykisteillä vähintään 500 mm välein ja vaippa D2800 seinämävahvuudella 20 mm on tuettava jäykisteillä vähintään 850 mm välein. Käyttämällä paksumpaa vaippalevyä, jäykisteiden tarve vähenee. Jäykisteet tulee mitoittaa erikseen.

3 Yhteenveto

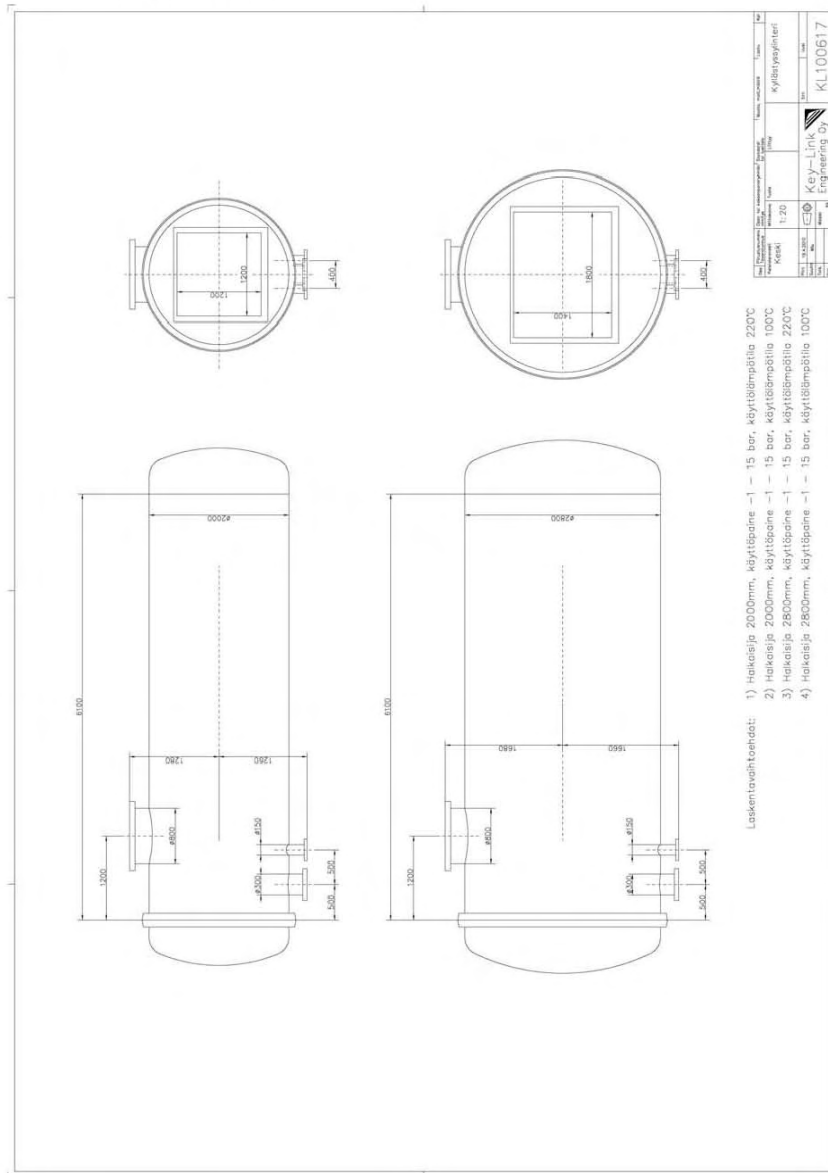
Tässä lujuustarkastelussa tutkittiin kylästyssylinterien standardin EN 13445 mukaisia seinämävahvuusvaatimuksia. Laskennan avulla määritettiin minimiseinämvahvuudet sylinterin vaipalle, kaaripäädylle sekä kolmelle erikokoiselle yhteelle aukkovahvistuksineen.

Kylästyssylinterin käyttöpainne 15 bar on suhteellisen korkea verrattuna säiliön halkaisijaan, jolloin vaipan seinämävahvuusvaatimus nousee melko korkeaksi. Vaippalevyn paksuuden optimointi johtaa lisäksi siihen, että sylinterin yhteiden aukot vaativat yhteiltä paksut seinämät sekä lisävahvistuksen.

Alipaine (1 bar) asettaa huomattavan suuren paksuusvaatimuksen vaippalevylle, joten lommahdusjäykisteiden käyttö on välttämätöntä käytettäessä ohuempaa vaipan seinämää.

Laskennassa ei ole tarkastelu eikä mitoitettu sylinterin päädyn laippaliitosta, vaipan lommahdusjäykisteitä eikä sylinterin tuentaa. Nämä tulee tehdä erikseen suunnittelun edistyessä.

LIITE 1: Piirustukset



Alipainejärjestelmän mitoitus		
Esimerkkinä vesilasikyllästys		
	Lähtötiedot	
Kyllästyserän koko		10 m ³
Puun lämpötila jälkikäsitteilyprosessin alussa		30 astetta
Puun lämpötila jälkikäsitteilyprosessin lopussa		25 astetta
Tyhjön määrä		50 %
Alipainepumpun moottorin koko		11 kw
Tyhjön prosessiaika		6 h
Kuivan puun om.lämpökäp		1340 J/kgK
Veden om. lämpökäp.		4190 J/kgK
Veden om. höyrytyslämpökäp.		2260000 J/kg
	1 kwh =	3,6 MJ
Puun kuivapaino kyllästysaineineen		530 kg/m ³
Kyllästyserän puiden kuivapaino kyllästysaineineen yhteensä		5300 kg
Puun alkukosteus		100 %
Puun loppukosteus		80 %
Puussa vettä prosessin alussa		5300 kg
Puun abs kuivapaino		5300 kg
Poistuvan veden kokonaismäärä jälkikäsitteilyprosessissa		1060 kg
Noin puolet jälkikäsitteilyprosessissa poistuvasta vedestä syntyy heti prosessin alussa valumista yms ja ne siirretään välittömästi varastosäiliöön		530 kg
Jäähdytystarve		
Puun jäähdytys		10 kWh
Puussa olevan veden jäähdytys		31 kWh
Puolet tyhjöjärjestelmään siirtyvästä vedestä ja samalla sen sisältämä energia siirretään varastosäiliöön, joka vähentää jäähdytystarvetta		-19 kWh
Jäähdytystarvetta lisää alipainepumpun moottorin hukkalämmön siirtyminen, joka määräksi on arvioitu 50% moottorin tehosta ja prosessiajasta		33 kWh
		55 kWh
Kokonaisjäähdytystarve		
Alipainepumpun tiivisteveden säiliön koko		2000 kg
Säiliön lämpötila alussa		20 astetta
Säiliön lämpötila lopussa		45 astetta
		58 kWh
Alipainepumpun tiivisteveden jäähdytyskyky		

Mäntyöljy-prosessin vaatima lämpöenergian ja -tehon tarve		
	Lähtötiedot	
Kyllästyserä		6 m3
Mäntyöljyn määrä kyllästysprosessissa		12 000 kg
Uuden mäntyöljyn lämmitystarve		600 kg
Puun alkulämpötila		20 astetta
Puun loppulämpötila		110 astetta
Mäntyöljyn alkulämpötila		140 astetta
Mäntyöljyn loppulämpötila		110 astetta
Kuivan puun om.lämpökap		1340 J/kgK
Veden om. lämpökap.		4190 J/kgK
Veden om. höyrytyslämpökap.		2260000 J/kg
Mäntyöljyn om. Lämpökap. (arvio)		3000 J/kgK
	1 kwh =	3,6 MJ
Puun paino		480 kg/m3
Kyllästyserän puiden kokonaispaino		2880 kg
Puun alkukosteus		18 %
Puun loppukosteus		12 %
Puussa vettä prosessin alussa		518,4 kg
Puun abs kuivapaino		2880 kg
Haihtuvan/höyrystyvän veden määrä		172,8 kg
Energiantarve kyllästysprosessissa		
Puun lämmitys		347328000 J
Puussa olevan veden lämmitys		195488640 J
Puussa olevan veden höyrytys		390528000 J
Jäähtyneen mäntyöljyn uudelleen lämmitys		1080000000 J
Uuden mäntyöljyn lämmitystarve		216000000 J
Yhteensä		2229,34464 MJ
Energiahäviöt		10 %
Yhden kylästyserän toteuttaminen vaatii energiaa		681,18864 kWh
Prosessiaika		4 h
TEHONTARVE TUNNISSA		170 KW/h
ENERGIANTARVE KW/M3		114 KW/M3
LÄMMÖNTUOTANTOON TARVITTAVAN KIERTOVEDEN MÄÄRÄ		
KIERTOVEDSI LÄHTÖ		170 C
KIERTOVEDSI PALUU		150 C
ENERGIANTARVE		2229,34464 MJ
ENERGIASISÄLTÖ KIERTOVEDSI LÄHTÖ		0,7123 MJ/KG
ENERGIASISÄLTÖ KIERTOVEDSI TULO		0,6285 MJ/KG
KIERTOVEDEN LUOVUTTAMA ENERGIA		0,0838 MJ/KG
TARVITTAVA KIERTOVEDSIMÄÄRÄ		27 M3
TARVITTAVA KIERTOVEDSIMÄÄRÄ TUNNISSA		6,7 M3/h
Huom! Laskelmassa ei ole huomioitu teräksien jäähtymistä ja uudelleen lämmitystä. Tämä kompensoidaan laskemalla mäntyöljyn uudelleen lämmittämisen energiantarve.		

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun julkaisusarjassa B. ilmestyneet julkaisut

B-SARJA Tutkimukset ja raportit

- B 1 Markku Huhtinen & al.:
Laivadieselien päästöjen vähentäminen olemassa olevissa laivoissa [1997].
- B 2 Ulla Pietilä, Markku Puustelli:
An Empiral Study on Chinese Finnish Buying Behaviour of International Brands [1997].
- B 3 Markku Huhtinen & al.:
Merenkulkualan ympäristönsuojelun koulutustarve Suomessa [1997].
- B 4 Tuulia Paane-Tiainen:
Kohti oppijakeskeisyyttä. Oppijan ja opettajan välisen ohjaavan toiminnan hahmottamista [1997].
- B 5 Markku Huhtinen & al.:
Laivadieselien päästöjä vähentävien puhdistuslaitteiden tuotteistaminen [1998].
- B 6 Ari Siekkinen:
Kotkan alueen kasvihuonepäästöt [1998]. Myynti: Kotkan Energia.
- B 7 Risto Korhonen, Mika Määttänen:
Veturidieseleiden ominaispäästöjen selvittäminen [1999].
- B 8 Johanna Hasu, Juhani Turtiainen:
Terveysalan karusellikoulutusten toteutuksen ja vaikuttavuuden arviointi [1999].
- B 9 Hilikka Dufva, Mervi Luhtanen, Johanna Hasu:
Kymenlaakson väestön hyvinvoinnin tila, selvitys Kymenlaakson väestön hyvinvointiin liittyvistä tekijöistä [2001].
- B 10 Timo Esko, Sami Uoti:
Tutkimussopimusopas [2002].
- B 11 Arjaterttu Hintsala:
Mies sosiaali- ja terveydenhuollon ammattilaisena – minunko ammattini? [2002].
- B 12 Päivi Mäenpää, Toini Nurminen:
Ohjatun harjoittelun oppimisympäristöt ammatillisen kehittymisen edistäjänä – ARVI-projekti 1999-2002 [2003], 2 p. [2005].
- B 13 Frank Hering:
Ehdotus Kymenlaakson ammattikorkeakoulun kestävän kehityksen ohjelmaksi [2003].
- B 14 Hilikka Dufva, Raija Liukkonen:
Sosiaali- ja terveysalan yrittäjyys Kaakkois-Suomessa. Selvitys Kaakkois-Suomen sosiaali- ja terveysalan palveluyrittäjyyden nykytilasta ja tulevaisuuden näkymistä [2003].

- B 15 Eija Anttalainen:
Ykköskuski: kuljettajien koulutustarveselvitys [2003].
- B 16 Jyrki Ahola, Tero Keva:
Kymenlaakson hyvinvointistrategia 2003 –2010 [2003], 2 p. [2003].
- B 17 Ulla Pietilä, Markku Puustelli:
Paradise in Bahrain [2003].
- B 18 Elina Petro:
Straightway 1996—2003. Kansainvälinen transitoreitin markkinointi [2003].
- B 19 Anne Kainlauri, Marita Melkko:
Kymenlaakson maaseudun hyvinvointipalvelut - näkökulmia maaseudun arkeen sekä mahdollisuuksia ja malleja hyvinvointipalvelujen kehittämiseen [2005].
- B 20 Anja Härkönen, Tuomo Paakkonen, Tuija Suikkanen-Malin, Pasi Tulkki:
Yrittäjyyskasvatus sosiaalialalla [2005]. 2. p. [2006]
- B 21 Kai Koski (toim.):
Kannattava yritys ei menetä parhaita asiakkaitaan. PK-yritysten liiketoiminnan kehittäminen osana perusopetusta [2005]
- B 22 Paula Posio, Teemu Saarelainen:
Käytettävyyden huomioon ottaminen Kaakkois-Suomen ICT-yritysten tuotekehityksessä [2005]
- B 23 Eeva-Liisa Frilander-Paavilainen, Elina Kantola, Eeva Suuronen:
Keski-ikäisten naisten sepelvaltimotaudin riskitekijät, elämäntavat ja ohjaus sairaalassa [2006]
- B 24 Johanna Erkamo & al.:
Oppimisen iloa, verkostojen solmimista ja toimivia toteutuksia yrittäjämässä oppimisympäristössä [2006]
- B 25 Johanna Erkamo & al.:
Luovat sattumat ja avoin yhteistyö ikäihmisten iloksi [2006]
- B 26 Hanna Liikanen, Annukka Niemi:
Kotihoidon liikkuvaa tietojenkäsittelyä kehittämässä [2006]
- B 27 Päivi Mäenpää
Kaakkois-Suomen ensihoidon kehittämisstrategia vuoteen 2010 [2006]
- B 28 Anneli Airola, Arja-Tuulikki Wilén (toim.):
Hyvinvointialan tutkimus- ja kehittämistoiminta Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa [2006]
- B 29 Arja-Tuulikki Wilén:
Sosiaalipäivystys – kehittämishankkeen prosessievaluatio [2006].
- B 30 Arja Sinkko (toim.):
Kestävä kehitys Suomen ammattikorkeakouluissa – SUDENET-verkostohanke [2007].
- B 31 Eeva-Liisa Frilander-Paavilainen, Mirja Nurmi, Leena Wäre (toim.):
Kymenlaakson ammattikorkeakoulu Etelä-Suomen Alkoholiohjelman kuntakumppanuudessa [2007].

- B 32 Erkki Hämäläinen & Mari Simonen:
Siperian radan tariffikorotusten vaikutus konttiliikenteeseen 2006 [2007].
- B 33 Eeva-Liisa Frilander-Paavilainen & Mirja Nurmi:
Tulevaisuuteen suuntaava tutkiva ja kehittävä oppiminen avoimissa ammattikorkeakoulun oppimisympäristöissä [2007].
- B 34 Erkki Hämäläinen & Eugene Korovyakovsky:
Survey of the Logistic Factors in the TSR-Railway Operation - "What TSR-Station Masters Think about the Trans-Siberian?" [2007].
- B 35 Arja Sinkko:
Kymenlaakson hyvinvoinnin tutkimus- ja kehittämiskeskus (HYTKES) 2000-2007. Vaikuttavuuden arviointi [2007].
- B 36 Erkki Hämäläinen & Eugene Korovyakovsky:
Logistics Centres in St Petersburg, Russia: Current status and prospects [2007].
- B 37 Hilikka Dufva & Anneli Airola (toim.):
Kymenlaakson hyvinvointistrategia 2007 - 2015 [2007].
- B 38 Anja Härkönen:
Turvallista elämää Pohjois-Kymenlaaksossa? Raportti Kouvolan seudun asukkaiden kokemasta turvallisuudesta [2007].
- B 39 Heidi Nousiainen:
Stuuva-tietokanta satamien työturvallisuustyön työkaluna [2007].
- B 40 Tuula Kivilaakso:
Kymenlaaksolainen veneenveistoperinne: venemestareita ja mestarillisia veneitä [2007].
- B 41 Elena Timukhina, Erkki Hämäläinen, Soma Biswas-Kauppinen:
Logistic Centres in Yekaterinburg: Transport - logistics infrastructure of Ural Region [2007].
- B 42 Heidi Kokkonen:
Kouvola muuttajan silmin. Perheiden asuinpaikan valintaan vaikuttavia tekijöitä [2007].
- B 43 Jouni Laine, Suvi-Tuuli Lappalainen, Pia Paukku:
Kaakkois-Suomen satamasidonnaisten yritysten koulutustarveselvitys [2007].
- B 44 Alexey V. Rezer & Erkki Hämäläinen:
Logistic Centres in Moscow: Transport, operators and logistics infrastructure in the Moscow Region [2007].
- B 45 Arja-Tuulikki Wilén:
Hyvä vanhusten hoidon tulevaisuus. Raportti tutkimuksesta Kotkansaaren sairaalassa 2007 [2007].
- B 46 Harri Ala-Uotila, Eeva-Liisa Frilander-Paavilainen, Ari Lindeman, Pasi Tulkki (toim.):
Oppimisympäristöistä innovaatioiden ekosysteemiin [2007].
- B 47 Elena Timukhina, Erkki Hämäläinen, Soma Biswas-Kauppinen:
Railway Shunting Yard Services in a Dry-Port. Analysis of the railway shunting yards in Sverdlovsk-Russia and Kouvola-Finland [2008].

- B 48 Arja-Tuulikki Wilén:
Kymenlaakson muisti- ja dementiaverkosto. Hankkeen arviointiraportti [2008].
- B 49 Hillka Dufva, Anneli Airola (toim.):
Puukuidun uudet mahdollisuudet terveyden- ja sairaanhoidossa. TerveysSellu-hanke. [2008].
- B 50 Samu Urpalainen:
3D-voimalaitossimulaattori. Hankkeen loppuraportti. [2008].
- B 51 Harri Ala-Uotila, Eeva-Liisa Frilander-Paavilainen, Ari Lindeman (toim.):
Yrittäjämäisen toiminnan oppiminen Kymenlaaksossa [2008].
- B 52 Peter Zashev, Peeter Vahtra:
Opportunities and strategies for Finnish companies in the Saint Petersburg and Leningrad region automobile cluster [2009].
- B 53 Jari Handelberg, Juhani Talvela:
Logistiikka-alan pk-yritykset versus globaalit suuroperaattorit [2009].
- B 54 Jorma Rytönen, Tommy Ulmanen:
Katsaus intermodaalikuljetusten käsitteisiin [2009].
- B 55 Eeva-Liisa Frilander-Paavilainen:
Lasten ja nuorten terveys- ja tapakäyttäytyminen Etelä-Kymenlaakson kunnissa [2009].
- B 56 Kirsi Rouhiainen:
Viisasten kiveä etsimässä: miksi tradenomiopiskelija jättää opintonsa kesken? Opintojen keskeyttämisen syiden selvitys Kymenlaakson ammattikorkeakoulun liiketalouden osaamisalalla vuonna 2008 [2010].
- B 57 Lauri Korppas - Esa Rika - Eeva-Liisa Kauhanen:
eReseptin tuomat muutokset reseptiprosessiin [2010].
- B 58 Kari Stenman, Rajka Ivanis, Juhani Talvela, Juhani Heikkinen:
Logistiikka & ICT Suomessa ja Venäjällä [2010].
- B 59 Mikael Björk, Tarmo Ahvenainen:
Kielelliset käytänteet Kymenlaakson alueen logistiikkayrityksissä [2010].
- B 60 Anni Mättö:
Kylälaisten metsävarojen käyttö ja suhtautuminen metsien häviämiseen Mzuzun alueella Malawissa [2010].
- B 61 Hillka Dufva, Juhani Pekkola:
Turvallisuusjohtaminen moniammatillisissa viranomaisverkostoissa [2010].
- B 62 Kari Stenman, Juhani Talvela, Lea Värtö:
Toiminnanohjausjärjestelmä Kymenlaakson keskussairaalan välinehuoltoon [2010].
- B 63 Tommy Ulmanen, Jorma Rytönen:
Intermodaalikuljetuksiin vaikuttavat häiriöt Kotkan ja Haminan satamissa [2010].
- B 64 Mirva Salokorpi, Jorma Rytönen:
Turvallisuus ja turvallisuusjohtamisjärjestelmät satamissa [2010].

- B 65 Soili Nysten-Haarala, Katri Pynnöniemi (eds.):
Russia and Europe: From mental images to business practices [2010].
- B 66 Mirva Salokorpi, Jorma Rytönen:
Turvallisuusjohtamisen parhaita käytäntöjä merenkulkijoille ja satamille [2010].
- B 67 Hannu Boren, Marko Viinikainen, Ilkka Paajanen, Viivi Etholen:
Puutuotteiden ja -rakenteiden kemiallinen suojaus ja suojauksen markkina-potentiaali [2011].
- B 68 Tommy Ulmanen, Jorma Rytönen, Taina Lepistö:
Tavaravirtojen kasvusta ja häiriötekijöistä aiheutuvat haasteet satamien intermodaalijärjestelmälle [2011].
- B 69 Juhani Pekkola, Sari Engelhardt, Jussi Hänninen, Olli Lehtonen, Pirjo Ojala:
2,6 Kestävä kansakunta. Elinvoimainen 200-vuotias Suomi [2011].
- B 70 Tommy Ulmanen:
Strategisen osaamisen johtaminen satama-alueen Seveso-laitoksissa [2011].
- B 71 Arja Sinkko:
LCCE-mallin käyttöönotto tekniikan ja liikenteen toimialalla – ensiaskeleina tuotteistaminen ja sidosryhmäyhteistyön kehittäminen [2012].
- B 72 Markku Nikkanen:
Observations on Responsibility – with Special reference to Intermodal Freight Transport Networks [2012].
- B 73 Terhi Suuronen:
Yrityksen arvon määrittäminen yrityskauppatilanteessa [2012].
- B 74 Hanna Kuninkaanniemi, Pekka Malvela, Marja-Leena Saarinen (toim.):
Research Publication 2012 [2012].
- B 75 Tuomo Väärä, Reeta Stöd, Hannu Boren:
Moderni painekyllästys ja uusien puutuotteiden testaus aidossa, rakennetussa ympäristössä. Jatkohankkeen loppuraportti [2012].
- B 76 Ilmari Larjavaara
Vaikutustapojen monimuotoisuus B-to-B-markkinoinnissa Venäjällä - lahjukset osana liiketoimintakulttuuria [2012].
- B 77 Anne Fransas, Enni Nieminen, Mirva Salokorpi, Jorma Rytönen:
Maritime safety and security. Literature review [2012].
- B 78 Juhani Pekkola, Olli Lehtonen, Sanna Haavisto:
Kymenlaakson hyvinvointibarometri 2012. Kymenlaakson hyvinvoinnin kehitys-suuntia viranhaltijoiden, luottamushenkilöiden ja ammattilaisten arvioimana [2012].
- B 79 Auli Jungner (toim.):
Sosionomin (AMK) osaamisen työelämälähtöinen vahvistaminen. Ongelmaperustaisen oppimisen jalkauttaminen työelämäyhteistyöhön [2012].
- B 80 Mikko Mylläri, Jouni-Juhani Häkkinen:
Biokaasun liikennekäyttö Kymenlaaksossa [2012].

- B 81 Riitta Leviäkangas (toim.):
Yhteiskuntavastuuraportti 2011 [2012].
- B 82 Riitta Leviäkangas (ed.):
Annual Responsibility Report 2011 [2012].
- B 83 Juhani Heikkinen, Janne Mikkala, Niko Jurvanen
Satamayhteisön PCS-järjestelmän pilotointi Kaakkois-Suomessa.
Mobiilisatama-projektin työpaketit WP4 ja WP5, loppuraportti 2012 [2012].

