



Luonnonvara- ja  
biotalouden  
tutkimus 11/2018

## Puun ominaisuuksien modifiointi

Menetelmät ja tutkimuksen tila

Veikko Möttönen, Hannu Boren ja Henrik Heräjärvi

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2018

# **Puun ominaisuuksien modifiointi**

Menetelmät ja tutkimuksen tila

Veikko Möttönen, Hannu Boren ja Henrik Heräjärvi



Möttönen, V., Boren, H. ja Heräjärvi, H. 2018. Puun ominaisuuksien modifiointi : Menetelmät ja tutkimuksen tila. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2018. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 57 s.

ISBN 978-952-326-545-5 (Painettu)

ISBN 978-952-326-546-2 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-546-2>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Veikko Möttönen, Hannu Boren ja Henrik Heräjärvi

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2018

Julkaisuvuosi: 2018

Kannen kuva: Henrik Heräjärvi

Painopaikka ja julkaisumyynti: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

# Tiivistelmä

Veikko Möttönen, Hannu Boren ja Henrik Heräjärvi  
Luonnonvarakeskus Joensuu, Yliopistokatu 6, 80100 JOENSUU

Tässä julkaisussa tarkastellaan puun ominaisuuksien fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia muokkaus- eli modifiointimenetelmiä. Näillä menetelmillä on tavoitteena parantaa sekä puun alun perin hyviä ominaisuuksia että sen käyttöä rajoittavia ominaisuuksia. Modifioinnilla tarkoitetaan käsittelyjä, joissa puuhun ei lisätä eikä siitä käytön aikana liukene ympäristöön eliölle haitallisia kemikaaleja eli biosidejä, ja että tuotetta elinkaarensa lopuksi hävitettäessä syntyvät ympäristöhaitat eivät ylitä modifioimattoman puun hävittämisestä syntyviä haittoja.

Julkaisun alussa on käsitelty lähemmin niitä ominaisuuksia, joihin modifioinnilla pyritään pääasiassa vaikuttamaan: biologinen ja kosteudenkestävyys, mekaaninen kestävyys, palonkestävyys, säänkestävyys ja pH. Tämän jälkeen käydään läpi käytössä sekä kehitteillä olevia modifiointimenetelmiä. Fysikaalisista modifiointimenetelmistä huomattavinta kaupallista merkitystä on lämpökäsittelyllä, jonka määrä ylittää selvästi muut modifiointimenetelmät ja on kasvanut vuosittain 2000-luvun alusta saakka. Kaupallistettuja kemiallisia puun modifiointimenetelmiä ovat asetylointi, furfulointi, öljy- ja vahakäsittelyt sekä muutamat polymeerimodifiointimenetelmät.

Kehitteillä olevia modifiointimenetelmiä on tässä työssä selvitetty tutkimusjulkaisuista ja muista saatavilla olevista lähteistä. Merkittävä tutkimuksen ja kehittämisen kohde tällä hetkellä ovat puunsuoja-aineiksi soveltuvat luontaiset kemikaalit, koska biosideille etsitään ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja. Puumateriaalin ja erityisesti sen pinnan puristamista yhdistettynä lämpökäsittelyyn tutkitaan ja kehitetään sekä teollisuudessa että tutkimuslaitoksissa. Myös kemiallisten ja fysikaalisten modifiointimenetelmien yhdistämistä kehitetään. Suurin haaste modifioitujen puutuotteiden kaupallistamisessa on valmistuskustannus: tuotantoprosessi ja tarvittavat tuotannontekijät on vaikea saattaa kustannustasolle, joka mahdollistaisi hinnaltaan elinkelpoisten tuotteiden valmistamisen. Myös jo kaupallisessa tuotannossa olevia modifiointimenetelmiä kehitetään jatkuvasti niiden taloudellisuuden ja teknisen kilpailukyvyn parantamiseksi.

Julkaisussa on käsitelty myös modifioitujen puutuotteiden testausta, testausstandardien soveltuvuutta modifioidulle puulle sekä standardien käyttöön liittyviä erityispiirteitä modifioidulla puulla.

Asiasanat: Fysikaalinen modifiointi, Kemiallinen modifiointi, Lahonsuojaus, Lämpömodifiointi, Palonsuojaus, Polymeerimodifiointi, Puun modifiointi, Puristusmodifiointi, Termo-mekaaninen modifiointi

# Alkusanat

Ajatus tästä kirjallisuustarkastelusta syntyi jo vuonna 2012, jolloin Metsäntutkimuslaitoksessa valmisteltiin hanketta ” Puun ominaisuuksien modifiointi ja modifioidun puun markkinamahdollisuudet puutuotealalla”. Kirjallisuustarkastelun tekeminen kuitenkin viivästyi kiireellisempien, usein yritysyhteistyönä toteutettujen modifiointitutkimusten ajettua kirjallisuustyöstä ohi. Asia nousi ajankohtaiseksi uudelleen talvella 2016–2017, jolloin Luonnonvarakeskuksessa tuli mahdollisuus hyödyntää raportin täydentämisessä kyllästys- ja palonsuojauskysymyksiin perehtyneen MMT Hannu Borenin asiantuntemusta.

Joulukuussa 2017 – tämän raportin käsikirjoituksen viimeistelyvaiheessa – ilmestyi englanninkielinen puun modifiointitekniikoita kuvaava kirjallisuustarkastelu (Sandberg ym. 2017). Näissä kahdessa raportissa on osin päällekkäistä tietoa, mutta painotuksissa, asiasisällöissä ja tarkastelun laajuudessa on selviä eroja. Raportit täydentävät toisiaan ajatellen esimerkiksi opetuskäyttöä suomalaisissa oppilaitoksissa.

Tätä raporttia on tarkoitus päivittää, kun uutta tietoa karttuu riittävästi tai jos ilmiöiden tulkinnat muuttuvat. Säännölliset tai usein toistuvat muutokset, kuten yksittäisten testausstandardien uusien versioiden ilmestyminen, ei aiheuta välitöntä raportin päivitystarvetta. Raportista on pyritty tekemään selkokielinen ja se kirjoitettiin suomeksi, jotta siitä olisi aitoa hyötyä paitsi tutkijoille myös puun modifioinnista kiinnostuneille opiskelijoille samoin kuin modifiointialan käytännön toimijoille.

Kirjoittajat kiittävät Metsäntutkimuslaitosta ja Luonnonvarakeskusta tutkimustyön aikaresursoinnista.

Joensuu, maaliskuu 2018

Kirjoittajat

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Puun modifioinnin määritelmiä.....</b>	<b>7</b>
2.1. Yleismääritelmiä.....	7
2.2. Kemiallinen modifiointi.....	7
2.3. Fysikaalinen modifiointi .....	8
<b>3. Modifioinnin vaikutus puumateriaalin ominaisuuksiin.....</b>	<b>10</b>
3.1. Biologinen ja kosteuden kestävyys .....	10
3.2. Mekaaninen kestävyys ja pinnankovuus.....	11
3.3. Palonkestävyys.....	12
3.4. Säänkestävyys .....	14
3.5. pH.....	15
<b>4. Kaupalliset puun modifiointimenetelmät .....</b>	<b>16</b>
4.1. Lämpökäsittelymenetelmät .....	16
4.2. Puun lämpömodifioinnin tutkimus- ja kehitystyö.....	17
4.3. Puun kemialliset modifiointimenetelmät .....	22
4.3.1. Asetylointi .....	22
4.3.2. Furfulointi.....	23
4.3.3. DMDHEU -kyllästys.....	23
4.4. Muut kemialliset puun ominaisuuksien muokkausmenetelmät .....	23
4.4.1. Ammoniakkikäsittely .....	23
4.4.2. Öljy-, vaha- ja parafiinikyllästys.....	24
4.4.3. Piipohjaiset kyllästysmenetelmät .....	25
<b>5. Kehitteillä olevat modifiointimenetelmät ja niiden tutkimus .....</b>	<b>27</b>
5.1. Termo-hydro-mekaaniset menetelmät .....	27
5.2. Kemialliset modifiointimenetelmät .....	28
5.2.1. Nanopartikkeleihin perustuva puun modifiointi.....	28
5.2.2. Puun suojaus luontaisilla kemikaaleilla.....	29
5.2.3. Lämpökäsittelyn ja kemiallisen modifioinnin yhdistäminen .....	30
<b>6. Puupinnan modifiointimenetelmät .....</b>	<b>31</b>
<b>7. Modifioitujen puutuotteiden ja materiaalin testaus .....</b>	<b>32</b>
7.1. Muutokset ominaisuuksissa ja standardien mukainen testaus .....	32
7.2. Standardien soveltuvuus modifioidulle puulle .....	33
7.2.1. Standardien soveltuvuus modifioidun puun biologisen kestävyden testaukseen .....	33
7.2.2. Standardien soveltuvuus kyllästys- ja modifiointiaineiden jäämien analysointiin.....	34
7.2.3. Standardien soveltuvuus modifioitujen puutuotteiden homehtumisen ja lahoamisen testaukseen käyttöluokissa 2 ja 3.....	35
7.3. Palontestaus.....	35
<b>8. Johtopäätökset modifioitujen puutuotteiden tutkimuksen nykytilasta ja tulevaisuuden tutkimustarpeista .....</b>	<b>37</b>
<b>Viitteet .....</b>	<b>39</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>50</b>

# 1. Johdanto

Puutuotteiden modifiointi eli ominaisuuksien myrkytön muokkaus on teollisuudenalana verraten tuore. Aihepiirin tutkimusta ja tuotekehitystä on tehty eri puolilla maailmaa yli sata vuotta ja yksittäisten yritysten kaupallistamia sovelluksia on ollut markkinoilla ainakin 1950-luvulta lähtien. Ensimmäinen merkittävä teollisen mittakaavan modifiointitapa, lämpökäsittely, kaupallistettiin kuitenkin vasta 1990-luvun lopussa. Tämän jälkeen markkinoille on tullut muutamia muitakin modifioituja puutuotteita. Lämpökäsittely puu, jota eri muodoissaan tuotetaan maailmalla 200000–300000 kuutiometriä vuodessa, on erityisesti Suomessa jo lähes 200 000 kuutiometrin vuosituotannolla ([www.thermowood.fi](http://www.thermowood.fi)) mitaten merkittävä teollisuudenala, jolla toimii toistakymmentä yritystä.

Metsien kestävä käyttö tulevaisuudessa ja uusien modifioitujen puutuotteiden tulo markkinoille asettaa haasteita luokittelulle ja standardoinnille, ja haasteisiin pyritään vastaamaan uudistamalla eurooppalaisia standardeja niin, että loppukäyttäjät voisivat hyödyntää niitä arvioidessaan tuotteiden elinkaarta ja ympäristösuorituskykyä (Kutnik ym. 2014). Eliöyhteisöille vaaralliset tai haitalliset puunsuojakemikaalit (biosidit) kohtaavat kasvavia vaikeuksia ympäristö-, elintarvike- ja terveystämääräysten tiukentuessa. Myös kuluttajat hakevat uusia tuotteita, joiden ympäristöjalanjälki olisi aiempia pienempi, mutta ominaisuudet esimerkiksi biologisen kestävyuden osalta vähintään aiemmalla tasolla. Yhtälö on vaikea. Tutkijayhteisö ja yritykset tekevät koko ajan töitä sadoissa tutkimus- ja kehittämishankkeissa, jotta löydettäisiin kaupallisesti elinkelpoisia, haitta-ainevapaita puunsuojausmenetelmiä. Osa menetelmistä toimii laboratoriomittakaavassa, mutta ei teollisesti. Osa toimisi ongelmitta myös teollisesti, mutta tuotteiden hinta muodostuisi liian korkeaksi. Vasta puolisenkymmentä modifiointimenetelmää on onnistuttu kaupallistamaan, ja osa niistäkin kärsii heikosta kannattavuudesta.

Edellä mainituista syistä puun modifiointia koskevien tutkimusjulkaisujen määrä on lisääntynyt voimakkaasti 2000-luvulla. Yksittäisistä tutkimusjulkaisuista on kuitenkin vaikea saada kokonaiskuvaa alan tietämyksen tasosta ja eri menetelmien kehityksen tilasta. Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoite on koota nykytietämys puun modifioinnin aihepiiristä. Raportti keskittyy jo kaupallistettuihin tai kaupallistamisen kynnyksellä oleviin menetelmiin. Kokeilu- tai idea-asteella olevia menetelmiä tarkastellaan erityisesti niiden kehityspotentiaalia arvioitaessa. Raportin ulkopuolelle on yksiselitteisesti rajattu biosideillä kyllästäminen, pintakäsittelymenetelmät ja rakenteellisen puunsuojauksen menetelmät. Niin ikään menetelmät, jotka perustuvat esimerkiksi sähkövirran käyttöön puun kuivauksessa tai suojauksessa, jätetään tässä raportissa analysoimatta tarkemmin. Tässä kirjallisuustarkastelussa on keskitytty suomen- ja englanninkielisiin julkaisuihin. On tiedossa, että mm. ranskan, saksan, ruotsin, venäjän, kiinan, korean ja japanin kielillä on julkaistu puun modifiointia käsitteleviä tutkimusraportteja ja opinnäytetöitä, joita kirjoittajat eivät kuitenkaan ole voineet käydä läpi joko kieli- tai ajankäyttörajoitteiden vuoksi. Niin ikään kaikkia modifioitujen puutuotteiden ominaisuusvaatimuksia ei ole käyty läpi samalla tarkkuudella: esimerkiksi palonsuojauksikysymyksiä käsitellään vähemmän kuin biologista kestävyyttä, josta on käytettävissä huomattavasti palo-ominaisuuksia enemmän tutkimustietoa.

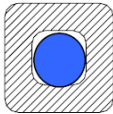

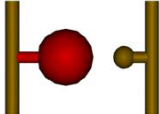
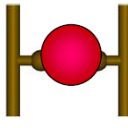

## 2. Puun modifioinnin määritelmiä

### 2.1. Yleismääritelmiä

Standardin EN 350:2016 mukaan modifioidulla puulla tarkoitetaan puuta, jonka jokin haluttu ominaisuus on parantunut pysyvästi kemiallisen, biologisen tai fysikaalisen käsittelyn vaikutuksesta (CEN 2016). Jos modifioinnilla on tavoiteltu parantunutta biologista kestävyyttä, standardissa käsittelytavan oletetaan olevan ei-biosidinen. Oppikirjassaan Hill (2006) määritteli puun modifioinnin prosessiksi, joka parantaa puun materiaaliominaisuuksia siten, että tuotetta elinkaarensa lopuksi hävitettäessä syntyvät ympäristöhaitat eivät ylitä modifioimattoman puun hävittämisessä syntyviä haittoja.

Modifioinnilla pyritään muuttamaan puun ominaisuuksia muuttamalla puun soluseinän rakenteosien molekyyli-rakennetta. Modifioinnin tarkoitus voi olla esimerkiksi puumateriaalin lahonkeston, vedenhylykivyyden, mitta- ja muotopysyvyyden, palonkeston, UV-valonkeston tai mekaanisten ominaisuuksien parantaminen. Puun modifioinnilla voidaan vaikuttaa materiaaliin aktiivisesti, jolloin materiaalissa tapahtuu kemiallisia muutoksia, tai passiivisesti, jolloin materiaalin ominaisuudet muuttuvat ilman kemiallisia muutoksia (Hill 2006). Hill (2006) määrittelee kemiallisen modifioinnin kemiallisen reagenssin ja puun polymeerien väliseksi reaktioksi, jossa puumateriaalin ja reagenssin välille syntyy kovalenttisia sidoksia, kun taas Kumarin (1994) mukaan kemialliseen modifiointiin kuuluu myös puun ominaisuuksien parantaminen tihentämällä sitä hartsin avulla siten, että hartsi tunkeutuu puun huokostilaan ja kovettuaan ankkuroituu fysikaalisesti puuhun kiinni. Homan & Jorissen (2004) määrittivät modifioinnin lämpökäsittelyksi sekä kemialliseksi tai entsyymaattiseksi käsittelyksi. Omana modifiointityypinään voidaan erottaa myös puupinnan modifiointi, jossa kemiallisen, fysikaalisen tai biologisen tekijän avulla tavoitellaan puupinnan ominaisuuksien paranemista (Petrič 2013).

Rowell & Konkol (1987) ryhmittelevät puun lujuuden, jäykkyyden, vedenhylykivyyden ja mittapysyvyyden kemialliseen tai fysikaaliseen parantamiseen soveltuvat menetelmät viiteen ryhmään: 1) vesiliukoiset polymeerit ja synteettiset hartsit, jotka kovettuvat liukenemattomiksi kuivuttuaan, 2) orgaaniset kemikaalit tai soluseinän polymeerejä toisiinsa sitovat yhdisteet, 3) nestemäiset mono-merit, jotka polymeroituvat soluontelossa, 4) puun puristaminen hartsien lämmittämisen tai kovettamisen yhteydessä, 5) lämpökäsittelyt.

Lumen filling	Cell wall filling	Reaction with wood polymers	Cross linking	Degradation of cell wall
				

**Kuva 1.** Puun eri modifiointitapojen aiheuttamat eriaisteiset muutokset solu- ja molekyyllitasolla. Vasemmalta: modifiointikemikaali täyttää soluontelon, modifiointikemikaali tunkeutuu soluseinämään, modifiointikemikaali muodostaa heikkoja sidoksia puun komponenttien kanssa, modifiointikemikaali muodostaa kovalenttisia sidoksia puun komponenttien kanssa, modifiointi saa aikaan puun komponenttien rapautumista (Militz 2007).

### 2.2. Kemiallinen modifiointi

Kemiallisessa modifioinnissa jokin puupolymeerin (selluloosa, hemiselluloosa, ligniini) reaktiivinen osa reagoi yksinkertaisen kemiallisen reagenssin kanssa, jolloin niiden välille syntyy kovalenttinen



sidos (Rowell 1983). Useimmiten sidos syntyy polymeerien hydroksyyli-ryhmän ja reagenssin molekyylin välille, jonka seurauksena on puun kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien muuttuminen (Hill 2006). Esimerkiksi puun asetyloinnissa, jossa modifiointikemikaalina käytetään etikkahapon anhydriidiä, hydrofiilinen (vettä sitova) hydroksyyli-ryhmä korvautuu asetyyli-ryhmällä, jonka seurauksena vesimolekyylien kiinnittymismahdollisuudet vähenevät tai häviävät. Kemiallinen modifiointi voidaan tehdä sivelemällä modifiointikemikaali puumateriaalin pinnalle, upottamalla puumateriaali modifiointiliuokseen tai imeyttämällä modifiointikemikaali painekammiossa paineen vaihtelua ja kohotettua lämpötilaa hyväksikäyttäen. Massiivipuun kemiallisessa modifioinnissa voidaan erottaa soluonteloiden ja soluseinän tai näiden molempien modifioiminen modifiointikemikaalilla (Navi & Sandberg 2012).

Polymeerimodifioinnissa puu kyllästetään ensin jollakin nestemäisellä pienimolekyylisellä monomeerillä tai oligomeerillä. Kyllästäminen voi tapahtua upottamalla, jolloin kyllästyminen rajoittuu pintakerrokseen, tai painekyllästyslaitteilla painekyllästysprosessin tapaan. Seuraavassa vaiheessa imeytetty kylläste polymerisoidaan joko lämmön tai sähkömagneettisen säteilyn avulla (esim. Avilov ym. 1999). Polymeerimodifioitu puu (PMW) on siis puun ja polymerisoituneen monomerin muodostama yhdistelmämateriaali. Polymeerimodifiointi ei sovellu modifiointiliuosta heikosti läpäiseville puulajeille kuten esimerkiksi *Eucalyptus grandis* (Stolf & Lahr 2004).

Puun teknisten ja visuaalisten ominaisuuksien parantamisen ohella modifioinnin keskeinen tavoite on tuotteen kestoajan lisääminen käyttökohteessaan. Lähtökohta kestävyystarkastelussa ovat käyttöolosuhteet (Viitanen 2011). Kestävyteen eniten vaikuttavia tekijöitä ovat veden eri olomuotojen, lämpötilan muutosten, tuulen ja auringon säteilyn aiheuttamat säärasitukset sekä biologiset tekijät, kuten home, laho ja hyönteiset. Lievemmissä rasitusoloissa riittää puun pintakäsittely tai puupinnan modifiointi. Kohteissa, joissa kosteusrasitus ylittää pitkäaikaisesti home- ja lahottajasiementen kasvun mahdollistavan raja-arvon (puun kosteussuhde > 20 %, lämpötila > 0 °C), tarvitaan syvemmälle tai läpi tuotteen ulottuvaa modifiointia.

Perinteinen kemiallinen puunsuojaus eli kyllästäminen biosidivalmisteilla perustuu eliöille haitallisten kemikaalien imeyttämiseen puuhun, jolloin puuta tai sen komponentteja hajottavien ja ravinnokseen käyttävien homeiden, sienten ja sädesienten kasvu hidastuu tai estyy kokonaan. Modifioinniksi ei lueta sellaista puun lahonsuojausta, jossa käytetään kemiallista biosidiä eli vahingollisten eliöiden kasvun estävää tai eliöitä vahingoittavaa kemikaalia. Puun käsitteleminen biosideilla on tekniiksessä mielessä myös puun ominaisuuksien muuttamista, mutta ympäristötietoisuuden lisääntyessä ja lainsäädännön tiukentuessa biosideilla käsiteltyjen uusien tuotteiden saaminen markkinoille on vaikeata. Käytössä olevat biosidikäsittelyt ovat kuitenkin kilpailevia puunsuojausmenetelmiä uusille modifiointimenetelmille, joilla esimerkiksi lahonkestävyyttä pyritään parantamaan ilman kemikaaleja tai myrkyttömällä kemikaaleilla. Myös biosideilla käsiteltyjen tuotteiden ympäristöhaittoja pyritään vähentämään esimerkiksi minimoimalla biosidien huuhtoutuminen.

Joidenkin nykyisten puun modifiointimenetelmienkään myrkyttömyyttä ei ole vielä täysin osoitettu (Militz & Lande 2009). Eräissä infrastruktuurin toimintavarmuuden ja turvallisuuden kannalta keskeisissä tuoteryhmissä, kuten puupylväissä, puun suojausta biosideilla tultaneen myrkyttömien vaihtoehtojen puuttuessa käyttämään vielä pitkään. Erityisesti tarve koskee pylväiden maakeskukseen tulevaa tyviosaa. Biosidejä voidaan käyttää myös lisäaineena pienempinä pitoisuuksina täydentämään öljykyllästyksen tai muun suojaustavan suojausvaikutusta (Energiateollisuus ry 2010).

## 2.3. Fysikaalinen modifiointi

Fysikaalisessa modifioinnissa puun ominaisuuksien muutokset saadaan aikaan sähkömagneettisen säteilyn, lämmön tai paineen avulla, tai jollakin näiden yhdistelmällä. Lahottaja- ja homesienten kasvu voidaan estää myös esimerkiksi johtamalla puutuotteeseen tai -rakenteeseen sähkövirtaa (esim. Treu & Larnøy 2010) tai tuotteen kuivana pitävin pintakäsittelyin. Tällöin ei kuitenkaan puhuta puun modifioinnista vaan muista puunsuojausmenetelmistä.

Puun käsitteleminen korkeassa lämpötilassa muuttaa välillisesti myös puun polymeerien kemiallisia ominaisuuksia ja määrasuhteita hajottamalla hemiselluloosamolekyylejä ja niissä esiintyviä hydroksyyliiryhmiä sekä pilkkomalla puun pitkäketjuisia rakennepolymeerejä. Puristusmodifioinnin tavoitteena on vähentää puun huokostilan osuutta sen tilavuudesta, jolloin puun tiheys kasvaa. Tiheyttä kasvattamalla voidaan vaikuttaa moniin puun mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen, kimmokertoimeen, kovuuteen ja kulutuskestävyyteen.

### 3. Modifioinnin vaikutus puumateriaalin ominaisuuksiin

#### 3.1. Biologinen ja kosteuden kestävyys

Lahottajasienten kasvun mahdollistavat olosuhteet muodostuvat, kun puun kosteussuhde on pidemmän aikaa puunsyiden kyllästyspisteen (PSK) yläpuolella, vähintään noin 25–32 % (Koski 2008) ja lämpötila on sienilajista riippuen 0–15 celsiusasteen yläpuolella (Ritschkoff & Viitanen 1989). Tällaiset olosuhteet voivat yleensä toteutua vain tuoreessa puussa tai suorassa maa- tai vesikosketuksessa olevassa suojaamattomassa puussa. Useimmille lahottajasienille puun optimaalinen kosteussuhde on 40–80 % (Scheffer 1973) ja kun kosteutta on riittävästi, optimilämpötila 15–45 °C (Ritschkoff & Viitanen 1989). Puunsuojauksen ja modifioinnin tutkimuksessa ja tuotekehityksessä keskeisenä tavoitteena onkin etsiä keinoja puun kosteussuhteen pitämiseksi PSK:n alapuolella mikrobisen rapautumisen vastustuskyvyn parantamiseksi. Esimerkiksi tervan käyttö puunsuojauksessa perustuu vedenpitävän kalvon muodostumiseen, jolloin puu pysyy lahottajasienten kannalta liian kuivana. Sama vaikutus saadaan aikaan myös mäntyöljykyllästyksellä (esim. Heräjärvi ym. 2014).

Vedenkeston lisäämistä tavoittelevissa modifiointimenetelmissä voidaan erottaa kaksi vaikutustapaa: vedenhylkivyyttä lisäävät sekä mittapysyvyyttä parantavat menetelmät (Rowell & Banks 1985). Vedenhylkivyyys kuvaa pinnan kykyä vastustaa veden imeytymistä puuhun ja sitä voidaan mitata esimerkiksi veden kontaktikulman avulla. Mittapysyvyyttä taas kuvaa puun turpoamisen määrä kappaleen ottaessa vettä ympäristöstään ja veden tunkeutuessa soluseinämiin. Gellerich ym. (2012) havaitsivat eroja eri modifiointimenetelmien välillä siinä, kuinka puun kosteussuhde nousi sääälitöyksessä sienten kasvulle otolliseksi. Thybring (2013) esittääkin modifioidun puun tasapainokosteuden suhteellista muutosta (moisture exclusion efficiency, MEE) yhdeksi puun lahonkeston mittariksi.

Puun vedenkestävyyttä voidaan kuvata sen mittapysyvyydellä tai dimensioiden ja massan muutostarvoilla, kun testikappale altistetaan veden vaikutukselle. Mittapysyvyyttä kuvaa ASE-arvo (anti swelling efficiency), joka on modifioimattoman ja modifioidun puun turpoamisen ero suhteessa modifioimattoman puun turpoamiseen, eli mitä suurempi on modifioidun puun ASE-arvo, sitä parempi on sen mittapysyvyys. Kemiallisen modifioinnin tehokkuus riippuu usein sen aikaansaamasta puun painonlisäyksestä modifiointiprosessissa, jota kuvaa WPG-arvo (weight percentage gain) eli lisätyn modifiointikemikaalin massaosuus kuivatussa puussa.

Eurooppalainen standardi EN 350:2016 jakaa eri puulajien sydänpuun lahonkeston viiteen kestävyysluokkaan: erittäin kestävä, kestävä, kohtalaisen kestävä, hieman kestävä ja ei kestävä (CEN 2016). Standardin mukaan pintapuusa luokitellaan kaikkien puulajien kohdalla pääosin luokkaan ”ei kestävä”. Suomalaisista pääpuulajeista tässä luokituksessa päästään parhaimmillaan luokkaan 3, johon kuuluu männyn sydänpuu. Puulajien luontaisesta lahonkestävyydestä ovat raportoineet mm. Brischke ym. (2013, 2014). Meyer-Veltrup ym. (2017) ovat kehittäneet puun kostumiskykyyn ja lahonkestävyyteen perustuvan menetelmän puutuotteiden käyttöä ja suorituskyvyn ennakoimiseksi useille lehti- ja havupuulajeille.

Lahonkestävyyteen voidaan vaikuttaa sekä fysikaalisella että kemiallisella modifioinnilla ja niiden yhdistelmillä. Lämpömodifioinnissa lahonkestävyyden parantuminen perustuu yhtäältä modifioidun puun alhaisempaan tasapainokosteuteen modifioimattomaan puuhun verrattuna ja toisaalta alhaisempaan uuteaine- (ml. sokeryhdisteet, rasvahapot ja lipidit (Tjeerdsma ym. 1998)) ja hemiselluloosa- ja selluloosapitoisuuteen (Kamdern ym. 2002). Esimerkiksi Borrega ym. (2009) havaitsivat lämpökäsitellyn haavan massahäviön olevan standardiin EN 113 pohjautuvassa ruskolahottaja-altistuksessa 30 % vähäisempi kuin käsittelemättömän haavan. Mitä alhaisempi puun kosteus on, sitä huonommat ovat edellytykset lahottajasienten kasvulle. Toisaalta lämpökäsittelyn aikaansaama hydrolyysi aiheuttaa muutoksia puusolukon kemiallisessa koostumuksessa ja rakenteessa. Hydroksyyliyhdyntien (OH-) määrä vähenee, mikä johtuu esteröitymisestä etikka- ja muurahaishapon vaikutuksesta ja hemiselluloosapitoisuuden vähenemisestä (Tjeerdsma ym. 1998). Orgaaniset hapot katalysoivat happohydro-

lyysiä, jossa polysakkaridien glykosididokset hajoavat johtaen mm. värinmuutoksiin (Sehlstedt-Persson 2003) ja puun rakenneosien pilkkoutumiseen (Fengel & Wegener 1989). Happamuus kasvaa käsittelylämpötilan ja -ajan kasvaessa (Tjeerdsma & Militz 2005). Hydrofobisuus lisääntyy OH-ryhmien vähetessä, koska ne ovat pääasialliset sidospaikat joihin vesimolekyylit kiinnittyvät. Toisaalta lämpökäsittelyyn liittyy puun koostumusta hajottavia prosesseja (ns. lämpörapautuminen, thermal degradation), jotka altistavat puuta mikrobeille ja tuhohyönteisille (esim. Kamdem ym. 2002, Borrega & Kärenlampi 2008,2011; Borrega 2011).

Perinteinen lahontorjunta kyllästämällä perustuu eliöille myrkyllisen eli biosidisen kemikaalin imeyttämiseen puuhun, mikä estää puun infektoitumisen lahottajasienten itiöillä ja sienen kasvun. Myrkyllisten kemikaalien tilalle on pyritty etsimään myrkyttömiä vaihtoehtoja, jotka toimisivat samalla mekanismilla. Yleisimmin käytettyjä menetelmiä ovat asetylointi, furfulointi (furfuraalihappo) ja Belmadur-käsittelyprosessi (dimetyyli dihydroxyethyleneurea, DMDHEU). Ringmanin ym. (2014) mukaan näiden menetelmien teho perustuu veden imeytymisen estymiseen; lahottajasienten kasvun estämisen sijasta ne siis ainoastaan viivästyttävät lahoamista pitämällä puun kuivempana.

Lahonkestävyyden lisääminen kemiallisella modifioinnilla perustuu lahonkestävän kemikaalin impregnointiin puuhun, mikä estää lahon etenemisen puussa tai puumateriaalin vettymisen riittävän kosteaksi lahottajasienten toiminnalle. Lahonsuoja-aineen kiinnittyminen puuhun voi olla epätäydellistä ilman lämpömodifiointia tai vastaavaa käsittelyä, jolla modifiointikemikaali saadaan kiinnitettyä puuhun joko kemiallisesti tai mekaanisesti.

Sieni-infektion aikaansaama massan häviö altistusaikana on eniten käytetty menetelmä lahonsuojakäsittelyn tehokkuuden määrittämisessä (esim. Rowell 2007). Puun kimmokertoimen tai lujuu-den heikkeneminen saattaa kuitenkin olla massahäviötä luotettavampi mittari biodegradaatiosta: esimerkiksi katkolahoinfektiossa mekaaniset ominaisuudet heikkenevät jo ennen kuin massahäviötä havaitaan (esim. Venäläinen ym. 2014).

Modifiointimenetelmien vaikutusta lahonkestävyyden lisäämiseen on vaikea vertailla, koska vertailukelpoista tietoa on vähän vapaasti saatavilla (Brischke ym. 2015) ja se on usein epätäydellistä erityisesti modifiointikemikaalin, sen tunkeuman ja pidättymisen sekä modifiointiprosessien osalta.

Puumateriaali lämpimillä ilmastovyöhykkeillä on alttiina myös hyönteisten, etenkin termiitin hyökkäyksille. Kuten lahonkestävyyteen myös termiitinkestävyyteen voidaan tehokkaimmin vaikuttaa biosideillä, mm. booriyhdisteillä, joiden pysymistä voidaan tehostaa erilaisilla polymeerimodifioinneilla (esim. Kartal ym. 2009, Obounou-Akong ym. 2015, Salman ym. 2014, 2016). Termiitinkeston parantaminen täysin ei-biosidisilla puun modifiointimenetelmillä on vielä tutkimusasteella. Asetylointi ja Belmadur-käsittely näyttävät lisäävän tehokkaasti termiitinkestoa (Gascón-Garrido ym. 2013). Lupaavia tutkimustuloksia on saatu myös kyllästämällä puuta synteettisillä anhydrideillä (Morard ym. 2007) sekä vahoilla (Esteves ym. 2014, Scholz ym. 2010). Esimerkiksi vahojen vaikutus puun termiitinkestoon riippuu monista tekijöistä, mm. vahan määrästä ja tyypistä sekä tietyn termiittilajin ravintomieltymyksistä (Scholz ym. 2010).

## 3.2. Mekaaninen kestävyys ja pinnankovuus

Puun mekaaniset ominaisuudet pääsääntöisesti kasvavat puun kosteussuhteen laskiessa puun syiden kyllästymispisteen alapuolella. Siten modifioinnilla saavutettu alhaisempi tasapainokosteus periaatteessa parantaa modifioidun tuotteen ominaisuuksia modifioimattomaan verrattuna, jos ympäristöolosuhteet ovat samat. Moniin modifiointimenetelmiin liittyy kuitenkin prosesseja kuten kemialliset muutokset ja lämpörapautuminen, jotka kompensoivat alemman tasapainokosteuden aiheuttamia etuja. Esimerkiksi haavan lämpökäsittelyssä puun kimmokerroin ja syynsuuntainen puristuslujuus tyyppillisesti pysyvät ennallaan tai hieman kasvavat käsittelemättömään puuhun verrattuna, kun taas leikkaus-, taivutus- ja vetolujuus sekä pinnan kovuus heikkenevät (esim. Junkkonen & Heräjärvi 2006, Heräjärvi ym. 2006, Heräjärvi 2009). Lämpökäsittelyssä myös puun hauraus kasvaa eli kyky elastisiin muodonmuutoksiin laskee (esim. Lekounougou ym. 2011, Widman ym. 2012), mikä ei kuitenkaan

välttämättä tarkoita kimmokertoimen tai lujuudenkaan alenemista. Tämä havaitaan esimerkiksi pinnan Brinell-kovuustestissä, jossa lämpökäsitellyn puuhun aiheutettu mittausjälki ei palaudu ajan kuluessa kuten käsittelemättömään puuhun tehty jälki (Heräjärvi ym. 2006). Näin ollen pinnan mitattu kovuusarvo voi olla sama, mutta käytännössä esimerkiksi lattiaan tai pöytälevyyn tullut kolhu näkyy huonon palautumisen vuoksi lämpökäsitellyssä puussa selvemmin tai pidempään kuin käsittelemättömässä puussa.

Myös modifioidun puun mekaaninen käyttäytyminen liitoksissa poikkeaa modifioimattomasta puusta kuormitustilanteessa. Junkkonen & Heräjärvi (2006) havaitsivat haapa-aineistoilla tehdyissä sormijatkosten kolmipistetaivutuskokeissa, että lämpökäsitellyn haavan sormijatkoksissa puu murtui ilmakeivana keskimäärin yli 40 prosentissa tapauksista (lopuissa liimasauama antoi periksi eli sormiliitos aukesi), kun modifioimattomalla haavalla sormien murtumia esiintyi vain 10–30 prosentissa näytteitä. Kaksi vuorokautta vesiupotuksessa olleilla modifioimattomilla haapanäytteillä puusta murtuneiden liitosten osuus oli 0–15 % (aunneita liimasauamoja 85–100 %), kun taas lämpökäsitellyillä näytteillä murtuneita liitoksia oli 16–67 %. Samassa tutkimuksessa ilmakeivien haapakoekappaleiden taivutusmurtolujuuksien keskiarvot vaihtelivat liimatyypeittäin välillä 36–52 MPa (modifioimattomat) ja 32–39 MPa (lämpökäsitellyt). Vaikka lämpökäsitellyt näytteet olivat absoluuttisesti heikompia, oli vesiupotuksen suhteellinen vaikutus sormijatkotun näytteen taivutuslujuuteen lämpökäsitellyissä koekappaleissa selvästi pienempi kuin käsittelemättömissä (Junkkonen & Heräjärvi 2006). Tämä johtui todennäköisesti lämpökäsitelyjen näytteiden suhteellisesti pienemmästä vesiabsorptiosta upotuksessa, mikä on seurausta lämpökäsittelyn alentamasta puun hygroskooppisuudesta. Voidaankin sanoa, että koska ympäröivän kosteuden aiheuttama muutosnopeus lämpökäsitellyn puun kosteus-suhteessa on käsittelemätöntä puuta alhaisempi, lähestyy lämpökäsitellyn puun lujuus käsittelemättömän puun lujuutta kostutettaessa ajan funktiona.

Kemiallisen modifioinnin avulla aikaansaatu mekaanisten ominaisuuksien parantuminen voi perustua myös mono- tai oligomeeristen kemikaalien imeytymiseen ja kiinnittymiseen puun huokostilaan kovettumalla eli polymeroitumalla, jolloin ne ankkuroituvat kiinteäksi osaksi puun rakennetta. Kemikaali voidaan imeyttää puun pintakerrokseen pintakäsittelymenetelmien tavoin, jolloin vaikutussyvyys on suhteellisen pieni (1–2 mm), tai painekäsittelyn avulla, jolloin käsittelysyvyys (tunkeuma) riippuu kemikaalin molekyylikoosta ja käytetyistä paineista sekä puun läpäisykyvystä eli permeabiliteetista. Kemiallisessa modifioinnissa käytetty tekniikka vastaa siis painekyllästystä perinteisillä puunsuoja-aineilla kuten kuparisuoloilla tai kreosoottijalilla.

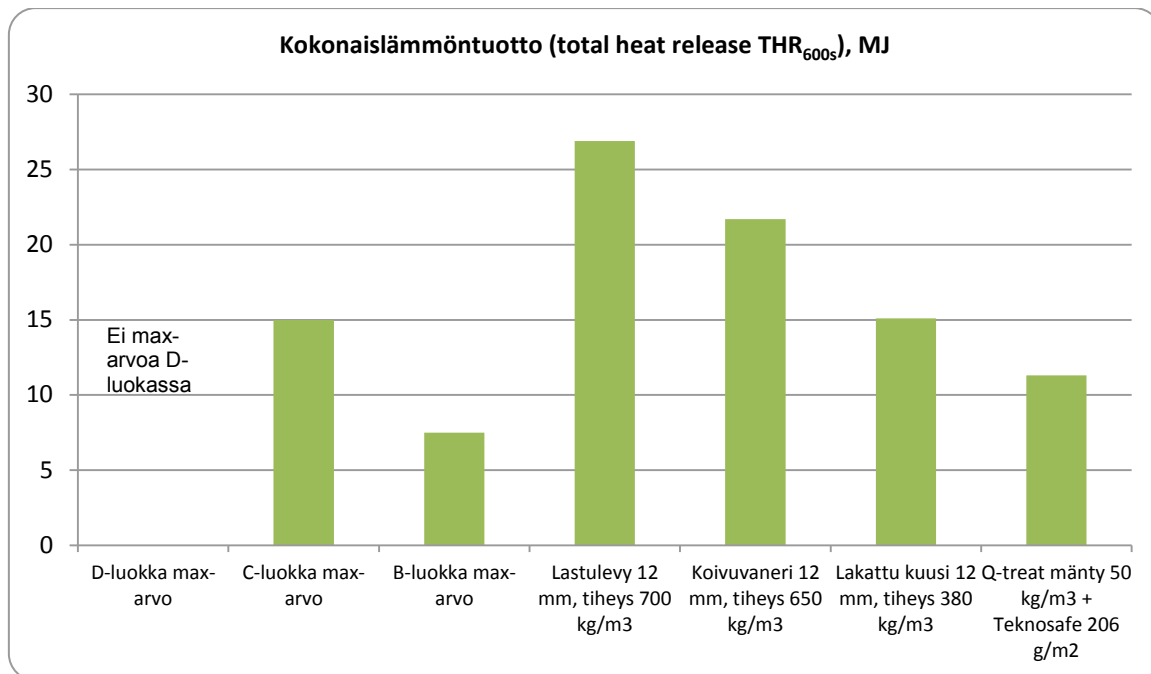
### 3.3. Palonkestävyys

Puun palonkestävyyden lisääminen perustuu lähinnä kemialliseen käsittelyyn eli puuhun imeytetään palamatonta kemikaalia, jonka läsnäolo puussa estää hapen saannin puun palamisprosessiin ja siten palon leviämisen. Palonsuojakemikaalit ovat joko suoloja tai lämmön vaikutuksesta polymerisoituvia kemikaaleja (Rowell & Dietenberger 2013). Käytettäessä suoloja palontorjuntaan etenkin ulkokäyttöön tarkoitettu puumateriaali joudutaan myös pinnoittamaan, koska ilmankosteuden vaihtelu liuottaa ja kuljettaa suoloja pois puusta. Yleisimpiä palonsuojakemikaaleja ovat ammoniumsuoloina puuhun lisättävät fosfori- ja booriyhdisteet, jotka lämmitessään hajoavat tuottaen fosfori- tai boorihappoa. Nämä kemikaalit ovat kuitenkin biosidejä eivätkä siten täytä puun modifiointikemikaaleille asetettuja vaatimuksia.

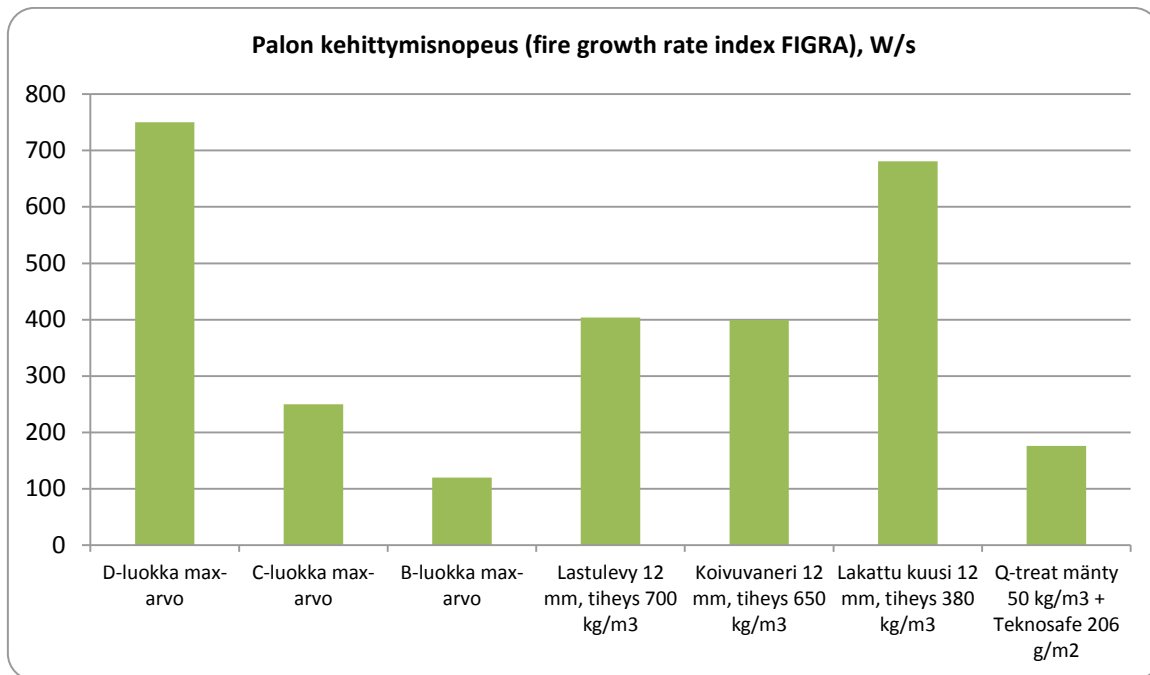
Silikaattiyhdisteet ovat eniten tutkittuja ja käytettyjä ei-biosidisiä palonsuojakemikaaleja. Esimerkiksi vesilasipinnoite sulaa ja muodostaa eristävän vaahtomaisen kerroksen puutuotteen pinnalle. Vesilasipinnoite kuitenkin reagoi ajan kuluessa ilman kanssa ja neutralisoituu mikä johtaa vaahoutumisen vähenemiseen ja pinnoitteen irtoamiseen alustastaan (Pries & Mai 2013). Silikaattiyhdisteistä myös tetraetyyliortosilikaattia ja piidioksidisooleja on tutkittu ja havaittu niiden parantavan puutuotteen palonkestävyyttä (Pries & Mai 2013).

Puutuotteen modifioinnilla painekyllästyksenä vesilasikyllästyksellä voidaan parantaa palonkestävyyden pysyvyyttä. Kuvissa 2 ja 3 on verrattu Q-treat –käsittelyn ulkoverhouslaudan palonsuojainomaisuuksia joihinkin muihin vastaaviin puu- tai puupohjaisiin tuotteisiin. Q-treat on tällä hetkellä ainoa modifioitu puutuote, josta on julkisia SBI-testin tuloksia (savuntuotto, pisarointi, sivusuuntainen liekki leviäminen, palon kehittymisnopeus ja kokonaislämmöntuotto), mutta sekin oli kokeessa pintakäsitelty ympäri Teknosafe -palosuojamaalilla levitysmäärällä 206 g/m<sup>2</sup>. Vertailussa olevan lakattun kuusilaudan tiheys on 380 kg/m<sup>3</sup>, joka on lähellä lämpökäsitellyn suomalaisen kuusen tiheyttä. Valitettavasti modifioitujen puutuotteiden palokäyttäytymistä on verrattu tutkimuksissa vain harvoin normaaliin puuhun ja nykyisen luokitusjärjestelmän kriteereihin.

Palokuorma on pintarakenteissa yksi tärkeä tekijä, jos rakennus suunnitellaan toiminnallisen palomitoituksen avulla. Kuvan 2 mukaan lakattun kuusilaudan (tiheys 380 kg/m<sup>3</sup>) kokonaislämmöntuotto on lähellä C-luokan vaatimusta. Koska suomalaisen lämpöpuun tiheys on lähellä esimerkkinä olevaa lakattua kuusilautaa, on todennäköistä että lämpöpuun kokonaislämmöntuotto on lähellä esimerkkinä olevaa kuusilautaa.



**Kuva 2.** Kokonaislämmöntuoton raja-arvot paloluokille D, C ja B. Vertailuna lakattu kuusilauta, vakio-lastulevy ja koivuvaneri, joiden arvot saatu standardista EN 13238 (2010), ja Q-treat mänty + Teknosafe -tuotteen SBI-testin tulokset Lieksan Teollisuuskylä Oy:lle laaditusta raportista (Boren 2014a, 2014b).



**Kuva 3.** Palon kehittymisnopeuden raja-arvot paloluokille D, C ja B. Vertailuna lakattu kuusilauta, vakiolastulevy ja koivuvaneri, joiden arvot saatu standardista EN 13238 (2010), ja Q-treat mänty + Teknosafe -tuotteen SBI-testin tulokset Lieksan Teollisuuskylä Oy:lle laaditusta raportista (Boren 2014a, 2014b).

### 3.4. Säänkestävyys

Ulkotiloissa suorassa auringonvalossa ultraviolettisäteily muuttaa puumateriaalin pintaa hajottamalla sen polymeerisidoksia, joka edelleen johtaa erittäin herkästi reagoivien ns. radikaalien syntyyn. Radikaalit ovat atomeja, joiden uloimmalla elektronikuorella on pariton määrä elektroneja. Tässä kemiallisessa valorapautumisessa radikaalit pyrkivät täydentämään elektronivajettaan mm. kaappaamalla polymeerimolekyylien vetyatomeja, mikä hajottaa puumateriaalia edelleen ja saa aikaan eräänlaisen ketjureaktion (Hon 2000). Puumateriaalin pinnan hajoamisesta, radikaalien tunkeutumisesta materiaaliin ja niiden aiheuttamista ketjureaktioista johtuen vahingoittunut alue leviää ajan myötä syvemmälle puumateriaaliin. UV-säteily vaikuttaa haitallisesti puun pääkomponentteihin ja joihinkin uuteaineisiin. Suurin vaikutus sillä on ligniiniin, joka hajoaa vesiliukoisiksi aineiksi. UV-säteilyn kokonaisabsorptiokertoimesta ligniiniin osuus on 80–95 %, hiilihydraattien 5–20 % ja uuteaineiden noin 2 % (Kuo & Hu 1991). Ligniinin reagointi UV-valoon näkyy esimerkiksi sanomalehtipaperin kellastumisena auringonvalossa. Ligniinin hajoaminen johtaa kromoforisten ryhmien, kuten karboksyylihapojen, parakinonien ja hydroperoksidiradikaalien (HO<sub>2</sub>) syntyyn (Hon 2000). Nämä kromoforiset ryhmät ovat pääasiallinen syy myös puupinnan värinmuutoksiin.

Valorapautumisen rinnalla auringonvalossa tapahtuu puun pinnan lämpörapautumista, koska puun pinta voi lämmetä huomattavasti ympäristön lämpötilaa korkeammalle (Kránitz ym. 2016). Lisäksi tuuli ja sade kuluttavat puun pintaa ja kuljettavat rapautumistuotteita pois. Myös puun pintaan kohdistuva lämpötilan ja kosteuden vaihtelu aiheuttaa siihen mekaanista rasitusta. Pitemmällä aikavälillä puun pinta muuttuu kirjavaksi, ja kun ligniini on huuhtoutunut pinnasta, se muuttuu harmaaksi (Unger ym. 2001).

Modifiointimenetelmin UV-valon kesto on pyritty lisäämään aminohappotrisiiniäkestäyksellä (amino acid tricene), jolla UV-valon aiheuttaman rapautumisen kemiallisia reaktioita saadaan vähennettyä (Hauptmann ym. 2014). Tavallisesti modifioitua puuta, jota käytetään UV-säteilylle alttiissa paikoissa, suositellaan pintakäsittelyä UV-säteiltä suojaavalla aineella. Esimerkiksi pintakäsittelytön lämpökäsittely puu muuttaa väriään silmin havaittavasti auringonpaisteessa jo viikkojen aikana.

### 3.5. pH

Modifiointimenetelmien vaikutuksesta puun pH-tasoon, kuten myös pH-tason vaikutuksista puun ominaisuuksiin yleensä, on julkaistu varsin vähän tuloksia. Cai ym. (2015) havaitsivat lämpökäsitellyn männyn ja kuusen pH:n alenevan tasolle 4-5, kun käsittelemättömien vertailunäytteiden pH oli tasolla 5-6. Mitä korkeampi käsittelylämpötila, sitä alhaisempi pH (Wang ym. 2012). Tätä selittää mm. etikkahapon syntyminen hemiselluloosan hajoamisprosessissa korkeissa lämpötiloissa (McDonald ym. 1999, Sivonen ym. 2002). Internet-lähteiden perusteella tuoreesta käsittelemättömästä puusta tehdyn liuoksen pH on tyypillisesti hieman neutraalin alapuolella ja puulajien välillä on suuriakin eroja.

pH:lla on suuri vaikutus puutuotteen kiinnikkeiden (naulat, ruuvit, niitit, levyt) kestävyys: happamassa puussa korroosio hajottaa galvanoimattomat kiinnikkeet nopeasti. Myös liimat ja pintakäsittelyaineet kiinnittyvät eri tavoin eri happamuustason puupintoihin – happamuuden lisäksi liimattavuuteen ja pintakäsittelyvyyteen vaikuttavat monet muutkin tekijät (esim. Talikka 2006, Räsänen 2015).

Puun modifiointikemikaalit voivat olla myös emäksisiä, jolloin pH:n kasvu saa aikaan ensivaiheessa hemiselluloosan ja myöhemmin myös ligniinin rapautumista (Browning 1981). Heikentyneet soluseinät painuvat kokoon, mikä voi johtaa puun voimakkaampaan kutistumiseen ja edelleen ilmakuivan puun suurempaan tiheyteen normaalipuuhun verrattuna (Reinprecht 2016). Pitkittyessään sekä alhaisen että korkean pH:n aikaansaama rapautuminen heikentää puun lujuusominaisuuksia (Winandy & Rowell 2013).



## 4. Kaupalliset puun modifiointimenetelmät

### 4.1. Lämpökäsittelymenetelmät

Puun lämpökäsittelyä eli lämpömodifiointia tehdään eri puolilla maailmaa useilla eri tekniikoilla, joille kaikille on yhteistä käsittely korkeissa lämpötiloissa (n. 150–230 °C) jonkin suoja-aineen ympäröimänä (vesihöyry, typpikaasu, kasvipohjaiset öljyt) tai tyhjiössä. Lämpökäsittelyssä tapahtuva terminen hajoaminen aiheuttaa puun massahäviötä (esim. Borrega & Kärenlampi 2008) ja värin tummenemista (esim. Torniainen ym. 2016) sekä lisää puumateriaalin hydrofobisuutta (esim. Pétrissans ym. 2003, Hill ym. 2013). Korkeassa lämpötilassa käsitellyssä puussa tapahtuu termistä hajoamista, joka ilmenee selvänä tummenemisena, hemiselluloosan hajoamisesta ja uuteaineiden haihtumisesta johtuvana massan häviönä ja mekaanisten ominaisuuksien muuttumisena, mutta myös merkittävänä vedenhylykivyyden, mitta- ja muotopysyvyyden ja biologisen kestävyuden paranemisena hydrofobisuuden lisääntymisen seurauksena. Useissa tutkimuksissa on osoitettu, että mitta- ja muotopysyvyyden paraneminen puun lämpökäsittelyssä on verrannollinen massahäviön suuruuteen.

Lämpöpuuyhdistyksen (International ThermoWood® Association, [www.thermowood.fi](http://www.thermowood.fi)) jäsenyri-  
tysten kokonaistuotanto oli vuonna 2017 noin 200 000 m<sup>3</sup> (Lämpöpuuyhdistys ry 2017) ja tuotanto on kasvanut tasaisesti jo 15 vuotta. Muiden modifiointimenetelmien tuotannosta ei ole tilastotietoja, mutta Militz (2016) arvioi modifioidun puun kokonaistuotannon Euroopassa olleen vuonna 2015 enintään 300 000–400 000 m<sup>3</sup>. Suomessa kehitetyllä **ThermoWood®**-prosessilla käsitelty havu- ja lehtipuutavara jaetaan käsittelyasteen perusteella kahteen eri tuoteluokkaan: Thermo-S ja Thermo-D (ThermoWood® käsikirja 2003). Thermo-S -luokassa käsittelylämpötila on lehtipuilla 185 °C ja havupuilla 190 °C; käsittely muuttaa puun väriä ja vähentää kosteuselämistä. Thermo-D -luokassa käsittelylämpötilat ovat lehtipuilla 200 °C ja havupuilla 212 °C. Korkeammalla käsittelylämpötilalla parannetaan puun lahonkestävyys luokkaan 2. Myös muutokset ulkonäössä, stabiiliudessa ja mekaanisissa ominaisuuksissa ovat Thermo-D -luokassa voimakkaampia kuin Thermo-S -luokassa. ThermoWood®-prosessissa syttymiseltä suojaavana aineena toimii vesihöyry, jota käytetään lämmön johtumisen parantamiseksi myös lämpökäsittelyä edeltävän kuumakuivausvaiheen aikana. Vesihöyry syrjäyttää hapen ja hidastaa siten myös puuaineen rapautumista käsittelyn aikana. ThermoWood®-prosessiin sisältyy kuumakuivausvaihe, jossa yleensä esikuivattu puutavara kuivataan mahdollisimman kuivaksi noin 100–130 °C lämpötilassa ennen varsinaista lämpökäsittelyä. Muutamia tunteja kestävän lämpökäsittelyvaiheen aikana puutavara on lähes kuivaa, mutta lopputasaannutuksen aikana kosteussuhde nostetaan 3–6 prosenttiin.

Tanskassa käytössä olevassa **WTT-prosessissa** lämpökäsittely tehdään painesynterissä ja siinä käytetään väliaineena paineistettua vesihöyryä. Puutavaran kosteussuhde käsittelyn jälkeen on korkeampi kuin ThermoWood®-menetelmässä (Dagbro ym. 2010). Puussa säilyvän kosteuden ansiosta ThermoWood® -menetelmää vastaava värinmuutos saadaan aikaiseksi jo 160–180 °C lämpötilassa (Ohnesorge ym. 2009), vastaavasti muutokset mekaanisissa ominaisuuksissa, tasapainokosteudessa ja sään- ja lahonkestossa jäävät vähäisemmiksi.

Hollantilaisessa **Plato®**-menetelmässä on kaksi erillistä lämpökäsittelyvaihetta, joiden välissä on erillinen kuivausvaihe. Ensimmäisessä hydrotermolyysiksi nimitetyssä lämpökäsittelyvaiheessa puuta lämpökäsitellään kosteassa ja vähähappisessa tilassa korotetussa paineessa. Käsittelylämpötila on tässä vaiheessa 165–185 °C ja höyrynpaine selvästi yli normaalin ilmanpaineen (6–8 bar). Hydrotermolyysivaihe hyödyntää puussa olevaa kosteutta kemiallisessa reaktiossa, joissa aldehydien ja fenoli-  
en oletetaan vapautuvan hemiselluloosasta ja selluloosasta jo suhteellisen alhaisessa lämpötilassa ilman voimakasta polymeerien pilkkoutumista. Hydrotermolyysivaiheen jälkeisessä välivaiheessa modifioitava puutavara kuivataan tavallisella lämminilmakuivauksella noin 10 % kosteussuhteeseen. Jälkikäsitteilyvaiheessa (curing) puutavara lämmitetään aluksi jälleen lämpötilaan 160–190 °C. Tämä vaihe koostuu 4–5 tunnin ns. termolyysivaiheesta, 3–5 vuorokauden välikuivausvaiheesta ja 14–16

tunnin lopputasaannutuksesta, joiden ajat vaihtelevat puulajin ja sahatavaran dimensioiden mukaan. Jälkikäsittelevä vaihe lämmityksessä voidaan käyttää vesihöyryä tai kuumaa ilmaa.

Plato<sup>®</sup>-menetelmän hydrotermolyyssivaiheessa puussa esiintyy voimakasta hemiselluloosan hajoamista ja asetyyliryhmien jakautumista etikkahapoksi (Boonstra & Tjeerdsma 2006). Etikkahappo toimii hiilihydraattien hajoamisen (depolymeroitumisen) katalyyttinä prosessin jatkuessa. Jälkikäsittelevä vaiheessa, jossa olosuhteet ovat kuivat ja vallitsee normaali ilmanpaine, hemiselluloosan hajoaminen ja asetyyliryhmien jakautuminen on vähäistä. Ligniinin suhteellinen osuus puussa kasvaa prosessin aikana pääasiassa hiilihydraattien hajoamisen vuoksi, mutta myös ligniinimolekyylien välisiä sidoksia lisäävien kondensaatioreaktioiden tuloksena. Menetelmän vaikutukset selluloosan osuuteen puussa ovat vähäiset, vaikka toisen vaiheen aikana selluloosan hajoamista tapahtuukin (Boonstra & Tjeerdsma 2006).

ThermoWood<sup>®</sup> -menetelmästä poikkeavia lämpökäsittelymenetelmiä on kehitetty myös ainakin Ranskassa (**Retification**), Kanadassa (**Perdure**), USA:ssa (**Westwood Heat Treated Lumber**) ja Hollannissa (**Lambowood**) (Hill 2011). Retification-menetelmässä noin 12 % kosteusuhteeseen esikuivatun puutavaran lämpötila nostetaan hitaasti 210–240 celsiusasteeseen tyypellä kyllästetyssä tilassa, jossa hapen pitoisuus saadaan pidettyä alle kahdessa tilavuusprosentissa. Perdure-menetelmässä tuore puutavaraa kuivataan ensin koneellisesti, jonka jälkeen se lämmitetään 230 °C lämpötilaan vesihöyryllä kyllästetyssä tilassa käyttäen hyväksi tuoreen puun sisältämää vettä. Molemmissa edellä mainituissa menetelmissä maksimilämpötilalla vaikutetaan puun kestävyteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin: lämpötilan kasvattaminen lisää biologista kestävyttä mutta alentaa lujuutta. Taivutuslujuus heikkenee jopa 40 %. Molemmat menetelmät ovat hyvin herkkiä lämpötilan vaihteluille ja lämpötilan tarkka seuranta onkin prosessin onnistumisen kannalta tärkeää. On havaittu, että maalin kiinnittyminen näillä menetelmillä käsiteltyyn puuhun heikkenee voimakkaasti erityisesti pihkaisilla puulajeilla.

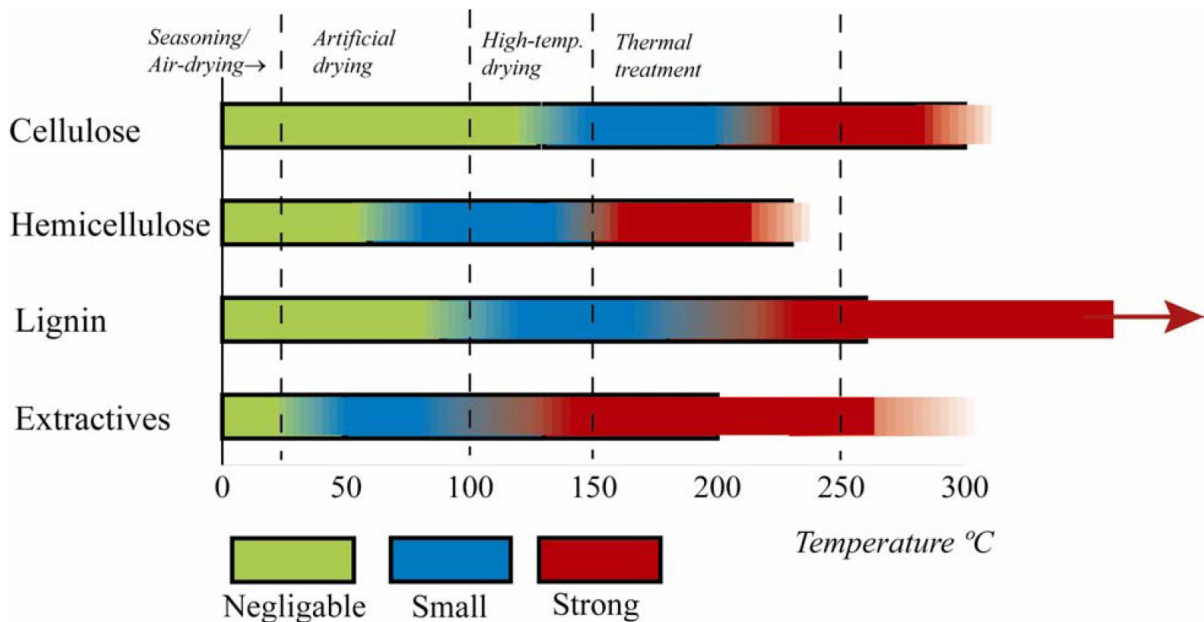
Lämpökäsittely alhaisessa happipitoisuudessa voidaan tehdä myös kuumassa öljyssä (Oil heat treatment/oleothermal process). Saksalaisessa **Menz Holz<sup>®</sup>** -tuotteessa öljynä käytetään esimerkiksi rapsinsiemenöljyä, pellavaöljyä tai auringonkukkaöljyä. Öljylämpökäsittely tehdään käsittelysylvinterissä, jossa erillisestä varastointitankista pumpattua öljyä kierrätetään puutavaran ympärillä. Öljyn lämmönjohtavuus on hyvä ja öljykäsittely poistaa puusta tehokkaasti hapen. Puun lahonkestävyyden paraneminen on puulajikohtaista ja riippuu eri puulajeilla voimakkaasti öljyn lämpötilasta: kuusella vaaditaan 220 °C, kun taas männylle riittää n. 200 °C luokan 2 lahonkestävyyden saavuttamiseksi. Maalattavuus erityisesti vesiohenteisilla akryylimaaaleilla on parempi kuin kaasumaisen väliaineen avulla lämpökäsitellyllä puulla. Lisäksi mittapysyvyys paranee noin 40 %. Ranskalaisessa kaksivaiheisessa **bi-oleothermal<sup>®</sup>** -prosessissa käsiteltävä tuore puumateriaali upotetaan normaalissa ilmanpaineessa ensin kuumaan (110–200 °C) öljyyn kunnes materiaalin kosteus on laskenut tavoitetasolle (esim. Grenier ym. 2003, Podgorski ym. 2008, Simon ym. 2011). Tässä vaiheessa kuuma öljy aikaa saa veden höyrystymisen ja puumateriaalin tehokkaan kuivumisen. Toisessa vaiheessa yhä kuuma puumateriaali upotetaan muutamaksi minuutiksi haaleaan (20–80 °C) öljyyn, jolloin puumateriaali jäähtyy, vesihöyry tiivistyy ja kappaleen sisälle muodostuu alipaine. Syntynyt alipaine johtaa tehokkaaseen öljyn imeytymiseen puumateriaaliin. Öljynä käytetään yleensä pellavaöljyä joko sellaisenaan tai jonkin biosidin kanssa.

## 4.2. Puun lämpömodifioinnin tutkimus- ja kehitystyö

Lämpömodifiointitutkimusten kohteena ovat viime aikoina olleet lämpökäsittelyyn liittyvä lujuuden heikkeneminen ja sen riippuvuus käsittelyparametreista, lujuuteen vaikuttavat kemialliset reaktiot ja anatomiset muutokset (esim. Wang ym. 2012, Cai ym. 2015, Lekounougou ym. 2011).

Lämpökäsittely heikentää useimpia puun lujuusominaisuuksia. Lujuuden heikkeneminen on seurausta eksotermisistä reaktioista puussa johtaen massan pienenemiseen ja se korreloi voimakkaasti käsittelylämpötilan kanssa (kuva 4). Eksotermiset eli lämpöä vapauttavat reaktiot voimistuvat erityi-

sesti 200 Celsiusasteen yläpuolella (Hanger ym. 2002; Poncsák ym. 2006). Selluloosamolekyylien kristallisoitumisasteen lisääntymisen seurauksena lämpökäsitelty puu on hauraampaa kuin käsittelemätön puu: esimerkiksi taivutuskokeessa lämpökäsitellyn puun muokkauslujuutumiskäyrässä havaittava plastisen muodonmuutoksen alue on selvästi kapeampi ja murtumavoima on pienempi kuin käsittelemättömässä puussa (Xie ym. 2013). Myös öljylämpökäsittelyn on havaittu heikentävän puun lujuutta n. 30 %, mutta jäykkyyden alenemista ei ole havaittu (Rapp & Sailer 2001).



**Kuva 4.** Puun käsittelylämpötilan vaikutus puun pääkomponenttien ja uuteaineiden rapautumiseen (Sundqvist 2004)

Puun kuivuessa korkeassa lämpötilassa sen mekaanisten ominaisuuksien muuttumiseen vaikuttaa myös vetysidosten muodostuminen eli sarveutuminen (hornification) (Borrega & Kärenlampi 2010). Sarveutumista tapahtuu adsorptiovaiheessa ja se vähentää vesimolekyylien sidospaikkoja puussa. Borrega & Kärenlampi (2010) havaitsivat sarveutumista erityisesti silloin, kun ympäristön kosteusolosuhteet vaihtelivat korkeassa lämpötilassa kuivattaessa. Tällä tavoin kuivatun ja lämpökäsitellyn tai kuumakuivatun puumateriaalin tasapainokosteus oli alhainen ja lujuusarvot suuremmat kuin puumateriaalissa, joka oli kuivattu joko alhaisessa tai korkeassa mutta tasaisessa ympäröivässä kosteudessa. Borregan & Kärenlammen (2010) mukaan tällä havainnolla voi olla merkitystä puun modifiointimenetelmiä kehitettäessä.

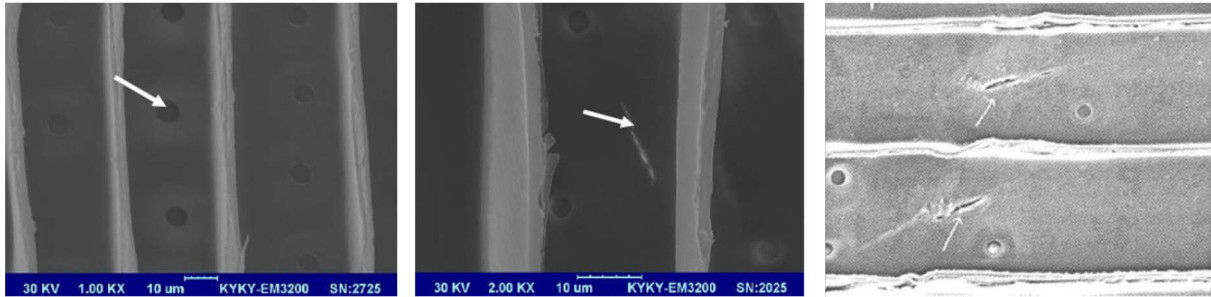
Lämpökäsittelyn seurauksena puun kimmokerroin ja syiden suuntainen puristuslujuus pienenevät yleensä suhteellisesti vähemmän kuin murtolujuus tai voivat jopa kasvaa vaikka hauraus lisääntyykin (esim. Boonstra ym. 2007a, 2007b, Heräjärvi 2009, Widmann & Beikircher 2010, Lekounougou ym. 2011). Sekä staattinen että dynaaminen taivutuslujuus voivat heiketä jopa 50 % (Esteves & Pereira 2009; Sandberg & Kutnar 2016). Tiheyden ja murtolujuuden pienenemisen vuoksi lämpökäsiteltyä puuta ei suositella käytettäväksi kantavissa rakenteissa (Jämsä & Viitaniemi 2001, Widmann ym. 2012). Nykyisin rakenteellinen sahatavara tulee lujuuslajitella, mutta lujuuslajittelulaitteita ei ole kalibroitu lämpökäsitellylle puulle. Lämpökäsittelyn puuhun aiheuttamat muutokset määräytyvät prosessissa käytetyn käsittelylämpötilan ja -ajan tuloksena. Lämpötila on näistä vaikuttavampi (Welzbacher ym. 2007): lämpökäsittelyn vaikutus puun ominaisuuksiin on suoraan verrannollinen käytettyyn modifiointilämpötilaan. Kotilaisen ym. (1999) mukaan massahäviö riippuu voimakkaasti käsittelylämpötilasta, mutta käsittelyajan lisäys 60:sta 480 minuuttiin vaikutti massahäviöön vain vähän. Lämpökäsittely alentaa puun tiheyttä ja esimerkiksi iskujauhamisvastuksen (resistance to impact milling, RIM) heikkeneminen on suoraan verrannollinen puun massan alenemiseen (Welzbacher ym.

2007). Boonstra ym. (2007a) havaitsivat sekä käsittelemättömien että lämpökäsittelyjen tolppien tiheyden korreloivan paremmin kimmomoduulin kuin murtolujuuden kanssa, mikä on epätyypillistä puulla. NMR-analyysin (nuclear magnetic resonance) perusteella lämpökäsittely hajottaa hemiselloosaa ja johtaa sen deasetyloitumiseen sekä selluloosakristalliittien osuuden kasvuun (Sivonen ym. 2002). Kaiken kaikkiaan lämpökäsittelyn aikana puussa tapahtuu samanaikaisesti useita kemiallisia reaktioita, mikä vaikeuttaa kemiallisten muutosten analysointia.

Lämpökäsittelyn aikaansaaman värinmuutoksen saavuttamista nykyisin käytössä olevia menetelmiä alemmassa lämpötilassa on tutkittu, jotta lujuuden heikkenemistä voisi vähentää. Dagbro ym. (2010) havaitsivat, että käsittelylämpötilaa voidaan alentaa 20–30 °C saman värinmuutoksen aikaansaamiseksi, jos normaalin höyrynpaineen sijasta lämpökäsittely tehdään paineistetussa vesihöyryssä (WTT-prosessi). Ilmiön todennäköinen selitys oli ero puun kosteudessa, joka syntyi käsittelyiden välille höyrynpaineen vaihdellessa. Myös Möttönen & Kärki (2013) tutkivat puun kosteuden vaikutusta lämpökäsittelyn koivupuun ominaisuuksiin puunsyiden kyllästymispisteen alapuolella, ja havaitsivat että värinmuutos oli sitä voimakkaampi mitä suurempi puun lähtökosteus oli lämpökäsittelyprosessin alussa. Käytännössä on kuitenkin havaittu, että puussa oleva kosteus voi aikaansaada sisähalkeamia, kun kosteus on kuumakuivaus- ja lämpökäsittelyprosessin alkaessa PSK:n tasolla tai sitä korkeampi. Puun rapautumista lämpökäsittelyn aikana voidaan Willemsin (2009) mukaan vähentää ns. Burmeserin tekniikkaan perustuvalla käsittelyllä, jossa lämpökäsiteltävää puumateriaalia pidetään lähellä ympäristön kanssa tasapainossa olevaa hygroskooppista tilaa. Käytännössä tällainen käsittely täytyy tehdä täysin suljetussa tilassa esimerkiksi autoklaavissa, jossa ilman paine, kosteus ja lämpötila ovat hallinnassa.

Lämpökäsittely näyttää muuttavan enemmän lehtipuun kuin havupuun ligniiniä (Esteves ym. 2013). Zaman ym. (2000) havaitsivat koivupuun massahäviön lämpökäsittelyssä olevan suurempi kuin mäntypuun massahäviö suuremmasta hiilihydraattipitoisuudesta (selluloosa ja hemiselloosa) johtuen. He eivät havainneet eroa massahäviössä ilma- ja typpikehän välillä, mutta materiaalin alkukosteudella oli siihen selvä vaikutus. Hanger ym. (2002) havaitsivat, että kehäputkiloisilla tammella ja saarnella lämpökäsittelyn edulliset vaikutukset saavutettiin alhaisemmalla käsittelylämpötilalla (185 °C) kuin hajaputkiloisilla lehtipuulajeilla ja havupuulajeilla. Lämpökäsittelyn puun lujuuden heikkeneminen on voitu yhdistää lämpökäsittelyprosessin aikana ydinsäteiden lähelle syntyviin säteen suuntaisiin halkeamiin pyökillä ja tangentin suuntaisiin halkeamiin kuusen kesäpuussa (Welzbacher ym. 2011). He havaitsivat puun mikrorakenteessa muutoksia, jotka näkyivät pituus- ja poikkisuuntaisina murtumina pyökin putkiloissa ja sekä pituus- että poikkisuuntaisina murtumina kuusen soluseinässä ja aiheuttavat erityisesti rakenteellisen lujuuden heikkenemistä. Murtolujuuden heikkeneminen on tulosta sekä soluseinän mikrorakenteellisista muutoksista että halkeilun ja muiden makromittakaavan vikojen syntymisestä lämpökäsittelyssä. Solurakenteeseen syntyvien halkeamien ja murtumien voidaan olettaa lisäävän myös puumateriaalin permeabiliteettia, jolloin modifiointikemikaalien ja suoja-aineiden imeytyminen tehostuu menetelmissä, joissa yhdistetään kemiallista modifiointia ja lämpökäsittelyä (Kuva 5).

Hanhijärven (1998) mukaan kostea puu laajenee viskoelastisesti lämmön vaikutuksesta tangentin suunnassa, mutta kutistuu säteen suunnassa. Tämä johtuu ns. hygrotermisestä tasaantumuksesta. Laajeneminen on suuruudeltaan enimmillään 0,8 %. Kuivauksen kuluessa viskoelastisten muodonmuutosten merkitys peittyy kuivumiskutistumisen vaikutuksen alle. Lämpölaajenemisen anisotropia voi siten aiheuttaa sisähalkeilua puumateriaalissa kuumakuivauksen alkuvaiheessa, mutta lämmitettäessä materiaali muuttuu elastisemmaksi.



**Kuva 5.** Käsittlemättömässä puussa soluseinämän permeabiliteetti riippuu rengashuokosten läpäisevyydestä (vasemmalla). Kuivaus korkeassa lämpötilassa ja lämpökäsittely saavat aikaan uusia halkeamia. Kuvassa mikroskooppikuva (keskellä) ja radiotaajuuden (oikealla) avulla kuivattua kiinanpihdan (*Cunninghamia lanceolata*) puuainetta (Lu ym. 2005, He ym. 2014).

Lämpökäsitellyn sahatavaraan, ja erityisesti sen pintapuun puoleiselle lappeelle, syntyy vaihtelevissa kosteusolosuhteissa herkemmin halkeamia kuin modifioimattomaan puuhun, vaikka lämpökäsittely vähentää puun kosteuselämistä (Altgen ym. 2015). Pintahalkeilua voidaan rajoittaa materiaali-valinnalla, asettamalla kappaleen sydänpuoli ulospäin ja pinnoittamalla. Todorović ym. (2015) mukaan on mahdollista ennustaa lämpökäsitellyn puun laatua ennen lämpökäsittelyä mitatun FT-NIR spektrin (Fourier Transform Near Infrared) perusteella ja siten päättää mikä kappale kannattaa lämpökäsitellä. Tomppo ym. (2014; 2016) tutkivat ainetta rikkomattomien (NDT) menetelmien soveltuvuutta lämpökäsitellyn puun halkeilun ja tiheyden määrittämiseen ja havaitsivat impedanssispektroskopisen ja ultraäänimenetelmän soveltuvan siihen.

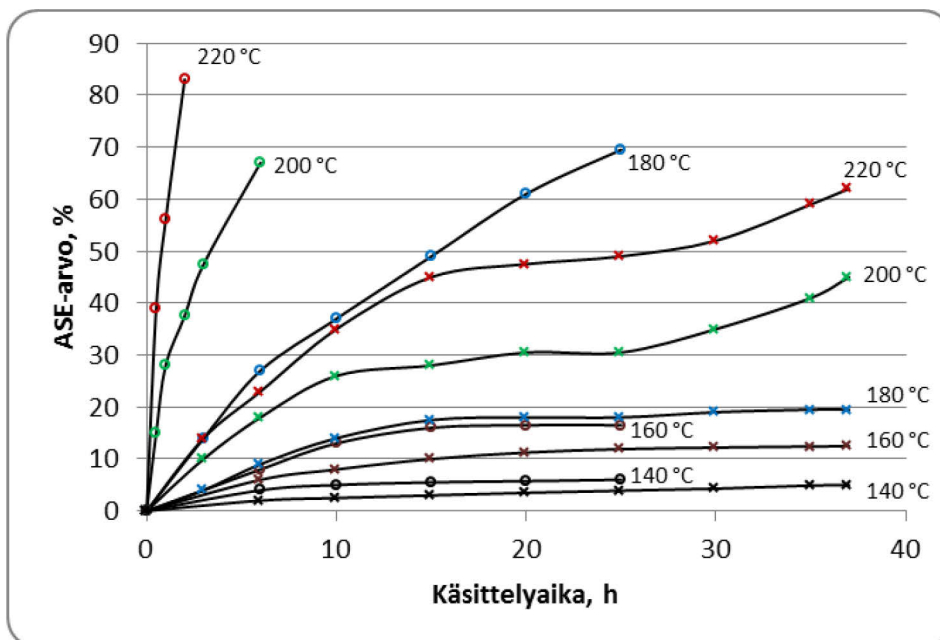
Kervinen (2012) tutki puun prosessiparametrien vaikutusta havupuusahatavaran väriin ja iskulujuuteen ja havaitsi sekä käsittelylämpötilan että käsittelyajan vaikuttavan tummuuteen ja keltaisuuteen. Käsittelyaika ei kuitenkaan vaikuttanut olennaisesti punaisuuteen. Sahatavarakappaleiden sydänlape oli tutkimuksessa aina vaaleampaa kuin pintalape. Lämpökäsittely heikensi puun iskuluutta ja iskulujuus heikkeni puun värin tummentuessa. Brischken ym. (2007) mukaan jauhamalla homogenisoidun puunäyteotoksen vaaleus- ja keltaisuusarvoilla oli hyvä lineaarinen korrelaatio lämpökäsitellyn voimakkuuden kanssa ja niitä voidaan käyttää lämpömodifioidun puun laadunvalvonnassa. Torniainen ym. (2016) puolestaan havaitsivat sahepinnan keltaisuus- ja punaisuustasojen ennustavan parhaiten lämpökäsittelyluokkaa, ja esittävät näiden parametrien käyttöä ThermoWood®-prosessilla lämpökäsitellyn männyn ja kuusen laadunvalvonnassa.

Lämpökäsitelty puu harmaantuu pinnoittamattomana UV-valon vaikutuksesta nopeammin kuin käsittlemätön puu. UV-valon aiheuttama värinmuutos on sitä vähäisempää mitä alhaisempi käsittelylämpötila on ollut (esim. Miklečić ym. 2011). Lämpökäsitellyn puun pinnan havaittu inaktivoituminen (Pétrissans ym. 2003) osaltaan parantaa puun vedensietokykyä ja mittapysyvyyttä, mutta voi myös heikentää esimerkiksi sen liimattavuutta.

Puun lahonkestävyyden lisääntyminen lämpökäsitelyssä perustuu soluseinän hemiselluloosapolymeerien hajoamiseen pieniksi orgaanisiksi yhdisteiksi, vedeksi ja furaani-tyypin haihtuviksi yhdisteiksi (Rowell ym. 2009). Kriittinen monosakkaridi, joka aikaansaa sieni-infektion hemiselluloosassa on arabiinose, sillä se on ainoa sokerikomponentti hemiselluloosan vähemmän vakaassa viisirengasrakenteessa (esim. Fengel & Wegener 1989).

Laboratoriotesteissä ThermoWood®-menetelmällä lämpökäsitellyn männyn ja kuusen sydän- ja pintapuun lahonkesto korreloi käsittelylämpötilan kanssa lämpötila-alueella 170–230 °C (Metsä-Kortelainen & Viitanen 2009). Welzbacherin ym. (2011) mukaan lämpöpuun vastustuskyky sieni-infektiota vastaan korreloi rakenteellisen lujuustunnuksen (resistance to impact milling, RIM), vaa-leuden (L\*), tasapainokosteuden (EMC) ja turpoamisvastustuksen (anti-swelling efficiency, ASE) kanssa. Myös homeenkesto on lämpökäsitelyssä puussa parempi kuin käsittlemättömässä männyn pintapuussa (esim. Ahmed ym. 2013b).

Esteves ym. (2008) havaitsivat massahäviön olevan rannikkomännyn (*Pinus pinaster*) lämpökäsittelyssä noin 50 % suurempi ilman vesihöyryä kuin vesihöyryn kanssa. Samassa tutkimuksessa mitattujen lujuusominaisuuksien alenema korreloi selvästi massahäviön kanssa. Karlsson ym. (2011) tutkivat lämpökäsittelyä eri väliaineissa, jotka olivat kylläinen vesihöyry (160 °C ja 180 °C), rapsiöljy, kiinanpuuöljy (tung oil) ja pellavaöljy sekä pellavaöljyn ja kahden fungisidin (propioconazole, IPBC) sekoitus. Lämpökäsittelyssä käytettävällä väliaineella voidaan vaikuttaa kykyyn kestää lahottajasieniä ja vaihtelevia lämpö- ja kosteusolosuhteita. Pellavaöljy oli lahontorjunnassa hieman tehokkaampi kuin puuöljy, ja fungisidien käyttö paransi vaikutusta selvästi. Käsittely kylläisessä vesihöyryssä vähentää massan häviötä lahotuskokeessa sitä enemmän mitä korkeampi käsittelylämpötila on. Massan häviö kasvaa sekä käsittelylämpötilan että käsittelyajan kasvaessa ja sama massan häviö voidaan saavuttaa erilaisilla lämpötilan ja ajan yhdistelmillä. Mitä korkeampaa käsittelylämpötilaa käytetään, sitä pienemmällä massan häviöllä saavutetaan vastaava parannus tietyissä puun ominaisuuksissa, kuten biologisessa kestävyudessa, tasapainokosteudessa ja mittapysyvyydessä (Welzbacher ym. 2007). Hapen läsnäolo lisää puumateriaalin mittapysyvyyttä erityisesti yli 180 celsiusasteen lämpökäsittelyssä (Kuva 6).



**Kuva 6.** ASE-arvon käyttäytyminen pihtakuusipuumateriaalissa jota on lämpökäsittely eri lämpötilatasoilla sekä normaalissa hapellisessa ilmatilassa (o) että tyhjässä (x) (mukaiillen Wang ym. 2000). Mitä suurempi on ASE-arvo, sitä vähemmän lämpökäsittely puu turpoaa kosteuden vaikutuksesta.

Dubey ym. (2011) tutkivat pellavaöljyn esilämmityksen vaikutusta öljykyllästyneen radiatamännyn väriin ja mittapysyvyyteen. He havaitsivat, että esilämmitys pienensi öljyn viskositeettia, mikä vähensi painon lisäystä kyllästyksessä. Väriin ja mittapysyvyyteen tällä ei ollut vaikutusta, mutta vedenhylkivyyks heikkeni.

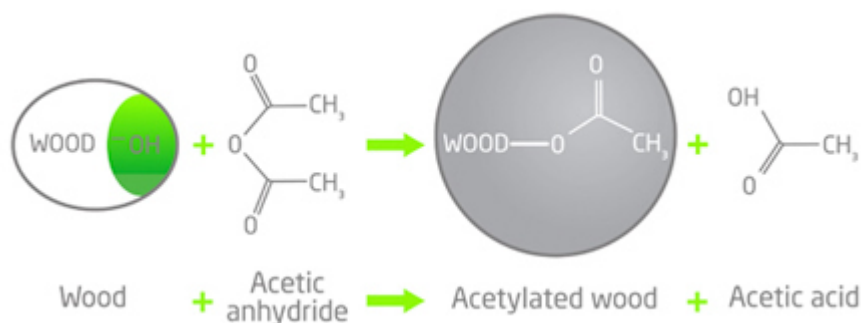
Kenttäkokeisiin perustuvissa tutkimuksissa, joissa testattiin maanpinnan yläpuolista käyttöä, lämpökäsittelyissä mänty- ja kuusinäytteissä havaittiin vain alkavaa lahoa kun käsittelemättömät vertailukappaleet olivat lahonneet voimakkaasti 9 vuoden kuluttua kokeen alkamisesta (Metsä-Kortelainen & Viitanen 2015). Vastaavaan tulokseen päätyivät myös Stingl ym. (2010) kahdeksan vuotta kestäneessä kenttäkokeessaan lämpökäsittelyllä kuusisahatavaralla. Lämpökäsittelyn on tutkimuksissa havaittu vähentävän oleellisesti myös homeen kasvu puun pinnalla (esim. Frühwald ym. 2008).

## 4.3. Puun kemialliset modifiointimenetelmät

### 4.3.1. Asetylointi

Puun asetylointikäsitteilyn periaatteet kehitettiin jo 1900-luvun alussa, mutta vasta 1970-luvulla aloitetut tutkimuspanostukset johtivat asetylointikäsitteilyn kaupallistamiseen vuosituhannen vaihteessa. Asetyloitua puuta tuotetaan tällä hetkellä Keski-Euroopassa kauppanimellä Accoya®. Käsitteily koostuu etikkahappoanhydridin imeyttämisvaiheesta ja sitä seuraavasta eksotermisen reaktion alkamisen vaatimasta lämmitysvaiheesta noin 70 °C lämpötilassa. Reaktion tapahduttua etikkahappoanhydridin jäännös (etikkahappo) poistetaan puusta jälkikäsitteilyllä (Bongers & Beckers 2003). Etikkahapon anhydridin reagoidessa puussa soluseinän polymeerien hydroksyyli-ryhmät muuttuvat asetyyli-ryhmiksi (Kuva 7). Tämä alentaa puun tasapainokosteutta vesimolekyylien sitoutumispaikkojen vähetessä (esim. Chang & Chang 2002). Asetyloitu puu asettuu lahonkestävyydeltään luokkaan 1 edellyttäen että painonlisäys modifioinnin jälkeen (WPG, ks. luku 3.1) on yli 20 %. Mittapysyvyys paranee vähintään 75 %. Tämä selittyy puunsyiden kyllästymispisteen (PSK) ja tasapainokosteuden laskemisella. Jo alle 20 prosentin WPG-tasolla PSK laskee 10–15 prosentin kosteussuhteeseen. Rowellin (2014) mukaan PSK laskee havupuilla voimakkaammin kuin lehtipuilla. Olosuhteissa, joissa käsittelemättömän puun tasapainokosteus asettuu noin 12 prosentin tasolle, on 20 prosentin WPG-tasolle asetyloidun puun tasapainokosteus 4–5 % (Rowell 2014). Lujuusominaisuudet eivät muutu pientä kovuuden lisäystä lukuun ottamatta. Asetyloidun puumateriaalin UV-kesto ja maalattavuus ovat hyvät. Etikkahapon ylimäärän takia kiinnikkeiden ruostuminen ja hajuhaitat voivat aiheuttaa ongelmia (Hill 2011). Keski-Euroopassa tuotetaan myös asetyloitua MDF levyä kauppanimellä MediteTricoya®, jolle luetaan erinomaiset lahonkesto-ominaisuudet ja muotopysyvyys. Asetyloitua puuta käytetään ulko- vuorauksiin, terassi- ja kansilaudoituksiin, oviin ja ikkunoihin, puutarhakalusteisiin ja puurakentamisessa mm. liimalevypalkkeihin.

Asetyloinnin oletettiin pitkään estävän sieni-infektiota muodostamalla kemiallisia (Takahashi ym. 1989, ks. Rowell ym. 2009) tai fysikaalisia (Hill ym. 2005, ks. Rowell ym. 2009) esteitä sienien infektion entsyymitoiminnalle. Rowellin ym. (2009) mukaan asetyloidun puun suurempi lahonsietokyky käsittelemättömään puuhun verrattuna perustuu kuitenkin yksinkertaisesti asetyloidun puun alhaiseen tasapainokosteuteen. Tasapainokosteuden ollessa alhainen, soluseinän glykosididisidoksissa ei ole vesimolekyyliä, joita sienitartunnan mahdollistava entsyymitoiminta tarvitsee hydrolyysia varten. Painonlisäys modifiointikäsitteilyssä selittää noin 50 % asetyloidun puun lahonkestävyydestien tuloksista (Alfredsen ym. 2013). Asetyloidun puun lahonkestävyys näyttääkin riippuvan modifioinnin voimakkuuden ja vesikosketukselle alttiina olemisen yhteisvaikutuksesta (Alfredsen & Pilgård 2014).



**Kuva 7.** Puun ja etikkahappoanhydridin välinen kemiallinen reaktio asetylointiprosessissa ([www.accoya.com](http://www.accoya.com)).

### 4.3.2. Furfulointi

Puun furfulointi (tai furfurylointi) furfuryylialkoholilla ( $C_5H_6O_2$ ) perustuu kovalenttisin sidoksin muodostuneen furaani-polymeerin haarautumiseen ja yhdistymiseen soluseinän polymeerien kanssa. Ainakin teoriassa furfuryylialkoholi voi happokatalysireaktiossa muodostaa kovalenttisen sidoksen myös ligniinin kanssa. Furfuloitua puuta tuotetaan kauppanimellä Kebony® käyttäen hydrolysoidusta biojätteestä tuotettua furfuryylialkoholia. Puu kyllästetään käsittelykemikaalilla käyttäen täyssolu- eli Bethell-käsittelyä. Tämän jälkeen seuraa välikuivausvaihe sekä reaktion tasaannuttaminen. Tasaannuttamisvaiheessa puu lämmitetään 6–8 tuntia vesihöyryn avulla 80-140 °C:ssa. Lopuksi puu kuivataan kuivaamossa päästöjen minimoimiseksi ja painon vähentämiseksi. Furfulointikäsittely heikentää puun iskulujuutta voimakkaasti ja sitä enemmän mitä suurempi on modifiointikäsittelyn aiheuttama massan lisäys. Toisaalta furfulointikäsittely lisää tiheyttä, kovuutta, taivutusmurtolujuutta ja jäykkyyttä sekä mittapysyvyyttä merkittävästi (esim. Esteves ym. 2011). Voimakas käsittely lisää lahonkestoja jopa lahonkestoluokkaan 1 saakka sekä kestoja termiittejä vastaan (Gascón-Garrido ym. 2013). Furfulointi ei lisää puun palaessa vapautuvien VOC- tai PAH-yhdisteiden määrää (Lande ym. 2004a; 2004b). Furfuloidun puun käyttökohteita ovat ulkokuivaus sekä terassi- ja kansilaudat.

Furfuloidussa puussa soluseinämän turpoaminen ja siten myös soluhuokosten koko riippuu puuhun imeytetyn furfuryylialkoholin määrästä. Imeytetyn furfuryylialkoholin määrä vaikuttaa siten myös puun plastisoitumis- ja puristumiskykyyn (Buchelt ym. 2012). De Vetterin ym. (2009) mukaan furfuloidun puun lahonkestävyyttä voidaan parantaa huomattavasti käyttämällä modifiointiliuoksessa suurempaa furfuryylialkoholin konsentraatiota kuin käytössä olevassa kaupallisessa modifiointiprosessissa. Lahonkeston ja puusta vapautuvan suotoveden ekotoksisuuden välinen riippuvuus tulisi optimoida hakemalla ensin riittävä lahonsuojataso ja arvioimalla sen jälkeen suotovesien ekotoksisuus (De Vetter ym. 2009). Tutkimuksessa lisääntynyt furfuryylialkoholipitoisuus puussa ei kuitenkaan lisännyt puusta vapautuvan suotoveden ekotoksisuutta samassa suhteessa, johtuen todennäköisesti furfuryylialkoholimonomereiden polymeroitumisasteen kasvamisesta ja mahdollisesta lisääntyneestä reagoimisesta puun rakenneosien kanssa.

### 4.3.3. DMDHEU -kyllästys

Furfuloinnin ohella toinen kaupallisesti merkittävä puun polymeerimodifiointimenetelmä on **Belmadur®**-menetelmä. Belmadur® -prosessissa käytettävä vesiliukoinen hartsin (1,3-dimetyyli-4,5-dihydroxy-ethylene urea, DMDHEU) ja katalyytti imeytetään puuhun painekyllästysmenetelmällä ja kovetetaan kuumakuivauskäsittelyllä yli 100 °C:ssa (Krause & Militz 2009). Katalyytit voivat olla metallisuoloja, sitruunahappoa tai ammoniumsuoloja joko yksin tai yhdistelminä. Kuivausvaiheen tarkoitus on poistaa vesi ja aikaansaada polymeerisidoksia puun rakennepolymeerien ja hartsin välille. Tällä menetelmällä voidaan parantaa mittapysyvyyttä ja kovuutta (Militz 1993) sekä jossain määrin myös vedenkestävyyttä (Papadopoulos & Mantanis 2012).

## 4.4. Muut kemialliset puun ominaisuuksien muokkausmenetelmät

### 4.4.1. Ammoniakkikäsittely

Ammoniakkikäsittelyä voidaan käyttää sekä muuttamaan puupinnan väriä että puukappaleiden läpimodifioimiseen. Useimmin ammoniakkikäsittelyä on käytetty tammelle, mutta myös ammoniakkimodifioitua pyökkipuuta tuotettiin Tšekissä vuoteen 2010 saakka alun perin 1960-luvulla kehitetyllä Lignamon-käsittelyprosessilla (Troppová ym. 2013, Pařil ym. 2014). Ammoniakkikäsittely perustuu sen korkeaan reaktioherkkyyteen puun rakenneosien kanssa; ammoniakki voi mm. tunkeutua selluloosan kiderakenteen sisälle (Pařil ym. 2014). Ammoniakin tunkeutuminen molekyylisidoksien väliin johtaa sidosten häiriöön ligniinin ja hiilihydraatin muodostamisessa yhdisteissä. Typpipitoisuuden li-



sääntymisen seurauksena esterisidokset korvautuvat amidisidoksilla, mutta puun rakenneosien pitoisuudet eivät muutu oleellisesti. Lignamon-käsittelyprosessin aluksi esikuivattua puuta pehmennetään lämmön (noin 103 °C) ja ammoniakkihöyryn avulla, jonka jälkeen sitä puristetaan 0,8–1,3 MPa paineella puun tiivistämiseksi ja tiheyden lisäämiseksi. Lopuksi ylimääräinen tyyppi poistetaan puusta ja se kuivataan ja tasaannutetaan loppukosteuteen. Puun fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat ammoniakkihöyryssä vähemmän kuin lämpökäsittelyssä (Weigl ym. 2012). Myös UV-valon aiheuttama värinmuutos on ammoniakkihöyryssä puussa vähäisempää kuin lämpökäsittelyssä puussa (Miklečić ym. 2012a; 2012b). Pařil ym. (2014) havaitsivat ammoniakkihöyryä ja puristusmodifioidun puun kimmokertoimen, kovuuden, kosteudenkestävyyden ja ASE-arvon olevan paremmat kuin pelkällä puristusmodifioidulla puulla. Puun värinmuutos on voimakas, mutta tiheys ja lujuus pysyvät käsittelemättömän puun tasolla. Joillakin puulajeilla ammoniakkihöyry heikentää muotopysyvyyttä, erityisesti tangentin suunnassa (Weigl ym. 2009).

Puun kyllästäminen nestemäisellä tai kaasumaisella ammoniakkihöyryllä saa aikaan puun plastisoitumisen, mikä mahdollistaa taivutuksen samaan tapaan kuin perinteisessä höyrytaivutuksessa (esim. Hoadley 1980, Bodig & Jayne 1982). Kuivatuksen jälkeen komponentti jää taivutettuun muotoon ja säilyttää lähes alkuperäisen lujuuden ja jäykkyyden. Hoadleyn (1980) mukaan etuna höyryä ja lämpötilan avulla tehtävään plastisointiin on, että ammoniakkihöyry plastisoi myös useimpia sellaisia puulajeja, joiden plastisointi höyrytyksellä ei onnistu. Ammoniakilla plastisointi on kuitenkin teollisena prosessina vaativa mm. ammoniakkihöyryä alhaisen kiehumispisteen (-33 °C) sekä höyryä aiheuttamien terveyshaittojen vuoksi, mistä syistä se ei ole yleistynyt.

#### 4.4.2. Öljy-, vaha- ja parafiinikyllästys

Öljyjä voidaan käyttää paitsi puun lämpömodifioinnissa väliaineena vesihöyryn sijaan myös imeyttämällä niitä puuhun vedenhylkivyyden parantamiseksi. Yleensä öljyllä modifioinnissa on kyse molempien vaikutustapojen hyödyntämisestä. Myös puutavaran kuivaus öljyssä voidaan yhdistää samaan käsittelyprosessiin (Tarvainen ym. 2001). Eniten käytetyt luonnonöljyt ovat rypsi- ja pellavaöljy sekä mäntyöljy. Kaksoissidosten suuren määrän vuoksi öljyjen kiinnittyminen tai kovettuminen puussa niihin, etteivät ne tahraa, kestää kauan ilman lisäaineita tai -kuivausta. Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan modifioimalla öljyjä esimerkiksi hapettamalla (puhaltamalla) ja lisäaineiden avulla (Tarvainen 2001).

Suomessa Ekopine Oy on kehittänyt puun mäntyöljykyllystä erityisesti piha- ja ympäristöraentamisen tuotteisiin käyttäen prosessissaan mäntyöljyä ja siitä tehtyjä jatkojalosteita. Tässä käsittelyprosessissa mäntyöljykyllystä tehdään upottamalla tai painekammiossa kuumassa, yli 100 °C mäntyöljyssä (Tarvainen ym. 2001). Prosessiin kuuluu myös lämpökäsittelyvaihe, jossa käsittelykammion lämpötila on korkeintaan 160 °C. Lämpökäsittelyvaiheen tarkoituksena on mäntyöljyn kiinnittymisen tehostaminen, jolloin sen tihkuminen ulos puusta vähenee ja öljy muodostaa vettä pidättävän kalvon puutuotteen pinnalle. Mäntyöljyn menekki on suhteellisen suuri käytettäessä raakamäntyöljyä, mutta menekkiä voidaan pienentää jopa puoleen ilman huomattavaa tehon häviämistä käyttämällä joko vesi-öljy- tai öljy-vesi -emulsiota (Hyvönen ym. 2006). Mäntyöljyn kiinnittymisen tehostamista on tutkittu myös maleiinihappoanhydridin avulla (Paajanen ym. 1999). Tällä yhdistelmällä öljy saadaan kovettumaan ja tahraavuusongelmat ratkaistuksi, mutta se ei kiinnity kemiallisesti puuhun. Maleiinihappoanhydridi on kuitenkin terveydelle vaarallinen yhdiste ja teollisissa prosesseissa syntyvät höyryt ovat huomattava terveysriski. Mäntyöljyn muodostaman kalvon kuivuttua puun pinnalle estää kalvo veden ja vesihöyryn imeytymisen puuhun tehokkaasti. Metlan tutkimuksessa mäntyöljykyllystä piti puun kosteussuhteen noin 20 % alapuolella jopa pitkäaikaisessa vesiupotuksessa (Heräjärvi ym. 2012; 2014). Sen voi siis olettaa heikentävän lahottajasienten kasvuedellytyksiä oleellisesti käsittelemättömään puuhun verrattuna. Mäntyöljykyllystyksen on havaittu heikentävän puun taivutusmurtolujuutta jonkin verran (Möttönen ym. 2012). Puun sisälle jäävällä kovettumattomalla

mäntyöljyllä on taipumus tihkua ulos puusta lämmön vaikutuksesta ja vedenhylkivyyden säilyminen pitkäaikaisessa käytössä vaatii vielä tutkimustietoa.

Vahat ovat pitkäketjuisten estereiden ja pitkäketjuisten alkoholien estereitä. Luonnonvahojen kuten mehiläisvaha, karnaubavaha ja fossiilisten raakaöljystä ja ruskohiilestä tuotettavien vahojen lisäksi on olemassa synteettisiä vahoja, esimerkiksi hiilivety- ja amidivahoja. Eri vahat ovat hyvin erilaisia ominaisuuksiltaan (esim. sulamispiste, pintajännitys, viskositeetti, tuoksu, kovuus), ja mm. parafiinit ja polyolefiinit toimivat erinomaisesti vettä hylkivinä (hydrofobisina) puun kyllästysaineina, koska ne eivät sisällä vettä sitovia funktionaalisia ryhmiä (Scholz ym. 2010). Vahat eivät ole biosidisiä ja esimerkiksi sienet voivat niitä hajottaa. Jotkin vahat kuitenkin sisältävät sienten kasvua estäviä aineita kuten hartsihappoja ja polyterpeenejä. Kuumavaha- tai parafiinikäsittelyssä puumateriaali kyllästetään painekammiossa riittävän korkeassa lämpötilassa ja paineessa kyllästeen riittävän tunkeuman saavuttamiseksi. Itävaltalainen Natwood-modifiointikäsittely perustuu puun kyllästämiseen mäntyöljystä erotetulla vahalla (Natwood 2016).

Puuseppien ja puukäsityöharrastajien vuosikymmeniä tuntema puun mitta- ja muotopysyvyyden parantamismenetelmä on vesiliukaisen, pienimolekyylisen polyetyleeniglykolin (PEG) imeyttäminen puun soluseiniin, jonka jälkeen solu pysyy likimain turvonneessa tilassa riippumatta puun kosteus-suhteesta (esim. Stamm 1959, Schneider 1969, Rowell & Konkol 1987, Hoffman 1988, Wallström & Lindberg 1995, Dumail & Salmén 1997, Bjurhager 2008, Wagner ym. 2016). PEG ei kuivuttuaan muutu veteen liukenemattomaksi vaan alkaa huuhtoutua, jos joutuu tekemisiin nestemäisen veden kanssa. PEG-käsitellyn puun pinta muuttuu tahmeaksi yli 60 prosentin ilmankosteudessa, mikä aiheuttaa korroosiota kiinnikkeille. Yleensä puu pintakäsitellään, jolloin glykoli ”kapseloituu” puun sisälle. PEG:n tavoin polyeettereihin kuuluvan polyglyserolimetakrylaatin (PGMA) on laboratoriokokeissa havaittu parantavan muotopysyvyyttä ja sen lisäksi myös lahonkestävyyttä pyökillä ja männyllä (Sou-lounganga ym. (2004).

#### 4.4.3. Piipohjaiset kyllästysmenetelmät

Silikaatit ovat piihappojen suoloja, jotka koostuvat piistä ja hapesta ( $\text{Si}_x\text{O}_y$ ), yhdestä tai useammasta metallista sekä mahdollisesti vedystä. Silikaateista vesilasia on käytetty pinnoitteena betonipintojen kittaukseen ja puun palonsuojaukseen. Vesilasi valmistetaan antamalla kvartsin reagoida väkevän natriumhydroksidiliuoksen kanssa. Reaktiotuotteena muodostuu natriumsilikaattien väkevä liuos, joka sisältää natriumortosilikaattia ( $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ ) ja natriummetasilikaattia ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Uutena puun modifiointimenetelmänä on tutkittu ja kehitetty painekyllästystä silikaattiliuoksella aiemmin Kymen ammattikorkeakoulussa (Väärä ym. 2012) ja myöhemmin StoraEnson Uimaharjun sahalta. Kehitystyön suurimpana kohteena on ollut vesilasin puuhun kiinnittymisen parantaminen. Sellaisenaan vesilasi on kosteuden ja lämmön vaihteluihin reagoivaa, helposti veteen liukenevaa ainetta ja sen puuhun kiinnittäminen vaatii apuaineita sekä painekäsittelyn jälkeisen lämpömodifioinnin (Myllylä 2010). Kehitystyön tuloksena markkinoille on tullut tuote terassi- ja laiturirakentamiseen kauppanimellä Q-Treat®. Tuotetta markkinoidaan mm. ekologisuudella, erinomaisella lahonkestolla ja lämpöpuuhun verrattuna paremmalla kestävyydellä. Silikaatti on tehoaineena myös ruotsalaisessa Organowood® tuotteessa.

Pfeffer ym. (2011) vertailivat sinistäjäsienen kasvua silikaatti- ja DMDHEU-kyllästettyjen männyn pintapuussa ja pyökkipuussa. Eri tavoin kyllästetyt puumateriaalit erosivat happamuudeltaan silikaattikyllästetyn puun ollessa emäksistä (pH 9,7–12,0) ja DMDHEU-kyllästetyn hapanta (pH 3,8–4,2). Molemmat käsittelyt vähensivät sinistäjäsienen kasvua, vesilasikyllästys kuitenkin enemmän. Kemiallisen analyysin perusteella puun sisältämien sokerien määrä väheni vesilasikyllästyksessä.

Puun silikaattikyllästykseen soveltuu myös sooli-geeli menetelmä, jossa puumateriaalia kyllästetään nestemäisellä kolloidisen seoksen (sooli) monomeerisenä esiintyvällä metallioksidilla (esim. Unger ym. 2013). Lämmön avulla tapahtuvassa jälkikäsitelyssä metallioksidi muodostaa yhdistyneen metallioksidin polymeeriverkoston. Giudice ym. (2013) havaitsivat araukarian (*Araucaria angustifolia*)

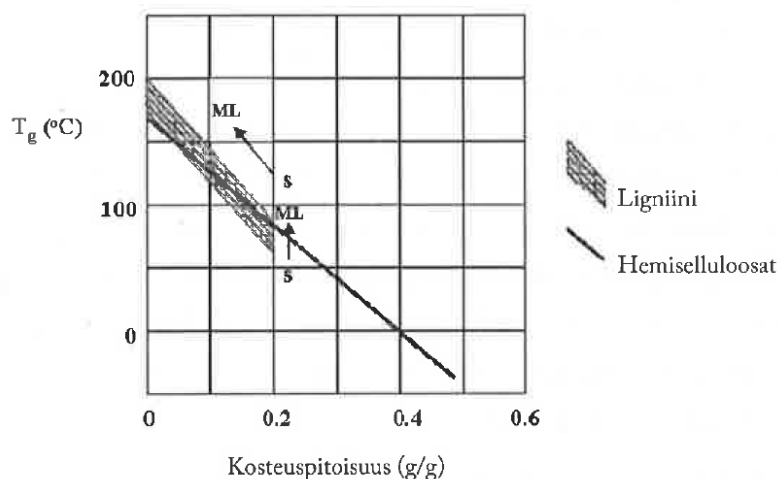
lahonkestävyyden paranevan käsiteltäessä sinkkialkoxidilla. Vastaavasti sooli-geeli modifiointi titaani-alkoxidiluoksella lisäsi männyn pintapuun lahonkestävyyttä käsittelemättömään puumateriaaliin verrattuna (Shabir Mahr ym. 2013). Lahonkestävyyden oletetaan paranevan ensisijaisesti metallioksidien estäessä selluloosaa pilkkovan entsyymitoiminnan. Lisäksi parantunut mittapysyvyys, huokosten täytyminen polysiloksaaneilla ja hydrofobisuuden lisääntyminen rajoittavat sieni-itiöiden kasvua.

## 5. Kehitteillä olevat modifiointimenetelmät ja niiden tutkimus

### 5.1. Termo-hydro-mekaaniset menetelmät

Fysikaalisia puun modifiointimenetelmiä, joissa käytetään kohotetun ilman lämpötilan ja kosteuden sekä mekaanisen paineen erilaisia yhdistelmiä, kutsutaan termo-hydro-mekaanisiksi modifiointimenetelmiksi (Thermo-hydro-mechanical methods, THM). Periaatteena on pehmentää puun rakennusaineita selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä lämmön ja kosteuden avulla ja siten mahdollistaa puun mekaaninen puristaminen rikkomatta puun solurakennetta. Lasisiirtymälämpötila (Glass transition temperature,  $T_g$ ) kuvaa lämpötilaa jossa polymeeri muuttuu lasimaisesta ja hauraasta materiaalista kumimaiseksi eli taipuisaksi materiaaliksi. Lasisiirtymälämpötila vaihtelee ja riippuvuus kosteudesta ja lämpötilasta on erilainen puun eri rakenneosilla (Kuva 8). Puun eri rakenneosista hemiselluloosan lasisiirtymislämpötila on alhaisin ja eniten riippuvainen puun kosteudesta. Ilmakuivan puun pehmentäminen vaatii vähintään noin 150 asteen lämpötilaa.

Puuta puristettaessa sen pehmentämiseen tarvittava lämmitys voidaan tehdä kontaktin, säteilyn tai konvektion avulla. Kontaktilämmityksessä lämmitettävät metallilevyt, joilla myös varsinainen puristaminen voidaan tehdä, ovat kontaktissa puun pintojen kanssa. Säteilylämmityksessä voidaan käyttää eri aallonpituuksia esimerkiksi infrapuna-, mikro- tai radioaaltoja. Konvektioon perustuvassa lämmityksessä lämmitetään käsittelykammion ilmaa, jolloin myös sisällä oleva puutavara ja puristuslaitteiston osat lämpenevät. Kontaktilämmityksellä lämpeneminen voidaan kohdistaa tarkimmin puutavaran pintaan, jos puristumisen ei haluta ulottuvan puutavaran koko paksuuden alueelle. Puristusmuodon palautumistaipumus ja erityisesti sen epätasaisuus puun kosteuden kasvaessa on merkittävin haitta termo-hydro-mekaanisen modifioinnin käytössä. Palautumista voidaan vähentää puristuskäsittelyn jälkeisellä puun lämpökäsittelyllä sekä höyryttämällä joko ennen puristusta tai sen jälkeen (Inoue ym. 2008, Laine ym. 2013, Morsing 2000, Möttönen ym. 2015a, Welzbacher ym. 2008).



**Kuva 8.** Kosteuden vaikutus puun rakenneosien lasisiirtymälämpötilaan (Jääskeläinen & Sundqvist 2007).

Puun tihentämisestä puristamalla etsitään uusia tuotesovelluksia sekä tutkimuslaitoksissa että teollisuudessa. Aalto-yliopistossa rakennetulla laboratoriomittakaavan puristuslaitteella on tutkittu lämpötilan, puristusajan ja puristusvoiman vaikutusta puupinnan tihentymiseen sekä puristusvaikutuksen palautumista ilman lämpökäsittelyä ja lämpökäsittelyn kanssa sekä havu- että lehtipuilla (Kutnar ym. 2012, Laine ym. 2013, Rautkari ym. 2013, Laine ym. 2016). Puristus tapahtuu kahden metallilevyn välissä, joista toinen on lämmitettävä. Puristusmodifioinnin jälkeinen lämpökäsittely esti puris-

tusmuodon palautumisen ja saavutettu pinnankovuuden kasvu säilyi myös vesiupotuskokeen jälkeen. Myös puristuksen jälkeiseen kovertumiseen voidaan vaikuttaa käsittelyparametreilla (Belt ym. 2013).

Puun pinnan tihentämistä on tutkittu myös Oregonin yliopistossa (OSU) VTC-laitteella (Viscoelastic thermal compression) (esim. Kamke & Rathi 2011, Rautkari ym. 2011). OSU:n laite on suljettu ja modifioinnin puristusvaiheessa voidaan käyttää apuna kuumaa vesihöyryä. Liu ym. (2014) tutkivat lännenhemlokin (*Tsuga heterophylla*) puuaineen kemiallisia muutoksia VTC-prosessin aikana ja havaitsivat happamuuden lisääntymistä ja rakennekomponenttien pilkkoutumista erityyppisten reaktioiden seurauksena. Kutnar ym. (2009) havaitsivat VTC-menettelmällä puristamalla aikaansaadun tiheyden kasvun muodostuvan soluseinämien nurjahtaessa ilman murtumista. Prosessissa syntyvä tiheysprofiili riippuu puristamisen aikaisista lämpötila- ja kosteusgradieneteista ja niiden suhteesta soluseinän lasisiirtymälämpötilaan.

Teollisessa mittakaavassa puun kuumapuristusta käytetään muun muassa lattiapintojen materiaalin valmistukseen. Tanskalainen Junckers patentoi vuonna 1963 menetelmän, jolla voidaan tuottaa erilaisia puulattiamateriaaleja (US 3090411A 1963). Puristusmodifiointia on sahatavaran lisäksi käytetty myös viulun pinnan tiheyden lisäämiseen (esim. Bekhta ym. 2014, Fang ym. 2012).

THM-modifioidun puun tuotantosovelluksia ja kaupallista tuotantoa on maailmalla toistaiseksi suhteellisen vähän. Suomessa menetelmän teollinen sovellus on mm. Nextimber Oy:llä, jonka kehittämässä modifiointilaitteistossa voidaan tehdä puun kuivaus, mekaaninen puristus ja lämpökäsittely. Teknisesti laite on korkean lämpötilan puutavarakuivaamo ja lämpökäsittelylaitos, jossa puutavaraa voidaan puristaa mekaanisesti kennorakenteisten alumiinilevyjen välissä. Koko käsittelykammio lämmitetään konvektiivisesti ilmankierron avulla. Tasaisen lämpötilan johdosta puristusvaikutus on periaatteessa samanlainen molemmilla pinnoilla käsiteltävää puutavaraa. Tuoretta puutavaraa puristettaessa tihtyminen kohdistuu eniten puutavaran pintaan. Tihtymisen voimakkuuteen vaikuttaa puutavaran kosteusjakauma paksuuden suunnassa ja puristusta voidaan kohdistaa kappaleen sisäosiin tai pintaan kuivaamalla tai kostuttamalla pintakerrosta ennen puristuskäsittelyä (Möttönen ym. 2015b). Puristuksen pysyvyys paranee merkittävästi lämpökäsittelmällä puutavara puristus- ja kuivauskäsittelyn jälkeen.

Ilvolankoski Oy on kehittämässä puun kuumamuovausta, jossa esiprofiloituja aihioita puristetaan neljältä sivulta kuumien metallilevyjen avulla (ns. Solidiwood-menetelmä, Ilvolankoski (2017)). Menetelmässä nähtyjä etuja ovat kuivauksen ja sahatavaran jatkokäsittelyn yhdistäminen yhdeksi vaiheeksi, jolloin valmistusprosessin kokonaisaika lyhenisi ja materiaalihukka vähenisi.

Ruotsissa on kehitetty metallipuristinlaitteiden pohjalta semi-isostaattinen puutavaran puristusmenetelmä (Blomberg 2006). Tässä menetelmässä puristus välitetään puuhun joustavan, öljyllä täytetyn kumikalvon läpi, jolloin kappaleen tiheydeltään pienemmät osat puristuvat enemmän kuin tiheydeltään suuremmat osat. Puristetun puukappaleen muoto on epätasainen, mutta kappaleen sisäinen tiheysvaihtelu on vähäinen: 140 MPa:n puristusvoimalla saavutetaan mäntypuulla n. 1000 kg/m<sup>3</sup> lopputiheys. Puristusmuodon palautuma on kuitenkin voimakasta varsinkin materiaalin ollessa vesikosketuksessa (Blomberg ym. 2006).

## 5.2. Kemiaalliset modifiointimenetelmät

### 5.2.1. Nanopartikkeleihin perustuva puun modifiointi

Puunsuojauksessa käytettävien metallien kuten kuparin, hopean ja sinkin nanopartikkelit voivat olla merkittävässä roolissa seuraavan sukupolven puunsuoja-aineiden kehittämisessä (Clausen 2013). Nanometallit valmistetaan pienentämällä metallien muodostamien hiukkasten kokoa ja niiden valmistukseen voidaan käyttää metallien neste-, kaasu- tai kiinteää faasia. Suoran lahoneston ohella nanometalleja voidaan hyödyntää nestemäisten biosidien huuhtoutumiskestävyyden lisäämisessä (Clausen ym. 2010) ja muotopysyvyyden parantamisessa esimerkiksi puristusmodifioinnin yhteydessä (Cai ym. 2007, Ghonche ym. 2012). Liukoista biosidiä voitaisiin lisätä puuhun nanopolymeerimatriisin

sitoutuneena tai kapseloituneena mahdollistaen hidasliukoisen ja hallitun biosidin vapautumisen puutuotteeseen. Nanopartikkeleita lisätään sekoitettuna puupinnoitteisiin parantamaan niiden ominaisuuksia (esim. Weichelt ym. 2011). Kehitteillä on myös tekniikoita, joilla niitä voidaan lisätä suoraan puupintaan sen toiminnallisuuden parantamiseksi (Mahltig ym. 2007).

### 5.2.2. Puun suojaus luontaisilla kemikaaleilla

Puun uuteaineet toimivat elävissä puissa antiseptisesti suojausmekanismina taudinaiheuttajia ja lahottajia vastaan. Ne suojaavat puuta myös hyönteisten ja muiden puuta ravinnokseen käyttävien eliöiden toiminnoilta.

Singh & Singh (2012) ovat koonneet yhteenvedon tutkimuksista, jotka käsittelevät luontaisten kemikaalien soveltuvuutta puunsuojaukseen. Yleisenä johtopäätöksenä oli, että joidenkin luontaisesti esiintyvien yhdisteiden tiedetään olevan antimikrobiaalisia. Puunsuojauksen kannalta merkittävää tietoa luontaisista bioaktiivisista yhdisteistä on saatavilla erityisesti terveys-, ruoka- ja maataloussovelluksista. Joitakin luontaisia yhdisteitä voidaan tuottaa kustannustehokkaasti ja joillakin yhdisteillä geeniteknikan sovelluksia voidaan käyttää niiden taloudelliseen tuotantoon siirtämällä yhdisteen tuotantoa kiihdyttäviä geenejä nopeakasvuisiin kasveihin. On mahdollista lisätä antimikrobista aktiivisuutta yhdistämällä varsinaiseen orgaaniseen biosidin kanssa muita aineita, esimerkiksi antioksidantteja, metallieristeitä ja biologisia torjunta aineita (BCA). Myös geeniteknologiassa on mahdollisuuksia puun bioaktiivisuuden lisäämiselle. Käsittelyt orgaanisilla biosideilla voidaan yhdistää biologisten/entsymaattisten aineiden kanssa, joilla pyritään tuhoamaan tai poistamaan huokoskalvot puun läpäisevyyden lisäämiseksi, mahdollistaen näin suuremman ja yhtenäisemmän puusolukon kyllästymisen.

Luontaisia puunsuoja-aineita on mm. seuraavissa aineryhmissä (Singh & Singh 2012):

- eteeriset öljyt
- vahat, hartsit ja kuoren tanniinit
- uuteaineet
- muut sekalaiset yhdisteet

Eteerisiä öljyjä voidaan valmistaa aromaattisia aineita sisältävien kasvien (esim. teepuu, piparminttu ja eukalyptus) osista. Eteeristen öljyjen lääkinälliset vaikutukset on tunnettu jo satoja vuosia ja viime aikoina erityisesti bioaktiivisiin vaikutuksiin keskittynyt lääkeaine- ja kosmetiikkateollisuus on niiden tärkein hyödyntäjä edelleen (Saad ym. 2013). Pellavaöljyn on havaittu hidastavan kosteuden imeytymistä puuhun ja sen turpoamista olosuhde- ja vesiupotuskokeissa, mutta loppu- tai tasapainokosteudessa tai kokonaisturpoamisessa ei ole eroja käsittelemättömän ja öljytyn puun välillä (Fredriksson ym. 2010).

Tanniinikyllästystä on tutkittu laboratoriomittakaavassa painekyllästystä vastaavalla menetelmällä (Laks ym. 1988; Tascioglu ym. 2013; Tondi ym. 2013). Tanniinin imeytyvyys puuhun on hyvä mutta ongelmana on sen heikko kiinnittyminen (Singh & Singh 2012). Tanniiniyhdisteiden kiinnittymisen ja lahonsuojauksen tehokkuuden parantaminen vaatii lisäaineiden tai muiden puunsuoja-aineiden käyttöä kyllästysprosessissa (esim. Laks ym. 1988, Liibert ym. 2011).

VTT tutki puun kemiallista modifiointia kyllästämällä puuta maleiinihappoanhydridin ja glyserolin seoksella painekyllästysmenetelmällä (Viitaniemi ym. 1998). Kyllästeen kiinnittäminen tapahtui 150 °C:een jälkikäsitteilyllä. Kyllästeen vaikutus perustuu estereiden kiinnittymiseen puun vapaisiin hydroksyyliiryhmiin, jolloin vesi ei voi enää sitoutua niihin ja puun kosteuseläminen vähenee. Puun tasapainokosteus alenee, turpoaminen pienenee, kovuus kasvaa ja lahonkesto paranee. Ongelmana voi olla puun värjäytyminen, taivutuslujuuden aleneminen ja liimattavuuden- ja pintakäsittelyominaisuuksien muuttuminen. Asetoniin liuotettu maleiinihappoanhydridi tunkeutuu puun soluseinämään reagoiden eetterirengasryhmällään hydroksyyliiryhmien kanssa vähentäen hydroksyyliiryhmien määrää ja siten parantaen mittapysyvyyttä ja lahonkestoa (Li ym. 2010).

Booriyhdisteet ovat tehokkaita kemikaaleja puuta tuhoavien hyönteisten ja lahottajasienten torjunnassa, minkä vuoksi ne luetaan biosideiksi ja niiltä vaaditaan biosididirektiivin mukainen hyväksyntä puunsuoja-aineeksi. Toisaalta ne eivät yleensä ole myrkyllisiä nisäkkäille (Obanda ym. 2008). Boorihappoa ja booraksia on puuteollisuudessa käytetty yleisesti erityisesti Uudessa-Seelannissa, joka on yksi suurimmista kyllästetyn puutavaran tuottajista maailmassa (Kokko 2010). Sitä käytetään erityisesti maanpäällisten puumateriaalien suojaamisen sateelle alttiissa kohteissa. Maakosketukseen ne eivät sellaisenaan sovi huuhtoutumisalttiutensa vuoksi. Booriyhdisteet toimivat puussa hyvin myös palonsuoja-aineina (Baysal ym. 2003). Boorihappo ehkäisee kytemistä ja booraksi taas muodostaa korkeissa lämpötiloissa lasimaisia kalvoja, jotka ehkäisevät liekkien leviämistä. Booriyhdisteiden kiinnittymistä puuhun voidaan parantaa yhdistämällä esimerkiksi mäntyöljykäsittelyyn (Temiz ym. 2008), metalli- tai orgaanisina yhdisteinä (Obanda ym. 2008) tai hydrogeelimuodossa (Obounou-Akong ym. 2015). Laboratoriokokeissa myös käsittelyn silaaniyhdisteillä on havaittu parantavan booriyhdisteiden säilymistä puussa vesiuutossa (Kartal ym. 2009).

Karbamidi- eli ureakäsittelyn on havaittu lisäävän puun vedenhylkivyyttä ja sitä on laboratoriomittakaavassa tutkittu kevyiden puulajien, mm. koivun, pyökin, haavan ja lepän modifiointiin yhdessä mekaanisen puristuksen kanssa (Wu ym. 2010). Karbamidikäsittelyssä urea-formaldehydi -polymeerin esiasteen yhdisteet reagoivat puun karboksyyl- ja hydroksyyliyhdyntien kanssa, mikä lisää puun vedenhylkivyyttä. Venäjällä karbamidikäsittelyä on kehitetty tuotenimellä DESTAM, jossa tuotetta puutavaraa on painekyllästetty 30 prosenttisella karbamidiliuoksella poikkileikkauspinoistaan ja sen jälkeen kuivattu puristuksessa ja korkeassa lämpötilassa. Tuote ei kuitenkaan ole vielä edennyt kaupalliseksi (Shamaev 2012).

Äyriäisten kuoren kitiinistä, joka on maailman toiseksi yleisin biopolymeeri, voidaan deasetyloimalla tuottaa kitosaania (Singh & Singh 2012). Kitosaanilla on sienten kasvua estäviä ominaisuuksia (Larnøy ym. 2006).

Luontaisten kemikaalien – esimerkiksi vahojen, bioöljyjen, eteeristen öljyjen ja puun uuteainien – käytössä puun modifiointiin on otettava huomioon niiden biohajoavuus. Ei-biosidisinä aineina myös ne todennäköisesti kelpaavat tietyn ajan kuluessa hajottajaeliöiden ravinnoksi. Kuten puutuotteiden pitkäaikaiskestävyyteen yleensä, niiden rapautumiseen ja hajoamisnopeuteen vaikuttavat ympäröivät lämpötila- ja kosteusolosuhteet sekä UV-säteily.

### 5.2.3. Lämpökäsittelyn ja kemiallisen modifioinnin yhdistäminen

Puun lämpökäsittely lisää puun läpäisevyyttä impregnoitainneille, mikä antaa mahdollisuuden kemialliselle puunsuojaukselle ilman painelaitteiden käyttöä (Ahmed ym. 2013a). Lämpökäsittely aikaansaa deaspiraatiota eli pääasiassa puuta kuivattaessa sulkeutuneet huokokset avautuvat uudelleen, jolloin puun nesteiden ja kaasujen läpäisevyys kasvaa. Lämpökäsittelystä johtuva puumateriaalin rapautuminen lisää puun huokoisuutta muutoinkin, jolloin modifiointikemikaalin imeytyminen lisääntyy (Ahmed ym. 2013a).

## 6. Puupinnan modifiointimenetelmät

Puupinnan ominaisuuksien muuttamiseen tarkoitetuilla modifiointimenetelmillä haetaan osittain toisentyypistä vaikutusta kuin koko puukappaleen modifiointiin tarkoitetuilla modifiointimenetelmillä. Tavoitteena on useimmiten lisätä puupinnan toimivuutta eri käyttötarkoitusten vaatimuksia vastaaviksi kuten perinteisessä puun pinnoituksessakin. Toivotut vaikutustavat voivat olla liimojen ja pinnoitteiden tarttuvuuden parantuminen, pinnan kostumis- ja läpäisyominaisuuksien muuttuminen, UV-säteilyn ja rapautumisen kesto, pinnan kyky vastustaa biologisen rapautumista vastaan antibakteeristen ominaisuuksien parantuminen sekä palon- ja muun mekaanisen keston parantuminen (Petrič 2013). Myös puristusmodifiointi ja pinnan tiheyden kasvattaminen kohdistetaan yleensä puukappaleen pintakerrokseen (esim. Bekhta ym. 2014).

Plasman voidaan käsittää olevan aineen neljäs olomuoto, jossa elektronit ja positiiviset ionit muodostavat sähköisesti virittyneitä hiukkasia. Puun modifiointi plasmakäsittelyllä muuttaa pinnan rakennetta ja parantaa esimerkiksi pinnan liimattavuutta (Petrič 2013). Myös laserleikkauksella/-porauksella voidaan parantaa puupinnan läpäisevyyttä halutulle syvyydelle Wang ym. (2012).



## 7. Modifioitujen puutuotteiden ja materiaalin testaus

### 7.1. Muutokset ominaisuuksissa ja standardien mukainen testaus

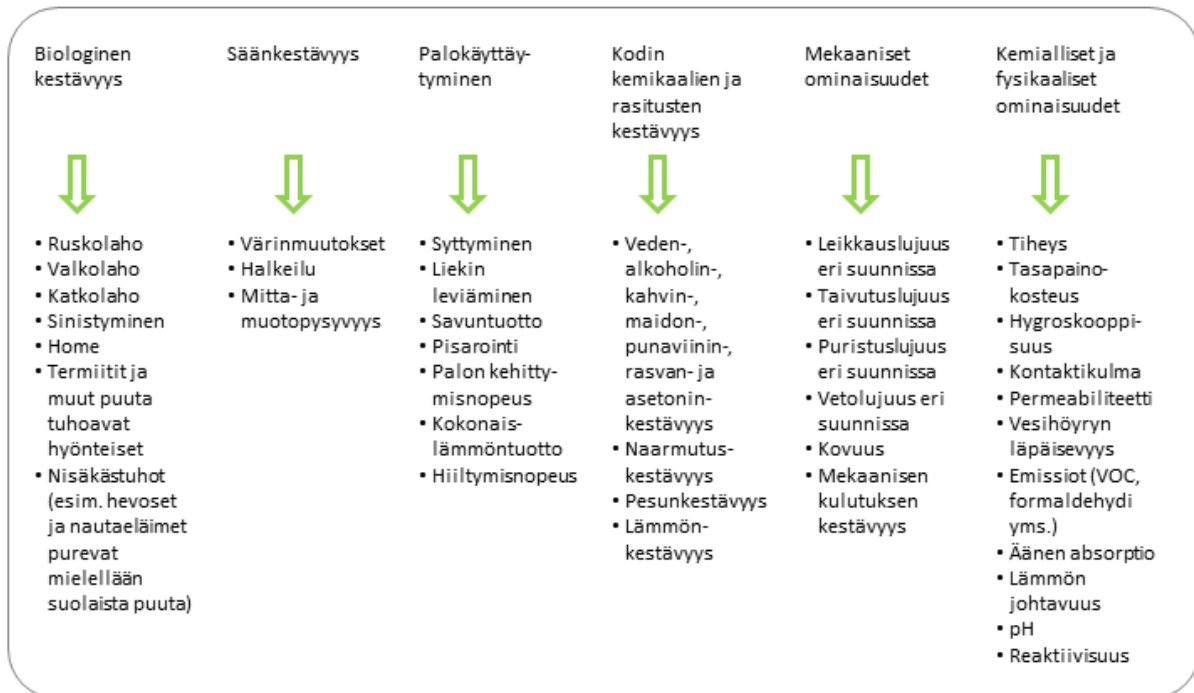
EU:n rakennustuoteasetus astui voimaan 20.4.2011. Sen mukaan kaikille niille rakennustuotteille, jotka kuuluvat yhdenmukaistetun standardin piiriin, tulee 1.7.2013 lähtien laatia suoritusasoilmoitus, (tarvittaessa/vaadittaessa) hankkia ilmoitetun tuotesertifiointilaitoksen myöntämä sertifikaatti tuotteen suoritusason pysyvyydestä, ja CE-merkitä tuote. CE-merkintä on valmistajan ilmoitus siitä, että tuote on EU-lainsäädännön vaatimusten mukainen. Koska modifiointi muuttaa lähes kaikkia puumateriaalin ominaisuuksia ainakin jossain määrin, modifioidusta puusta täytyy jo pelkästään CE-merkinnän vuoksi tutkia ja testata useita suoritusasoa määrittäviä ominaisuuksia ennen tuotteen markkinoille saattamista. Tutkimuksessa täytyy lisäksi huomioida, että esimerkiksi ikkunoissa puumateriaaleista täytyy testata eri ominaisuuksia kuin ulkoeristyksissä, koska ikkunoilla on eri tuotevaatimukset kuin verhouksilla ja ikkunassa puu on vain yksi komponentti CE-merkittävää tuotetta.

Kuvassa 9 mainitut muutokset voivat vaikuttaa modifioidun puumateriaalin:

- pintakäsittely- ja liima-aineiden käsittelyprosessiin ja niiden toimivuuteen,
- kiinnikkeiden pysyvyyteen ja korroosioon,
- työstettävyyteen,
- sivutuotteiden hyödyntämiseen, kierrättämiseen ja hävittämiseen,
- lopputuotteen biohajoavuuteen, kierrättämiseen ja hävittämiseen sekä elinkaarianalyysin tuloksiin.

Kaikki edellä mainitut ominaismuutokset ovat ainakin jossain määrin erilaisia eri puulajeilla ja jopa saman puulajin pinta- ja sydänpuulla sekä runko- ja oksamateriaalin välillä. Kun modifioitua puuta käytetään osana rakennuskomponenttia, esimerkiksi ikkunaa, tulee ikkunan markkinoille saattajan huomioida ikkunan suoritusasoilmoituksessa mahdolliset ikkunan ominaismuutokset, jotka ovat seurausta modifioidun puun käytöstä.

Näiden muutosten tutkimukseen on olemassa standardisoituja (mm. CEN ja ISO) tutkimusmenetelmiä, joista yhteenveto on esitetty liitteessä 1. Lisäksi on muutamia tutkijoiden käyttämiä menetelmiä ja viite/tukistandardeja, joista yleisimmät on myös esitetty liitteessä 1. Harmonisoiduista tuotestandardeista on esitetty, mitä tietoja ja ominaisuuksien arvoja on ilmoitettava CE-merkinnän yhteydessä annettavassa suoritusasoilmoituksessa (DOP = Declaration of performance).



Kuva 9. Modifioinnin aikaan saamia ominaisuusmuutoksia puumateriaalissa.

## 7.2. Standardien soveltuvuus modifioidulle puulle

Testistandardeja on laajasti lähes kaikkien eri ominaisuuksien testaamiseen, ja ne ovat pääsääntöisesti ajan tasalla, sillä lukuisia niistä on päivitetty 2010-luvulla. Toisaalta useat modifioidun puun vanhat testitulokset ovat tämän vuoksi päivityksen tarpeessa, koska ne on testattu vanhentuneen standardiversion mukaan. Harmonisoidut tuotestandardit vaativat, että ominaisuudet on testattu standardien uusimpien versioiden mukaan. Testistandardeissa on myös valitettavia ongelmia liittyen modifioidun puun tutkimukseen ja testaukseen.

### 7.2.1. Standardien soveltuvuus modifioidun puun biologisen kestävyden testaukseen

EN 73, EN 84, EN 113 laboratoriovanhennus ja -lahotustestisarja soveltuu heikosti lämpöpuulle ja muille puumateriaalin vedenhylkivyyttä lisääville modifiointimenetelmille. EN 113 standardin mukaan lahotuskoekappale täytyy hylätä, mikäli käsitellyn kappaleen painohäviö on alle 3 %, ja jos kappaleen kosteus on alle 25 % tai yli 80 %. Useat modifiointimenetelmät laskevat puun tasapainokosteutta ja parantavat vedenhylkivyyttä, minkä vuoksi EN 113 standardin mukaisessa testissä koemateriaalin kosteus voi jäädä alle 25 %:n, jos käsittelyvoimakkuus on riittävä.

Markkinoilla oleva puutavara on harvoin pelkkää pintapuuta tai sydänpuuta. Esimerkiksi standardi EN 113 testaa männyn kyllästettyä tai modifioitua pintapuuta, vaikka mm. lämpökäsittely parantaa myös sydänpuun pitkäaikaiskestävyyttä. EN 113 ei siis ota huomioon sitä, että puutavara sisältää käytännössä lähes aina pinta- ja sydänpuuta, joiden ominaisuudet voivat poiketa suurestikin toisistaan riippuen siitä, miten niitä on käsitelty.

Uusimmassa puun ja puutuotteiden biologisen kestävyden testaamiseen ja luokitteluun liittyvässä standardissa EN 350:2016 on mainittu erikseen lämpökäsitellyt ja muut modifioidut puutuotteet. Standardia voidaan tulkita siten, että lämpökäsitellyn tai muulla tavoin modifioidun puun biologinen kestävyys tulee testata ja luokitella samoilla standardeilla ja kriteereillä kuin puulajien luontainen biologinen kestävyys. EN350:2016 standardin mukaan myös pintapuun, pinta- ja sydänpuun

vaihtumisvyöhykkeen, sydänpuun ja ytimen lähellä olevan nuorpuun biologinen kestävyys on testattava erikseen riittävässä laajuudessa.

Luontaisen puun lahonkestävyyden testaamiseen on omat tekniset spesifikaatiot:

- CEN/TS 15083-1:2005 Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods. Part 1. Basidiomycetes.
- CEN/TS 15083-2:2005 Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods. Soft rotting fungi.

CEN/TS 15083-1:2005 lahotustesti luontaiselle puulle on hyvin saman sisältöinen kuin EN 113 kyllästetylle ja modifioidulle puulle, mutta vastaavia kosteusrajoitteita kuin EN 113:ssa ei ole. Tämä suosii lahotustutkimuksissa luontaista puuta verrattuna modifioituun puuhun. Myös lämpöpuu ja muu modifioitu puu, jotka eivät sisällä biosidejä, olisi hyvä testata luontaisen puun teknisten spesifikaatioiden mukaan. Spesifikaatioissa kuitenkin sanotaan, että testattava materiaali ei saa olla höyrytettyä tai kemiallisesti käsiteltyä. Lahonkestävyyttä testataan siis eri kriteerein luontaisella puulla ja modifioidulla/kyllästetyllä puulla, jolloin testitulosten vertailu näiden välillä on vaikeaa.

### 7.2.2. Standardien soveltuvuus kyllästys- ja modifiointiaineiden jäämien analysointiin

Kyllästys- ja modifiointiaineiden jäämävaatimusmetodi ja analysointi ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) aiheuttaa ongelmia sekä tutkimuksessa että kaupallisten tuotteiden valmistuksessa ja vertailussa. Esimerkiksi NTR käyttää männyn kuivatiheytenä  $480 \text{ kg}/\text{m}^3$  ja kuusen kuivatiheytenä  $430 \text{ kg}/\text{m}^3$  muunnettaessa laboratorio-analyysin tulos, tehoainetta ( $\text{kg}$ )/puun kuivamassa ( $\text{kg}$ ), vastaamaan vaatimusta tehoainetta per puukuutio ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), jos todellista tiheyttä ei voida määrittää jollain luotettavalla menetelmällä. (Nordic Wood... 2011, 2013, 2017).

Mitä nopeampikasvuista puuta valmistaja/kyllästäjä käyttää, sitä suuremman taloudellisen edun hän saa palo- ja lahonsuoja-aineen kulutuksessa, kuten alla oleva esimerkkilaskelma osoittaa. Tällä hetkellä esimerkiksi Baltiassa kyllästetty mänty ja kuusi analysoidaan NTR:n ohjeiden mukaan samalla tavalla kuin pohjoissuomalainen mänty ja kuusi. Lisäksi NTR:n tiheysohje on jo vuosikymmeniä vanha. Viljelymetsissä havupuun keskimääräinen tiheys on alempi kuin hitaammin kasvaneissa luontaisesti syntyneissä metsissä, joten ohje saattaa vääristää tuloksia. Lahonsuojauksessa virhe antaa lähinnä taloudellista kilpailuetua nopeakasvuista puuta käyttävälle yritykselle, mutta palosuojakyllästyksen osalta voidaan puhua jopa turvallisuusriskeistä.

Puumateriaalin tiheyttä käytetään testistandardeissa luokittelussa ja analyysitulosten laskennassa. Tiheys vaihtelee paljon puulajien ja kasvuolosuhteiden mukaan. Tämän vuoksi standardeihin olisi tehtävä tarkennuksia, jotka ottavat puumateriaalin tiheyden vaihtelun paremmin huomioon.

Esimerkki siitä, miten vakiotiheyden käyttö vääristää tuloksia kyllästysaineiden jäämien laskennassa:

- *Laskennassa käytetty vakiokuivatiheys männylle 480 kg/m<sup>3</sup>*
- *Analyyssissä todettu tehoaineen määrä 20 kg*
- *Analyyssissä todettu puun kuiva-aineen määrä 80 kg*

*Jos käytetään vakiokuivatiheyttä 480 kg/m<sup>3</sup>, niin 80 kiloa puuta vastaa 0,1667 m<sup>3</sup> tilavuutta. Tällöin kyllästeen määräksi saadaan 20 kg/0,1667 m<sup>3</sup> eli **119,97 kg/m<sup>3</sup>**.*

*Jos puun todellinen tiheys on 450 kg/m<sup>3</sup>, niin 80 kiloa puuta vastaa 0,1777 m<sup>3</sup> tilavuutta. Tällöin kyllästettä on puussa todellisuudessa vähemmän puukuutiota kohti eli 20 kg/0,1777 m<sup>3</sup> eli **112,55 kg/m<sup>3</sup>**.*

*Jos puun todellinen tiheys on 510 kg/m<sup>3</sup>, niin 80 kiloa puuta vastaa 0,1569 m<sup>3</sup> tilavuutta. Tällöin kyllästettä on puussa todellisuudessa enemmän puukuutiota kohti eli 20 kg/0,1569 m<sup>3</sup> eli **127,47 kg/m<sup>3</sup>**.*

### 7.2.3. Standardien soveltuvuus modifioitujen puutuotteiden homehtumisen ja lahoamisen testaukseen käyttöluokissa 2 ja 3

EN 599-1 vaatii lahonkeston testaamista käyttöluokassa 2 (sisätilat, ei säärasitusta, kondenssivesirisiki) ja 3 (säärasitukselle altis, mutta ei maakosketuksissa) laboratoriossa EN73, EN84, EN 113 mukaan ja kenttätetit EN 330 mukaan, vaikka puu sisätiloissa ja ulkoverhouksissa ei käytännössä altistu lahoajajäsienille. Sisätiloissa olisi tärkeämpää testata kosteuselämistä/hygroskooppisuutta ja ulkoverhouksissa sekä terassilautoilla olisi tärkeämpää testata mittapysyvyyden lisäksi säänkestävyyttä. Jos sisätiloissa on pitkään kosteutta, niin ensiksi syntyy homeongelmia ja sitten vasta alkaa puun lahoaminen. Terasseissa yms. taas säänkesto ja siihen liittyvät ulkonäköasiat ovat ensisijaisia ongelmia. Terasien runkorakenteet ovat maakosketuksissa (käyttöluokka 4), jolloin lahonkesto on tärkeä kriteeri.

Puun lahoaminen on mahdollista, jos puumateriaali on pitkiä aikoja olosuhteissa, joissa sen kosteus on yli 25 %. Käyttöluokassa 2 tällaisia olosuhteita ei esiinny kuin ongelmatilanteissa ja käyttöluokassa 3 käytännössä vain terassirakenteissa ja laitureissa. Käyttöluokissa 1 ja 2 olisi syytä pystyä testaamaan yhteneväisesti eri materiaalien homehtumista eikä lahoamisherkkyyttä. Ongelmaa syventää se, että EN-standardeissa ei ole varsinaista testiä eri materiaalin homehtumisherkkyyden testaamiseen.

## 7.3. Palontestaus

Rakennustuotteiden palokäyttäytymisen mittaus ja luokitusjärjestelmä perustuu standardiin SFS-EN 13501-1 (2010). Rakennustuotteiden palokäyttäytyminen on esitettävä rakennuslupamenettelyn yhteydessä. Rakennusten palotekninen suunnittelu perustuu standardiin SFS-EN 1995-1-2 (2004). Materiaalien käyttöä rakentamisessa säädellään materiaalin paloluokan lisäksi sen aiheuttaman palokuorman ja hiiltymisnopeuden mukaan. Modifioitujen puutuotteiden palokäyttäytymistä on verrattu tutkimuksissa vain harvoin normaaliin puuhun ja nykyisen luokitusjärjestelmän kriteereihin.

Modifiointi muuttaa puun palokäyttäytymistä. Palokäyttäytymistä kuvaavat seuraavat ominaisuudet:

- Syttyminen ja liekin leviäminen (SFS-EN-ISO 11925-2 2011)
- Savuntuotto, pisarointi, palon kehittymisnopeus, kokonaislämmöntuotto (SFS-EN 13823 2015, SBI-testi)
- Hiiltymisnopeus (ISO 5660-1 2015, kartiokalorimetri)

Standardilla CEN/TS 15912 (2012) testataan lisäksi palosuojatuilla puutuotteilla palosuojan pitkäaikaiskestävyyttä, joka on tärkeä vaikuttava tekijä rakennuksen elinkaarianalyseissä ja kokonaiskustannuksia arvioitaessa (esim. Boren ym. 2011). **Palosuojauksen pitkäaikaiskestävyyttä ei kuitenkaan vielä ole otettu mukaan Suomen palomääräyksiin.**

Suojaverhousten (myös puupohjaisten) testaus ja luokittelu tehdään standardin EN 14135 (2004) mukaan. Suojaverhouksella tarkoitetaan verhousta, joka määrätyn ajan suojaa sen takana olevaa rakennetta syttymiseltä, hiiltymiseltä tai muulta vaurioitumiselta.

Rakennustarvikkeet jaetaan luokkiin sen perusteella, miten ne vaikuttavat palon syttymiseen ja sen leviämiseen sekä savun tuottoon ja palavaan pisarointiin. Standardissa SFS-EN 13501-1 (2010) puutuotteet luokitellaan palokäyttötymisen perusteella luokkiin D, C tai B (taulukko 1). C- ja B-luokan vaatimukset poikkeavat erityisesti palon kehittymisnopeuden ja kokonaislämmöntuoton suhteen D-luokasta, johon normaali puu luokitellaan.

Kantavissa rakenteissa ja niiden suojaverhouksissa tärkeä palokäyttötymisominaisuus on hiiltymisnopeus. Puuinfon teknisessä tiedotteessa ”Puurakenteen palomitoitus” (Puuinfo 2013) on esitetty kantavan rakenteen palomitoitusmenetelmiä, hiiltymisnopeuksia ja levytyksellä tehtävän palosuojauksen vaikutusta hiiltymisen alkamishetkeen.

**Taulukko 1.** Puupohjaiset rakennustarvikkeet jaetaan luokkiin sen perusteella, miten ne vaikuttavat palon syttymiseen ja sen leviämiseen sekä savun tuottoon ja palavaan pisarointiin (Lähde: SFS-EN 13501-1 2010).

	D-luokka max-arvo	C-luokka max-arvo	B-luokka max-arvo
<b>Palon kehittymisnopeus, Figa (W/s)</b>	750	250	120
<b>Kokonaislämmöntuotto, THR<sub>600s</sub> (MJ)</b>	Ei max arvoa	15	7,5
<b>Liekin leviäminen, Fs (mm)</b>	Alle 150 mm	Alle 150 mm	Alle 150 mm
<b>Sivusuuntainen liekin leviäminen, LFS</b>	Ei saa saavuttaa koe-kappaleen reunaa	Ei saa saavuttaa koe-kappaleen reunaa	Ei saa saavuttaa koe-kappaleen reunaa
<b>Savuntuotto*</b>	s2 (SMOGRA<180m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ja TSP <sub>600s</sub> <200m <sup>2</sup> )	s1 (SMOGRA<30m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ja TSP <sub>600s</sub> <50m <sup>2</sup> )	s1 (SMOGRA<30m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ja TSP <sub>600s</sub> <50m <sup>2</sup> )
<b>Pisarointi**</b>	d2 (pisaroiden palamisaika yli 10 s)	d0 (ei palavia pisaroita)	d0 (ei palavia pisaroita)

Savuntuoton luokat \*

- s1 Savuntuotto on erittäin vähäistä.
  - s2 Savuntuotto on vähäistä.
  - s3 Savuntuotto ei täytä s1 eikä s2 vaatimuksia.
- (SMOGRA - smoke growth rate index, TSP<sub>600s</sub> - total smoke production)

Pisaroinnin luokat\*\*

- d0 Palavia pisaroita tai osia ei esiinny.
- d1 Palavat pisarat tai osat sammuvat nopeasti.
- d2 Palavien pisaroiden tai osien tuotto ei täytä d0 eikä d1 vaatimuksia

## 8. Johtopäätökset modifioitujen puutuotteiden tutkimuksen nykytilasta ja tulevaisuuden tutkimustarpeista

Vuodesta 2013 lähtien EU:n alueella rakennustuotteiden markkinoille saattajilta on vaadittu ilmoitus siitä, että tuote on EU-lainsäädännön vaatimusten mukainen (CE-merkintä). Käytännössä valmistajien on CE-merkittävä rakennustuotteet, ja CE-merkinnän yhteydessä annettavalla suoritusasoilmoituksella valmistaja vakuuttaa tuotteen täyttävän EU:n lainsäädännön vaatimukset. Tämä on vauhdittanut jo markkinoilla olevien modifioitujen puutuotteiden testausta ja tutkimusta. Samalla kuitenkin täysin uusien modifioitujen puutuotteiden tutkimus on muuttunut entistä haastavammaksi, sillä nykyisin ei enää yksin riitä esimerkiksi ulkoverhouslaudan biologisen kestävyuden testaus, vaan tietoa tarvitaan myös palokäyttäytymisestä, lämmönjohtavuudesta, kiinnikkeiden pysyvyydestä ja emissioista. Luvussa 7 on esitetty puumateriaalin ja puutuotteiden testaamiseen ja tutkimukseen liittyviä standardisoituja testejä. Monet standardeista on uusittu tai korvattu 2010-luvulla, minkä vuoksi monet kaupallisiin modifiointimenetelmiin liittyvät testitulokset ovat päivityksen tarpeessa. Tämän työn ei kuitenkaan odoteta tulevan valmiiksi, koska standardeja päivitetään ja uusia valmistellaan koko ajan. Tuotantomäärältään selvästi suurin modifioitu puutuote on lämpökäsittely puu eri valmistusprosessivariaatioineen. Muita kaupallistettuja, mutta tuotantomääriltään lämpöpuuta pienempiä modifioituja puutuotteita ovat asetyloitu (Accoya®), furfuloitu (Kebony®) ja pii-/vesilasikyllästetty puu (Organowood®, Q-treat) sekä muutamat öljy-, vaha- tai parafiinikyllästetyt tuotteet. Esikaupallistettuina tai kaupallista läpimurtoa odottavina on useita modifiointimenetelmiä (DMDHEU, melamiinihartsit, useat öljy-, vaha- tai parafiinikyllästetyt tuotteet, TMTM™...), jotka kuitenkin kamppailevat edelleen tuotteiden hintakilpailukyvyyn, raaka-aineen tai tuotantoprosessien hallinnan kanssa.

Suurin haaste modifioitujen puutuotteiden kaupallistamisessa on valmistuskustannus: tuotantoprosessi ja tarvittavat tuotannon tekijät on vaikea saattaa kustannustasolle, joka mahdollistaisi hinnaltaan elinkelpoisten tuotteiden valmistamisen. Esimerkiksi asetylointi- ja furfulointiprosesseja on kehitetty vuosikymmeniä, ja ne mahdollistavat monilta ominaisuuksiltaan erinomaisten puutuotteiden teollisen valmistamisen verrattain yksinkertaisten kemiallisten reaktioiden avulla. Tuotteiden todellista kaupallista läpimurtoa odotetaan kuitenkin edelleen; asetylointi- ja furfulointiprosesseilla modifioitujen puutuotteiden hinta jää niin korkeaksi, että asiakkaat kallistuvat helposti vaihtoehtoihin ratkaisuihin.

Monet puun modifiointiprosessit tähtäävät sekä fysikaalisten että biologisten ominaisuuksien parantamiseen. Tulevaisuudessa modifioitujen puutuotteiden kehittäminen voisi painottua aiempaa selvemmin ominaisuuksien täsmämuokkaukseen. Kantaville rakenteille, maakosketukselle alttiille rakenteille, ulkoverhouksille ja sisäkäyttöön tarkoitetuille tuotteille kohdistuu tyystin erilaisia vaatimuksia, ja joissain tapauksissa yhden ominaisuuden parantaminen toisen kustannuksella voi olla viisasta. Kantaviin rakenteisiin käytettävältä puutuotteelta vaaditaan paitsi jäykkyyttä ja lujuutta myös virumiskestävyyttä eli kykyä vastustaa muodonmuutoksia pitkäkestoisen vakiokuormituksen alla. Modifioitujen puutuotteiden virumisesta, samoin kuin relaksaatiosta eli muodonmuutoksen ylläpitoon vaadittavan voiman alenemasta ajan suhteen, on toistaiseksi olemassa vähän tutkittua tietoa, mikä osaltaan rajoittaa tuotteiden rakenteellista käyttöä. Myös monien muiden tuotteen käytön kannalta keskeisten ominaisuuksien (biologinen kestävyys, kemia, pH-taso...) muutokset pitkän ajan kuluessa tunnetaan verrattain huonosti.

Biologisen kestävyuden yksityiskohtana termiitinkestävyys on kasvattamassa merkitystään ilmastomuuttumisen ja siitä johtuvan termiittien levinneisyysalueen laajenemisen seurauksena. Muutos erityisesti mantereisissa ilmasto-olosuhteissa kohti lyhyempiä kuivia jaksoja, kasvanutta sadantaa ja korkeampaa ilmankosteutta – siis kohti merellisempää ilmastoa – aiheuttaa ilmeisiä haasteita puutuotteiden homeiden ja lahonkestävyydelle. Samalla biosidisten puunsuoja-aineiden käyttöä kyllästysprosesseissa pyritään säädöksiin rajoittamaan, mikä lisää ”ympäristöystävällisten” ratkaisujen ku-

ten modifioitujen puutuotteiden kysyntää. Jos toimivia ratkaisuja ei ole riittävän kilpailukykyiseen hintaan saatavilla, menettää puu markkinaosuuttaan ei-orgaanisille materiaaleille tai komposiiteille.

Modifioidun puun elinkaaritarkastelut (life cycle assessment LCA) ovat monien tuotteiden osalta lähtökuopissaan. Tilannetta selittävät ainakin elinkaaritiedon vähäinen kysyntä aivan viime vuosiin asti sekä se, että monet modifiointiprosesseista eivät kykene vielä tuottamaan riittävästi tarvittavia materiaalien ja energian kulutus- ja päästötietoja elinkaariarvioinnin tueksi. On selvää, että kaikissa modifiointiprosesseissa kulutetaan resursseja enemmän kuin pelkässä sahatavaran kuivauksessa. Samalla tuotteen oletettu käyttöikä kuitenkin kasvaa, mikä elinkaariarvioinnissa kompensoi tuotteen sitoutuneita energia- ja materiaalmääriä (Hill & Norton 2014). Viime aikoina tuotteiden elinkaaritaseeseen on alettu kiinnittää aiempaa enemmän huomiota mm. valmisteltaessa tuotteiden ympäristöselosteita (environmental product declaration EPD). Ympäristöselosteilla pyritään tuottamaan kuluttajille vertailukelpoista tietoa tuotteiden ympäristövaikutuksista.

## Viitteet

- Ahmed, S.A., Hansson, L. & Morén, T. 2013a. Distribution of preservatives in thermally modified Scots pine and Norway spruce sapwood. *Wood Science and Technology* 47: 499–513. DOI 10.1007/s00226-012-0509-4.
- Ahmed, S.A., Sehlstedt-Persson, M. & Morén, T. 2013b. Mould susceptibility of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood: Impact of drying, thermal modification, and copper-based preservative. *International Biodeterioration & Biodegradation* 85: 284–288.
- Alfredsen, G. & Pilgård, A. 2014. *Postia placenta* decay of acetic anhydride modified wood – Effect of Leaching. *Wood Material Science and Engineering* 9(3): 162–169.
- Alfredsen, G., Flæte, P.O. & Militz, H. 2013. Decay resistance of acetic anhydride modified wood: a review. *International Wood Products Journal* 4(3): 137–143.
- Altgen, M., Adamopoulos, S. & Militz, H. 2015. Wood defects during industrial-scale production of thermally modified Norway spruce and Scots pine. *Wood Material Science & Engineering*. Online article.
- Avilov, A., Deruyga, V., Popov, G., Rudychev, V. & Zalyubovsky, I. 1999. Non-waste and resource-saving radiation process of polymer modified wood production. Teoksessa: 1999 Particle Accelerator Conference, New York City, Proceedings. v. 4, ss. 2549–2551.
- Baysal, E., Yalinkilic, M. K., Çolak, M. & Göktaş O. 2003. Combustion properties of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) wood treated with vegetable tanning extracts and boron compounds. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 27: 245–252.
- Bekhta, P., Proszkyk, S., Krystofiak, T., Mamonova, M., Pinkowski, G. & Lis, B. 2014. Effect of thermomechanical densification on surface roughness of wood veneers. *Wood Material Science and Engineering* 9(4): 233–245. <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2014.923042>
- Belt, T., Rautkari, L., Laine, K. & Hill, C.A.S. 2013. Cupping behaviour of surface densified Scots pine wood: the effect of process parameters and correlation with density profile characteristics. *Journal of Material Science* 48: 6426–6430. DOI 10.1007/s10853-013-7443-1
- Bjurhager, I. 2008. Mechanical behaviour of hardwoods – effects from cellular and cell wall structures. KTH Chemical Science and Engineering. Licentiate Thesis in Polymer Technology. Stockholm, Sweden. 37 p. + App.
- Blomberg, J. 2006. Mechanical and physical properties of semi-isostatically densified wood. Luleå University of Technology, Doctoral thesis. 62 s.
- Blomberg, J., Persson, B. & Bexell, U. 2006. Effects of semi-isostatic densification on anatomy and cellshape recovery on soaking. *Holzforschung* 60: 322–331.
- Bodig, J. & Jayne, B.A. 1982. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company Inc. 712 s.
- Bongers, H.P.M. & Beckers, E.P.J. 2003. Mechanical properties of acetylated solid wood treated on pilot plant scale. Proceedings of the first European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium, 341–350.
- Boonstra, M.J. & Tjeerdsma, B. 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 204–211.
- Boonstra, M.J., Van Acker, J. & Kegel, E. 2007a. Effect of a two-stage heat treatment process on the mechanical properties of full construction timber. *Wood Material Science and Engineering* 3–4: 138–146.
- Boonstra, M.J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B.F. & Kegel, E.V. 2007b. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Sciences* 64: 679–690.
- Boren, H., Viinikainen, M., Paajanen, M., Etholen, V. 2011. Puutuotteiden ja -rakenteiden kemiallinen suojaus ja suojauksen markkinapotentiaali. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Tutkimuksia ja raportteja B-sarja Nro: 67. ISBN (NID.): 978-952-5681-98-7. ISBN (PDF.): 978-952-5681-99-4. ISSN: 1239-9094. ISSN: (verkkojulkaisu) 1797-5972.



- Boren, H. 2014a. Liiketoimintamallit: Puun palosuojaus. <http://puunkaytto.lieksada.fi/aineistot>.
- Boren, H. 2014b. Puutuotteiden modifiointi. Vaihtoehtoisia ratkaisuja ikkunoiden ulkopuutteisiin, trooppisten kovapuiden käytölle ja kreosoottikyllästykselle. Puunkäytön laaja-alaistaminen -hankkeen osatutkimus. Lieksan Teollisuuskylä Oy, Lieksa. 45 s.
- Borrega, M. 2011. Mechanism affecting the structure and properties of heat-treated and high-temperature dried Norway spruce (*Picea abies*) wood. *Dissertationes Forestales* 134. 52 s. + liitteet.
- Borrega, M. & Kärenlampi, P.P. 2008. Effect of relative humidity on thermal degradation of Norway spruce (*Picea abies*) wood. *Journal of Wood Science* 54(4): 323–328.
- Borrega, M. & Kärenlampi, P.P. 2010. Three mechanisms affecting the mechanical properties of spruce wood dried at high temperatures. *Journal of Wood Science* 56(2): 87–94.
- Borrega, M. & Kärenlampi, P.P. 2011. Cell wall porosity in Norway spruce wood as affected by high-temperature drying. *Wood and Fiber Science* 43(2): 206–214.
- Borrega, M., Nevalainen, S. & Heräjärvi, H. 2009. Resistance of European and hybrid aspen wood against two brown-rot fungi. *European Journal of Wood and Wood Products* 67: 177–182.
- Brischke, C., Meyer, L., Alfredsen, G., Humar, M., Francis, L., Flæte, P.-E. & Larsson-Brelid, P. 2013. Natural durability of timber exposed above ground – a survey. *Drvna Industrija* 64(2): 113–129.
- Brischke, C., Welzbacher, C.R., Gellerich, A., Bollmus, S., Humar, M., Plaschkies, K., Scheiding, W., Alfredsen, G., Van Acker, J. & De Windt, I. 2014. Wood natural durability testing under laboratory conditions: results from a round-robin test. *European Journal of Wood and Wood Products* 72:129–133. DOI 10.1007/s00107-013-0764-6.
- Browning, B.L. 1981. The composition and chemical reactions of wood. Teoksessa: Browning, B.L. (toim.), *The chemistry of wood*. Interscience Publishers, New York. 689 s.
- Buchelt, B., Dietrich, T. & Wagenführ, A. 2012. Macroscopic and microscopic monitoring of swelling of beech wood after impregnation with furfuryl alcohol. *European Journal of Wood and Wood Products* 70: 865–869.
- Cai, C., Heräjärvi, H., Antikainen, J., Luostarinen, K. & Möttönen, V. 2015. Effect of prolonged water soaking on structure and chemistry of thermally modified Scots pine and Norway spruce wood. In: Hughes, M., Rautkari, L., Uimonen, T., Miliz, H. & Junge, B. (eds.). *Proceedings of the 8th European Conference on Wood Modification ECWM8*. Helsinki, October 26-27, 2015. p. 27-34.
- Cai, X., Riedl, B., Zhang, S.Y. & Wan, H. 2007. Effects of nanofillers on water resistance and dimensional stability of solid wood modified by melamine-urea-formaldehyde resin. *Wood and Fiber Science* 39(2): 307–318.
- CEN. 2016. Durability of wood and wood-based products. Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. EN 350:2016. (Brussels: CEN - European Committee for Standardization).
- CEN/TS 15912. 2012. Durability of reaction to fire performance. Classes of fire-retardant treated wood-based product in interior and exterior end use applications.
- Chang, H.-T. & Chang, S.-T. 2002. Moisture excluding efficiency and dimensional stability of wood improved by acetylation. *Bioresource Technology* 85: 201–204.
- Clausen, C.A. 2013. Innovations in wood protection in the age of nanotechnology. Teoksessa: Bento, F.M., Hidalgo, G.E.N, Gaylarde, C.C. Shirakawa, M.A. Camargo, F.A.O. (toim.). L356, 8th Latin American biodeterioration and biodegradation symposium – Porto Alegre, RS, Brasil, April 7th to 10th, 2013. ss. 96–99.
- Clausen, C.A., Green III, F. & Kartal, S.N. 2010. Weatherability and Leach Resistance of Wood Impregnated with Nano-Zinc Oxide. *Nanoscale Research Letters* 5: 1464–1467.
- Dagbro, O., Tornaiainen, P., Karlsson, O. & Morén, T. 2010. Colour responses from wood, thermally modified in superheated steam and pressurized steam atmospheres. *Wood Material Science and Engineering* 5: 211–219.
- De Vetter, L., Pilgård, A., Treu, A., Westin, M. & Van Acker, J. 2009. Combined evaluation of durability and ecotoxicity: A case study on furfurylated wood. *Wood Material Science & Engineering* 4(1–2): 30–36.

- Dubey, M.K., Pang, S. & Walker, J. 2011. Effect of oil heating age on colour and dimensional stability of heat treated *Pinus radiata*. *European Journal of Wood and Wood Products* 69: 255–262.
- Dumail, J.F. & Salmén, L. 1997. Compression behaviour of saturated wood perpendicular to grain under large deformations – comparison between watersaturated and ethylene glycolsaturated wood. *Holzforschung* 51: 296–302.
- Eikenes, M., Alfredsen, G., Christensen, B.E., Militz, H. & Solheim, H. 2005. Comparison of chitosans with different molecular weights as possible wood preservatives. *Journal of Wood Science* 1: 387–394.
- Energiateollisuus ry 2010. Tulevaisuuden sähköpölyvä. Loppuraportti. Sähkö tutkimuspooli. Laatiija: Boren, H., Borenova Oy. 78 s.  
[http://energia.fi/sites/default/files/tulevaisuuden\\_sahkopylvaat\\_loppuraportti.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/tulevaisuuden_sahkopylvaat_loppuraportti.pdf).
- Esteves, B.M., Domingos, I.J., Pereira, H.M. 2008. Pine wood modification by heat treatment in air. *Bioresources* 3(1): 142–154.
- Esteves, B.M. & Pereira, H.M. 2009. Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources* 4(1): 370–404.
- Esteves, B., Nunes, L. & Pereira, H. 2011. Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). *European Journal of Wood and Wood Products* 69: 521–525.
- Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I. & Pereira, H. 2013. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(2): 245–258.
- Esteves, B., Nunes, L., Domingos, I. & Pereira, H. 2014. Improvement of termite resistance, dimensional stability and mechanical properties of pine wood by paraffin impregnation. *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 609–615.
- Fang, C., Mariotti, N., Cloutier, A., Koubaa, A. & Blanchet, P. 2012. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. *European Journal of Wood and Wood Products* 70: 155–163.
- Fengel, D. & Wegener, G. 1989. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter, Berlin, Germany. 784 s.
- Fernandes Diniz, J.M.B., Gil, M.H. & Castro, J.A.A.M. 2004. Hornification—its origin and interpretation in wood pulps. *Wood Sci Technol* 37: 489–494. doi:10.1007/s00226-003-0216-2
- Fredriksson, M., Wadsö, L. & Ulvcróna, T., 2010. Moisture sorption and swelling of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] impregnated with linseed oil. *Wood Material Science and Engineering* 5(3-4), ss. 135–142.
- Frühwald, E., Yujing, L. & Wadsö, L. 2008. Image analysis study of mould susceptibility of spruce and larch wood dried or heat-treated at different temperatures. *Wood Material Science and Engineering* 1–2: 55–61
- Gascón-Garrido, P., Oliver-Villanueva, J.V., Ibiza-Palacios, M.S., Militz H., Mai, C. & Adamopoulos S. 2013. Resistance of wood modified with different technologies against Mediterranean termites (*Reticulitermes spp.*). *International Biodeterioration & Biodegradation* 82: 13–16.
- Gellerich, A., Bollmus, S., Militz, H. & Krause, A. 2012. Influence of moisture conditions on the colonisation of modified wood by sapstaining fungi during outside weathering. Proceedings of the sixth European Conference on Wood Modification, Ljubljana, Slovenia.
- Ghonche, R., Ghofrani, M., Taghiyari, H.R., Jamnani, B. & Khajeh, M.A. 2012. Mechanical performance and dimensional stability of nano-silver impregnated densified spruce wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 70: 595–600.
- Giudice, C.A., Alfieri, P.V. & Canosa, G. 2013. Decay resistance and dimensional stability of *Araucaria angustifolia* using siloxanes synthesized by solegel process. *International Biodeterioration & Biodegradation* 83: 166–170.
- Grenier, D., Bailléres, H., Méot, J.-M., Langbour, P., Lanvin, J.-D. 2003. A study of water loss and oil absorption during oleothermic treatment of wood. Julkaisussa: Van Acker, J. & Hill, C. (toim.) Proceedings of the First European Conference on Wood Modification. Ghent, Belgium. Ss: 23–32.
- Hanger, J., Huber, H., Lackner, R. & Wimmer, R. 2002. Physikalische Eigenschaften heimischer Holzarten nach Wärmebehandlung. *Holzforschung und Holzverwertung* 6/2002: 111–113.

- Hanhijärvi, A. 1998. Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part I. Experimental techniques for conditions simulating the drying process and results on shrinkage, hygrothermal deformation, modulus of elasticity and strength. *Holz als Roh- und Werkstoff* 56: 373–380.
- Hauptmann, M., Rosenau, T., Gindl-Altmutter, W. & Hansmann, C. 2014. Effects of UV-irradiation on tricaine impregnated wood *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 617–622.
- He, S., Lin, L., Fu, F., Zhou, Y. & Fan, M. 2014. Microwave Treatment for Enhancing the Liquid Permeability of Chinese Fir. *Bioresources* 9(2): 1924–1938.
- Heräjärvi, H. 2009. Effect of drying technology on aspen wood properties. *Silva Fennica* 43(3): 433–445.
- Heräjärvi, H., Junkkonen, R., Koivunen, H., Metros, J., Piira, T. & Verkasalo, E. 2006. Metsä- ja hybridihaapa sahatavaran ja jatkojalosteiden raaka-aineena. *Metlan työraportteja* 31. 102 s. (<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2006/mwp031.htm>)
- Heräjärvi, H., Möttönen, V., Reinikkala, M. & Stöd, R. 2014. Absorption-desorption behaviour and dimensional stability of untreated, CC impregnated and pine oil treated glulam made of Scots pine and Norway spruce. *International Biodeterioration & Biodegradation* 86: 66–70.
- Heräjärvi, H., Möttönen, V. & Stöd, R. 2012. Water absorption and desorption of non-treated, pressure impregnated, and pine oil treated glulam made of small diameter Scots pine and Norway spruce. IRG/WP 12-40616. IRG Secretariat, Stockholm, Sweden. 5 p.
- Hill, C.A.S. 2006. Wood modification: chemical, thermal and other processes, John Wiley & Sons, Chichester, England. 239 s.
- Hill, C.A.S. 2011. Wood modification: an update. *Bioresources* 6(2): 918–919.
- Hill, C.A.S., Ramsay, J., Laine, K., Rautkari, L. & Hughes, M. 2013. Water vapour sorption behaviour of thermally modified wood. *International Wood Products Journal* 4(3): 191–196.
- Hill, C.A.S. & Norton, A. 2014. The environmental impacts associated with wood modification balanced by the benefits of life extension. In: Nunes, L., Jones, D., Hill, C.A.S. & Miliz, H. (Eds.). Proceedings of the “ECWM7 – European Conference on Wood Modification”, Lisboa, Portugal, 10–12 March, 2014. 8 p. [www.researchgate.net/publication/280877162](http://www.researchgate.net/publication/280877162).
- Hoadley, R.B. 1980. Understanding Wood – A craftsman’s guide to wood technology. The Taunton Press, Inc. Newtown, Connecticut. 256 s.
- Hoffman, P. 1988. On the stabilization of waterlogged oakwood with polyethylene glycol (PEG) III. Testing the oligomers. *Holzforschung* 42(5): 289–294.
- Homan, W.J. & Jorissen, A.J.M. 2004. Wood modification developments. *Heron* 49: 361–386.
- Hon, DN-S. 2000. Weathering and photochemistry of wood. Teoksessa: Hon, DN-S., Shiraishi, N., (toim.), Wood and cellulostic chemistry. 2nd ed. New York, Marcel Dekker. Ss. 512–46.
- Hyvönen, A., Piltonen, P. & Niinimäki, J. 2006. Tall oil/water – emulsions as water repellents for Scots pine sapwood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 68–73. DOI 10.1007/s00107-005-0040-5
- Ilvolankoski Oy. 2017. [www.solidiwood.fi](http://www.solidiwood.fi).
- Inoue, M., Sekino, N., Morooka, T., Rowell, R.M. & Norimoto, M. 2008. Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *Journal of Tropical Forest Science* 20(4): 273–281
- ISO 5660-1. 2015. Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)
- Junkkonen, R. & Heräjärvi, H. 2006. Physical properties of European and hybrid aspen wood after three different drying treatments. Wood structure and properties '06. Edited by S. Kurjatko, J. Kudela & R. Lagana. Ss. 257–264.
- Jämsä, S. & Viitaniemi, P. 2001. Heat treatment of wood: Better durability without chemicals. In A. O. Rapp (ed.) Review on Heat Treatments of Wood. Proceedings of the special seminar of COST Action E22, 9 February, Antibes, France, ss. 21–26.
- Jääskeläinen, A.-S. & Sundqvist, H. 2007. Puun rakenne ja kemia. Hakapaino Oy, Helsinki. 142 s.
- Kamdern, D.P., Pizzi, A. & Jermannaud, A. 2002. Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 1–6.

- Kamke, F.A. & Rathi, V.M. 2011. Apparatus for viscoelastic thermal compression of wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 69: 483–487.
- Karlsson, O., Sidorova, E. & Morén, T. 2011. Influence of heat transferring media on durability of thermally modified wood. *Bioresources* 6: 356–372.
- Kartal, S.N., Yoshimura, T. & Imamura, Y., 2009. Modification of wood with Si compounds to limit boron leaching from treated wood and to increase termite and decay resistance. *International Biodeterioration & Biodegradation* 63(2), ss.187–190.
- Kervinen, O. 2012. Lämpöpuun prosessiparametrien vaikutus havupuusahatavaran väriin ja iskulujuuteen. Lahden ammattikorkeakoulu Puutekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. 97 s.
- Kokko, M. 2010. Booripohjaisen kyllästysaineen huuhtoutumisen tutkiminen. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Puutekniikan opinnäytetyö. 61 s.
- Koski, A., 2008. Applicability of crude tall oil for wood protection. *Acta Universitatis Ouluensis* 293. 99 p. + App.
- Kotilainen, R., Alén, R. & Arpiainen, V. 1999. Changes in the chemical composition of Norway spruce (*Picea abies*) at 160–260°C under nitrogen and air atmospheres. *Paperi ja puu – Paper and timber* 81(5): 384–388.
- Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C-T. & Niemz, P. 2016. Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology* 50: 7–22.
- Krause, A. & Militz, H. 2009. Process for improving the durability, dimensional stability and surface hardness of a wood body. U.S. Patent no. 7,595,116 B2.
- Kumar, S. 1994. Chemical modification of wood. *Wood and Fiber Science*. 26(2): 270–280.
- Kuo, M.L. & Hu, N. 1991. Ultrastructural changes of photodegradation of wood surfaces exposed to UV. *Holzforschung* 45: 347–353.
- Kutnar, A., Kamke, F.A. & Sernek, M. 2009. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology* 43: 57–68.
- Kutnar, A., Rautkari, L., Laine, K. & Hughes, M. 2012. Thermodynamic characteristics of surface densified solid Scots pine wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 70: 727–734.
- Kutnik, M., Suttie, E. & Brischke, C. 2014. European standards on durability and performance of wood and wood-based products – Trends and challenges. *Wood Material Science & Engineering* 9(3): 122–133.
- Laine, K., Rautkari, L., Hughes, M. & Kutnar, A. 2013. Reducing the set-recovery of surface densified solid Scots pine wood by hydrothermal post-treatment. *European Journal of Wood and Wood Products* 71: 17–23.
- Laine, K., Segerholm, K., Wålinder, M., Rautkari, L. & Hughes, M. 2016. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and micromorphology. *Wood Science and Technology* 50: 883–894.
- Laks, P.E., McKaig, P.A., & Hemingway, R.W. 1988. Flavanoid biocides: wood preservatives based on condensed tannins. *Holzforschung* 42: 299–306.
- Lande, S., Eikenes, M. & Westin, M. 2004a. Chemistry and Ecotoxicology of Furfurylated Wood. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(Suppl. 5): 14–21.
- Lande, S., Westin, M. & Schneider, M.H. 2004b. Eco-efficient wood protection: Furfurylated wood as alternative to traditional wood preservation. *Management of Environmental Quality: An International Journal* 15(5): 529–540.
- Larnøy, E., Dantz, S., Eikenes, M. & Militz, H. 2006. Screening of properties of modified chitosan-treated wood. *Wood Material Science & Engineering* 1(2): 59–68.
- Lekounougou, S., Kokaefe, D., Oumarou, N., Kokaefe, Y. & Poncsak, S. 2011. Effect of thermal modification on mechanical properties of Canadian white birch (*Betula papyrifera*). *International Wood Products Journal* 2(2): 101–107.
- Li, Y.F., Liu, Y.X., Wang, X.M. & Wang, F.H. 2010. Improvement of Durability of Wood by Maleic Anhydride. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 65(41): 86–89.
- Liibert, L., Treu, A. & Meier, P. 2011. The Fixation of New Alternative Wood Protection Systems by Means of Oil Treatment. *Materials science (Medžiagotyra)* 17(4): 402–406.

- Liu, H., Shang, J., Chen, X., Kamke, F.A. & Guo, K. 2014. The influence of thermal-hydro-mechanical processing on chemical characterization of *Tsuga heterophylla*. *Wood Science and Technology* 48: 373–392.
- Lu, J.X., Lin, Z.Y., Jiang, J.L., Jiang, J.H. & Kang, H.Y. 2005. Effect of different drying methods on the liquid penetration of Chinese fir plantation wood. Teoksessa: 9th IUFRO International Wood Drying Conference. Nanjing, China, August 21–26, 2005.
- Lämpöpuuyhdistys ry. 2017. <https://www.thermowood.fi/>
- Mahltig, B., Swaboda, C., Roessler, A. & Böttcher, H. 2007. Functionalising wood by nanosol application. *Journal of Materials Chemistry* 18: 3180–3192.
- McDonald, A.G., Gifford, J.S., Dare, P.H. & Steward, D. 1999. Characterisation of the condensate generated from vacuum-drying of radiata pine wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57(4): 251–258.
- Metsä-Kortelainen, S. & Viitanen, H. 2009. Decay resistance of sapwood and heartwood of untreated and thermally modified Scots pine and Norway spruce compared with some other wood species. *Wood Material Science and Engineering* 4: 105–114.
- Metsä-Kortelainen, S. & Viitanen, H. 2015. Durability of thermally modified sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce in the modified double layer test, *Wood Material Science & Engineering*, DOI: 10.1080/17480272.2015.1061596.
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Alfredsen, G., Humar, M., Flæte, P.-O., Isaksson, T., Larsson Breid, P., Westin, M. & Jermer, J. 2017. The combined effect of wetting ability and durability on outdoor performance of wood: development and verification of a new prediction approach. *Wood Sci Technol* 51: 615–637. DOI 10.1007/s00226-017-0893-x
- Miklečić, J., Jirouš-Rajković, V., Antonović, A. & Španić, N. 2011. Discolouration of thermally modified wood during simulated indoor sunlight exposure. *Bioresources* 6(1): 434–446.
- Miklečić, J., Kaša, A. & Jirouš-Rajković, A. 2012a. Colour changes of modified oak wood in indoor environment. *European Journal of Wood and Wood Products* 70: 385–387.
- Miklečić, J., Španić, N. & Jirouš-Rajković, V. 2012b. Wood color changes by ammonia fuming. *Bioresources* 7(3): 3767–3778.
- Militz, H. 1993. Treatment of timber with water soluble dimethylol resin to improve their dimensional stability and durability. *Wood Science and Technology* 27: 347–355.
- Militz, H. 2007. Presentation given to 65th UNECE Timber Committee.
- Militz, H. 2016. Wood Modification in Europe in the Year 2015: a Success Story? Proceedings of the Eighth European Conference on Wood Modification. s. 17.
- Militz, H., Lande, S. 2009. Challenges in wood modification technology on the way to practical applications. *Wood Material Science & Engineering* 4: 1–2, 23–29.
- Morard, M., Vaca-Garcia, C., Stevens, M., Van Acker, J., Pignoletta, O. & Borredon E. 2007. Durability improvement of wood by treatment with Methyl Alkenoate Succinic Anhydrides (M-ASA) of vegetable origin. *International Biodeterioration & Biodegradation* 59: 103–110.
- Morsing, N. 2000. Densification of wood. The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. Department of structural engineering and materials, Technical university of Denmark. Series R No 79. 138 p.
- Myllylä, H. 2010. Vesilasikyllästetyn männyn tasapainokosteus ja dimensiostabiilisuus. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Puutekniikka. Opinnäytetyö, 43 s.
- Möttönen, V., Stöd, R., Heikkilä, K. & Heräjärvi, H. 2012. Effect of preservative treatment on mechanical performance of round and square poles made of small diameter Scots pine. IRG/WP 12-40612. IRG Secretariat, Stockholm, Sweden. 11 p
- Möttönen, V. & Kärki, T. 2013. Effect of pre-drying on colour and mechanical properties of thermally modified Silver birch timber. In: Berti, S., Achim, A., Fioravanti, M., Lihra, T., Loewe Munoz, V., Marchal, R., Wiedenbeck, J. & Zanuttini, R. (eds.). 4th International Scientific Conference on Hardwood Processing 2013, 7th–9th October 2013. Florence, Italy. Proceedings. p. 172–179.

- Möttönen, V., Bütün, Y., Heräjärvi, H., Antikainen, J. & Marttila, J. 2015a. Physical Properties and Dimensional Stability after Combined Compression and Thermal Modification of Birch and Aspen Lumber. Proceedings of the ISCHP2015 conference, Quebec, Canada. pp 147–153.
- Möttönen, V., Bütün, Y., Heräjärvi, H., Marttila, J. & Kaksonen, H. 2015b. Effect of combined compression and thermal modification on mechanical performance of aspen and birch wood. *Pro Ligno* 11(4): 310–317.
- Natwood 2016. <http://www.natwood.co.at/Procedure.html>
- Navi, P. & Sandberg, D. 2012. Thermo-hydro-mechanical processing of wood. Lausanne, Switzerland: EPFL Press. 360 s.
- Nordic Wood Preservation Council 2011. Nordic requirement for quality control of preservative-treated wood. Part 2: Spruce (*Picea* spp). NWPC Document No. 3:2011
- Nordic Wood Preservation Council 2013. Nordic requirements for quality control of preservative-treated wood. Part 1: Pine and other permeable softwoods. NWPC Document No. 3:2013.
- Nordic Wood Preservation Council 2017. Nordic requirements for quality control of industrially protected wood. Part 4: Modified wood. NWPC Document No 3. Part 4:2017
- Obanda, D.N., Shupe, T.F. & Barnes, H.M. 2008. Reducing leaching of boron-based wood preservatives – A review of research. *Bioresource Technology* 99: 7312–7322.
- Obounou-Akong, F. Gérardin, P, Thévenon, M.-F. & Gérardin-Charbonnier, C. 2015. Hydrogel-based boron salt formulations for wood preservation. *Wood Science and Technology* 49: 443–456.
- Ohnesorge, D., Tausch, A., Krowas, I. Huber, C., Becker, G. & Fink, S. 2009. Laboratory tests on the natural durability of six different wood species after hygrothermal treatment. Proceedings of the 4th European Conference on Wood Modification, Stockholm, April 27–29.
- Paajanen, L., Koskela, K. & Viitaniemi, P. 1999. Puun kyllästäminen mäntyöljyn ja maleiinihappoanhydridin seoksella. VTT, Espoo. VTT Julkaisuja - Publikationer : 836. 75 s. ISBN 951-38-5012-9.
- Papadopoulos, A.N. & Mantanis, G.I. 2012. Vapour sorption studies of Belmadur wood. *Advances in Forestry Letter* 1(1): 1–6.
- Pařil, P., Brabec, M., Maňák, O., Rousek, R., Rademacher, P., Čermák, P. & Dejmal, A. 2014. Comparison of selected physical and mechanical properties of densified beech wood plasticized by ammonia and saturated steam. *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 583–591.
- Petrič, M. 2013. Surface modification of wood: a critical review. *Reviews of Adhesion and Adhesives* 1: 216–247.
- Pétrissans, M., Gérardin, P., El Bakali, I. & Serraj, M. 2003. Wettability of heat-treated wood. *Holzforschung* 57 (3): 301–307.
- Pfeffer, A., Dieste, A., Mai, C. & Miltz, H. 2011. Effects of water glass and DMDHEU treatment on the colonisation of wood by *Aureobasidium pullulans*. *European Journal of Wood and Wood Products* 69: 303–309.
- Podgorski, L., Le Bayon, I., Paulmier, I., Lanvin, J.-D., Georges, V., Grenier, D., Baillères, H. & Méot, J.-M. 2008. Bi-oleothermal treatment of wood at atmospheric pressure: resistance to fungi and insects, resistance to weathering and reaction to fire results. IRG/WP 08-40418. 16 s.
- Poncsák, S., Kocaefe, D., Bouazara, M. & Pichette, A. 2006. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology* 40: 647–663.
- Pries, M. & Mai, C. 2013. Fire resistance of wood treated with a cationic silica sol. *European Journal of Wood and Wood Products* 71: 237–244.
- Puuinfo 2013. Tekninen tiedote 26.2.2013. Puurakenteen palomitoitus. <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/puurakenteen-palomitoitus>
- Rapp, A.O. & Sailer, M. 2001. Oil heat treatment of wood in Germany – State of the art. In: Review on heat treatments of wood, Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, France.
- Rautkari, L., Kamke, F.A. & Hughes, M. 2011. Density profile relation to hardness of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood composite. *Wood Science and Technology* 45: 693–705.

- Rautkari, L., Laine, K., Kutnar, A., Medved, S. & Hughes, M. 2013. Hardness and density profile of surface densified and thermally modified Scots pine in relation to degree of densification. *J Mater Sci* 48:2370–2375. DOI 10.1007/s10853-012-7019-5
- Reinprecht, L. 2016. Wood deterioration, protection and maintenance. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex. 357 s.
- Ringman, R., Pilgård, A., Brischke, C. & Richter, K. 2014. Mode of action of brown rot decay resistance in modified wood: a review. *Holzforschung* 68: 239–246.
- Ritschkoff, A. & Viitanen, H. 1989. Preliminary studies of the decay mechanism of some brown-rot fungi. IRG/WP 1402.
- Rowell, R.M. 1983. Chemical Modification of Wood. Review Article. *Forest Products Abstracts* 6(12): 363–382.
- Rowell, R.M. 2007. Chemical modification of wood. Teoksessa: Stoyko Fakirov & Debes Bhattacharyya (toim.), Handbook of engineering biopolymers: homopolymers, blends, and composites. Carl Hanser Verlag, Munich. ss. 673-691. ISBN 978-1-56990-405-3
- Rowell, R.M. 2014. Acetylation of wood – A review. *International Journal of Lignocellulosic Products* 1(1): 1–28.
- Rowell, R.M. & Banks, W.B. 1985. Water Repellency and Dimensional Stability of Wood. Gen. Tech. Rep. FPL-50. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1985. 24 s.
- Rowell, R.M., Ibach, R.E., McSweeney, J. & Nilsson, T. 2009. Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood. *Wood Material Science and Engineering* 1-2: 14–22.
- Rowell, R.M. & Konkol, P. 1987. Treatments that enhance physical properties of wood. General Technical Report FPL-GTR-55. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 12 s.
- Rowell, R.M. & Dietenberger, M.A. 2013. Thermal properties, Combustion, and Fire Retardancy of Wood.. Teoksessa: R.M. Rowell (toim.), Handbook of wood chemistry and wood composites, Taylor & Francis, New York.
- Räsänen, V. 2015. Lämpökäsittelyn vaikutus puun liimattavuuteen. Insinööriyö. Savonia amk, tekniikan ja liikenteen ala, puutekniikan koulutusohjelma. 36 s. + liitteet.
- Saad, N.Y., Muller, C.D. & Lobstein, A. 2013. Major bioactivities and mechanism of action of essential oils and their components. *Flavour and Fragrance Journal* 28(5): 269–279.
- Salman, S., Pétrissans, A., Thévenon, MF., Dumarçay & Gérardin, P. 2016. Decay and termite resistance of pine blocks impregnated with different additives and subjected to heat treatment. *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 37–42. DOI 10.1007/s00107-015-0972-3
- Salman, S., Pétrissans, A., Thévenon, MF., Dumarçay, S., Perrin, D., Pollier, B. & Gérardin, P. 2014. Development of new wood treatments combining boron impregnation and thermo modification: effect of additives on boron leachability. *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 355–365.
- Sandberg, D. & Kutnar, A. 2016. Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America. *Wood and Fiber Science* 48: 28–39.
- Sandberg, D., Kutnar, A. & Mantanis, G. 2017. Wood modification technologies – a review. *iForest* 10: 895–908.
- Scheffer, T.C., 1973. Microbial degradation and the causal organisms. Teoksessa: Nicholas, D.D. (toim.). Wood deterioration and its prevention by preservative treatments, Vol 1 Degradation and protection of wood. Syracuse University Press, Syracuse, NY. 380 p.
- Schneider, A. 1969. Untersuchungen über Eigenschaftänderungen des Holzes durch Tränkung mit Polyäthylenglykol und über die Wirksamkeit verschiedener Tränkverfahren. *Holz als Roh- und Werkstoff* 28(6): 20–34.
- Scholz, G., Miltitz, H., Gascón-Garrido, P., Ibiza-Palacios, M.S., Oliver-Villanueva, J.V., Peters, B.C. & Fitzgerald, C.J. 2010. Improved termite resistance of wood by wax impregnation. *International Biodeterioration & Biodegradation* 64: 688–693.

- Sehlstedt-Persson, M. 2003. Colour responses to heat-treatment of extractives and sap from pine and spruce. 8<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, 459–464.
- SFS-EN ISO 11925-2. 2010. Reaction to fire tests. Ignitability of products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single-flame source test.
- SFS-EN 13238. 2010. Reaction to fire tests for building products. Conditioning procedures and general rules for selection of substrates.
- SFS-EN 13501-1 + A1. 2010. Rakennustuotteiden ja rakennusosien paloluokitus. Osa 1: Palokäyttätymiskokeiden tuloksiin perustuva luokitus
- SFS-EN 13823 + A1. 2015. Reaction to fire tests for building products. Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item
- SFS-EN 1995-1-2 + AC. 2004. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1–2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus
- Shabir Mahr, M., Hübert, T., Stephan, I. & Miltz, H. 2013. Decay protection of wood against brown-rot fungi by titanium alkoxide impregnations. *International Biodeterioration & Biodegradation* 77: 56–62.
- Shamaev, V. 2012. Prospects of production and application of modified wood. Scientific Journal KubGAU, 78, 1–11. <http://ej.kubagro.ru/>
- Simon, F., Kutnik M., M., Goyer, M., Thévenon, M.-F., Alfos, C. & Céron, M. 2011. Optimization of the bi-oleothermal treatment process for wood preservation and fireproofing. IRG/WP 11-40566.
- Singh, T. & Singh, A.P. 2012. A review on natural products as wood protectant. *Wood Science and Technology* 46(5): 851–870.
- Sivonen, H., Maunu, S.L., Sundholm, F., Jämsä, S. & Viitaniemi, P. 2002. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung* 56: 648–654.
- Soulounganga, P., Loubinoux, B., Wozniak, E., Lemor, A. & Gérardin P. 2004. Improvement of wood properties by impregnation with polyglycerol methacrylate. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62: 281–285.
- Stamm, A.J. 1959. Effect of polyethylene glycol treatment upon the dimensional stabilization and other properties of wood. *Forest Products Journal* 9(10): 375–381.
- Stingl, R., Zukal, M.L., Emsenhuber, G. & Teischinger, A. 2010. Performance of moderate thermal treated Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in outdoor applications. Teoksessa: Kúdela, J. & Lagaňa, R. (toim.), Wood Structure and Properties '10, Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia. ss. 135–139. ISBN: 978-80-968868-5
- Stolf, D.O., Lahr, F.A.R. 2004. Wood-polymer composite: physical and mechanical properties of some wood species impregnated with styrene and methyl methacrylate. *Materials Research* 7(4): 611–617.
- Sundqvist, B. 2004. Colour changes and acid formation in wood during heating. Luleå University of Technology. Doctoral thesis. Skellefteå campus, Division of wood material science. 50 s.
- Talikka, L. 2006. Lämpökäsitellyn puun liimaamisen haasteet. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, metsä- ja puuteknologian proseminarityö. 29 s.
- Tarvainen, V., Pietilä, J. & Serenius, M. 2001. Puun öljykuivaus, öljykylästäys ja värjäys [Drying of timber in hot oil]. Technical Research Centre of Finland, Espoo. VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2083. 65 p. + app. 9 p.
- Tascioglu, C., Yalcin M., Sen, S. & Akcay, C. 2013. Antifungal properties of some plant extracts used as wood preservatives. *International Biodeterioration & Biodegradation* 85: 23–28.
- Temiz, A., Alfredsen, G., Eikenes, M. & Terziev, N. 2008. Decay resistance of wood treated with boric acid and tall oil derivatives. *Bioresource Technology* 99: 2102–2106.
- Thybring, E.E. 2013. The decay resistance of modified wood influenced by moisture exclusion and swelling reduction. *International Biodeterioration & Biodegradation* 82 (2013) 87–95.
- Tjeerdsma, B.F. & Miltz, H. 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63: 102–111 DOI 10.1007/s00107-004-0532-8



- Treu, A. & Larnøy, E. 2010. Wood protection by means of electro osmotic pulsing technology (PLEOT). IRG/WP 10-40505.
- Tjeerdma, B.F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P. & Militz, H. 1998. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff* 56: 149–153.
- Todorović, N., Popović, Z. & Milić, G. 2015. Estimation of quality of thermally modified beech wood with red heartwood by FT-NIR spectroscopy. *Wood Science and Technology* 49: 527-549. DOI 10.1007/s00226-015-0710-3
- Tomppo, L., Tiitta, M. & Lappalainen, R. 2014. Non-destructive evaluation of checking in thermally modified timber. *Wood Science and Technology* 48: 227–238.
- Tomppo, L., Tiitta, M. & Lappalainen, R. 2016. Air-coupled ultrasound and electrical impedance analyses of normally dried and thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Wood Material Science & Engineering* 11(5): 274–282, <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2014.983162>
- Tondi, G., Thevenon, M.F., Mies, B., Standfest, G., Petutschnigg, A. & Wieland, S. 2013. Impregnation of Scots pine and beech with tannin solutions: effect of viscosity and wood anatomy in wood infiltration. *Wood Science and Technology*
- Torniainen, P., Elustondo, D. & Dagbro, O. 2016. Industrial Validation of the Relationship between Color Parameters in Thermally Modified Spruce and Pine. *BioResources* 11(1): 1369–1381.
- Troppová, E., Tippner, J., Hřčka, R. & Halachan, P. 2013. Quasi-Stationary Measurements of Lignamon Thermal Properties. *Bioresources* 8(4): 6288-6296.
- Unger, A., Schniewind, A.P. & Unger, W. 2001. Conservation of wood artifacts. Springer, Berlin.
- Unger, B., Bücker, M., Reinsch, S. & Hübert, T. 2013. Chemical aspects of wood modification by sol-gel-derived silica. *Wood Science and Technology* 47: 83–104.
- US 3090411A 1963. Method of simultaneous stabilization and drying of wood. Junckers Savvaerk As, Denmark. (Schmidt, J., Damgaard, J., Juncker Flemming, G., Jacobsen Vagn, K., Henk, P.,) US 3090411A, Julk. 21.5.1963. 2 s.
- Venäläinen, M., Partanen, H. & Harju, A. 2014. The strength loss of Scots pine timber in an accelerated soil contact test. *International Biodeterioration & Biodegradation* 86: 150–152.
- Viitanen, H. 2011. Puurakenteiden kestoikä. Rakentajain kalenteri 2011. ss. 113–118.
- Viitaniemi, P. & Jämsä, S. Puun modifiointi lämpökäsittelyllä. VTT Julkaisuja – Publikationer 814. 57 s.
- Viitaniemi, P., Jämsä, S. & Mali, J. 1998. Puun kemiallinen modifiointi maleiinihappoanhydridiglyseroliseoksella. VTT, Espoo. VTT Julkaisuja - Publikationer : 832. 49 s. ISBN 951-38-5007-2
- Väärä, T., Stöd, R. & Boren, H. 2012. Moderni painekyllästys ja uusien puutuotteiden testaus aidossa, rakennetussa ympäristössä. Jatkohankkeen loppuraportti. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Tutkimuksia ja raportteja, B-sarja Nro: 75. ISSN 1239-9094.
- Wagner, L., Almkvist, G., Bader, T.K., Bjurhager, I., Rautkari, L. & Gamstedt, E.K. 2016. The influence of chemical degradation and polyethylene glycol on moisture-dependent cell wall properties of archeological wooden objects: A case study of the Vasa shipwreck. *Wood Science and Technology* 50(6): 1103–1123.
- Wallström, L. & Lindberg, K.A.H. 1995. Wood surface stabilization with Polyethylene glycol, PEG. *Wood Science and Technology* 29: 109–119.
- Wang, J., Zhao, G. & Iida, I. 2000. Effect of oxidation on heat fixation of compressed wood of China fir. *Forestry Studies in China* 2(1): 73–79.
- Wang, W., Cao, J., Cui, F. & Wang, X. 2012. Effect of pH on chemical components and mechanical properties of thermally modified wood. *Wood and Fiber Science* 44(1): 46–53.
- Weichelt, F., Beyer, M., Emmler, R., Flyunt, R., Beyer, E. & Buchmeiser, M. 2011. Zinc oxide based coatings for the UV-protection of wood for outdoor applications. *Macromolecular Symposia* 301: 23–30.
- Weigl, M., Pöckl, J. & Grabner, M. 2009. Selected properties of gas phase ammonia treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 67: 103–109.

- Weigl, M., Müller, U., Wimmer, R. & Hansmann, C. 2012. Ammonia vs. thermally modified timber—comparison of physical and mechanical properties. *European Journal of Wood and Wood Products* 70: 233–239.
- Welzbacher, C.R., Brischke, C. & Rapp, A.O. 2007. Influence of treatment temperature and duration on selected biological, mechanical, physical and optical properties of thermally modified timber. *Wood Material Science & Engineering* 2: 66–76.
- Welzbacher, C.R., Wehsener, J., Rapp, A.O. & Haller, P. 2008. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale – Dimensional stability and durability aspects. *Holz als Roh- und Werkstoff* (2008) 66: 39–49.
- Welzbacher, C.R., Rassam, G., Talaei, A. & Brischke, C. 2011. Microstructure, strength and structural integrity of heat-treated beech and spruce wood. *Wood Material Science & Engineering* 6: 219–227.
- Widmann, R. & Beikircher, W. 2010. Thermally modified beechwood as a structural material: allocation to European strength-classes and relevant grading procedures. WCTE, World Conference on Timber Engineering 2010.
- Widmann, R., Fernandez-Cabo, J.L. & Steiger, R. 2012. Mechanical properties of thermally modified beech timber for structural purposes. *European Journal of Wood and Wood Products* 76(6): 775–784.
- Willems, W. 2009. A novel economic large-scale production technology for high-quality thermally modified wood. Proceedings of the fourth European Conference on Wood Modification, Stockholm, Sweden. pp. 31–35.
- Winandy, J.E. & Rowell, R.M. 2013. Chemistry of wood strength. Teoksessa: Rowell, R.M. (toim.), Handbook of wood chemistry and wood composites. CRC Press, Boca Raton. Ss. 413–455.
- Wu, G., Lang, Q., Qu, P., Jiang, Y. & Pu, J. 2010. Effect of chemical modification and hot-press drying on poplar wood. *BioResources* 5(4): 2581–2590.
- Xie, Y., Fu, Q., Wang, Q., Xiao, Z. & Militz, H. 2013. Effect of chemical modification on the mechanical properties of wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 71: 401–416.
- Zaman, A., Alén, R. & Kotilainen, R. 2000. Thermal behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and silver birch (*Betula pendula*) at 200–230 °C. *Wood and Fiber Science* 32(2): 138–143.

Liite 1. Modifioidun puun ominaisuuksien tutkimuksessa käytettävät yleisimmät CEN-standardit ja spesifikaatiot.

Ominaisuus	Soveltuva CEN standardi	Muu testispesifikaatio tai viitestandardi	Huomautukset
<b>Biologinen kestävyys</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Rusko- ja valkolaho</b></li> </ul>	<p><b>EN 73:2014.</b> Wood preservatives. Accelerated ageing of treated wood prior to biological testing. Evaporative ageing procedure.</p> <p><b>EN 84:1997.</b> Wood preservatives. Accelerated ageing of treated wood prior to biological testing. Leaching procedure.</p> <p><b>EN 113:1997.</b> Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes. Determination of the toxic values</p>	<p><b>CEN/TS 15083-1:2005.</b> Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods. Part 1. Basidiomycetes.</p> <p><b>EN 330:2014.</b> Wood preservatives. Determination of the relative protective effectiveness of a wood preservative for use under a coating and exposed out-of-ground contact. Field test: L-joint method.</p> <p><b>EN 599-1:2014.</b> Durability of wood and wood-based products. Efficacy of preventive wood preservatives as determined by biological tests. Part 1: Specification according to use class.</p>	<p>EN 113 standardin mukaan lahotuskoekappaleita täytyy hylätä seuraavin perustein: Mikäli käsitellyn kappaleen painohäviö on alle 3 %, niin koekappaleen kosteus ei saa olla alle 25 % tai yli 80 %. Luontaisen puun CEN/TS 15083-1:2005 testispesifikaatiossa tätä rajoitetta ei ole.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Katkolaho</b></li> </ul>	<p><b>ENV 807:2001.</b> Wood preservatives. Determination of the effectiveness against soft rotting micro-fungi and other soil inhabiting micro-organisms</p> <p><b>EN 252:2014.</b> Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact</p>	<p><b>CEN/TS 15083-2:2005.</b> Durability of wood and wood-based products. Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods. Soft rotting fungi.</p>	<p>EN252 mukainen kenttäkoe vaaditaan, jos tuotetta käytetään käyttöluokassa 4 tai 5 eli maa- tai vesikosketuksissa.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Sinistyminen</b></li> </ul>	<p><b>EN 152:2012.</b> Wood preservatives. Determination of the protective effectiveness of a preservative treatment against blue stain in wood in service. Laboratory method</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Home</b></li> </ul>	<p>Ei CEN standardia.</p>	<p><b>ASTM D3273-16. 2016.</b> Standard Test Method for Resistance to Growth of Mold on the Surface of Interior Coatings in an Environmental Chamber</p>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Termitit</b></li> <li>• <b>Nisäkästuhot</b></li> </ul>	<p><b>EN 117:2012.</b> Wood preservatives. Determination of toxic values against Reticulitermes species (European termites) (Laboratory method)</p> <p>Ei CEN standardia.</p>		<p>Esim. hevoset ja nautaeläimet purevat mielellään suolaista puuta</p>
<p><b>Säänkestävyys</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Mittapysyvyys</b></li> <li>• <b>Värimuutokset</b></li> <li>• <b>Halkeilu</b></li> </ul>	<p><b>EN 1910:2016.</b> Wood flooring and wood paneling and cladding. Determination of dimensional stability.</p> <p><b>EN 330:2014.</b> Wood preservatives. Determination of the relative protective effectiveness of a wood preservative for use under a coating and exposed out-of-ground contact. Field test: L-joint method.</p> <p><b>EN 927-6:2006.</b> Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Part 6: Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water.</p> <p><b>EN 927-3:2012.</b> Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Part 3: Natural weathering test.</p>	<p>Mittapysyvyyttä kuvaava ASE-arvo (anti swelling efficiency) on modifioimattoman ja modifioidun puun turpoamisen ero suhteessa modifioimattoman puun turpoamiseen. Kemiallisen modifioinnin tehokkuus riippuu usein sen aikaansaamasta puun painonlisäyksestä modifiointiprosessissa, jota kuvaa WPG-arvo (weight percentage gain).</p> <p>Yhteiseurooppalaisissa Cost-tutkimusohjelmissa on kehitetty modifioitujen ja luontaisten puumateriaalien suorituskykytestimenetelmiä, ns. Round Robin testejä, esim. alueellisten säärasitusolosuhteiden vaikutusten selvittämiseksi.</p>	<p>Suunniteltu enimmäkseen pinnoitteiden toimivuuden testaukseen lukuun ottamatta EN 1910:2016.</p>
<p><b>Palokäyttäytyminen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Syttyminen</b></li> <li>• <b>Liekin leviäminen</b></li> <li>• <b>Savuntuotto</b></li> <li>• <b>Pisarointi</b></li> <li>• <b>Palon kehittymisnopeus</b></li> </ul>	<p><b>EN ISO 11925-2:2011.</b> Reaction to fire tests. Ignitability of products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single-flame source test (ISO 11925-2:2010)</p> <p><b>EN 13823:2010.</b> Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item</p>	<p><b>EN 1995-1-2:2004.</b> Eurocode 5. Design of timber structures. General. Structural fire design.</p> <p><b>EN 13501-1. 2010.</b> Rakennustuotteiden ja rakennusosien paloluokitus.</p> <p><b>CEN/TS 15912:2012.</b> Durability of reaction to fire performance. Classes of fire-retardant treated wood-</p>	<p>Modifioidulla puulla palonkehittymisnopeus, kokonaislämmöntuotto ja hiiltymisnopeus ovat tärkeimmät testattavat ominaisuudet.</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Kokonaislämmön-tuotto</b></li> <li>• <b>Hiililymisnopeus</b></li> </ul>	<p><b>ISO 5660-1:2015.</b> Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)</p>	<p>based product in interior and exterior end use applications. This European Technical Specification describes the characteristics which fire-retardant treated wood products should exhibit so that their fire-retardant properties persist undiminished throughout the desired service life in the anticipated conditions of use.</p> <p><b>EN 14135:2004.</b> Coverings. Determination of fire protection ability.</p>	
<p><b>Kodin kemikaalien ja rasi- tusten kestävyys</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Vesi-, alkoholi-, kahvi-, maito-, punaviini-, rasvan- ja asetonikestävyys</b></li> <li>• <b>Naarmutuskestävyys</b></li> </ul> <p><b>Pesunkestävyys</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Lämmönkestävyys</b></li> </ul>	<p><b>EN 13442:2013.</b> Wood flooring and wood panelling and cladding. Determination of the resistance to chemical agents.</p> <p><b>EN ISO 1518-1:2011.</b> Paints and varnishes. Determination of scratch resistance. Part 1: Constant-loading method (ISO 1518-1:2011)</p> <p><b>EN ISO 1518-2:2012.</b> Paints and varnishes. Determination of scratch resistance. Part 2: Variable-loading method (ISO 1518-2:2011)</p>	<p>Standardin <b>SFS EN3755</b> mukaan pesunkestävyyttä voidaan tutkia testauslaitteistolla, jossa pinnoitteeseen kohdistetaan rasi- ja soodaliuoksen, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, avulla. Testissä tutkitaan, kuinka monta harjauksetta tutkittava maalikalvo kestää kulumatta puhki. Testattavalle pinnoitteelle on asetettu standardissa tietty paksuus (60 ± 10 µm), jolloin harjauksen edessä näyte tarkastetaan 200 ja 2000 harjauksen jälkeen. Standardi on kumottu 2011.</p>	<p>Standardin SFS-EN 13442 mukaan koekappaleille asetetaan erilaisiin nesteisiin (esim. asetonin, punaviini- ja maito) kastettu paperi, joka peitetään petrimaljalalla. Nesteen annetaan vaikuttaa tietyn ajan, jonka jälkeen paperi poistetaan, näyte kuivataan ja tutkitaan, onko pinnoitteessa tapahtunut muutoksia.</p> <p>Lämmönkestävyyden testaus voi olla tärkeä esim. saunatiloihin ja keittiöihin tarkoitetuissa tuotteissa, esim. pihkan tihkuminen lämmön vaikutuksesta.</p>

<p><b>Mekaaniset ominaisuudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Leikkauslujuus</b></li>   <li>• <b>Taivutuslujuus ja kimmokerroin</b></li>   <li>• <b>Puristuslujuus ja kimmokerroin</b></li>   <li>• <b>Vetolujuus</b></li>   <li>• <b>Kovuus</b></li>   <li>• <b>Mekaanisen kulu- tuksen kestävyys</b></li> </ul>	<p><b>ISO 3347:1976.</b> Wood – Determination of ultimate shearing stress parallel to grain</p> <p><b>ISO 13061-3:2014.</b> Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 3: Determination of ultimate strength in static bending.</p> <p><b>ISO 13061-3&amp;4:2014.</b> Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens</p> <p><b>ISO 3132:1975.</b> Wood – Testing in compression perpendicular to grain.</p> <p><b>ISO 13061-6:2014.</b> Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain.</p> <p><b>ISO 13061-7:2014.</b> Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens – Part 7: Determination of ultimate tensile stress perpendicular to grain</p> <p><b>EN 1534:2011.</b> Wood flooring. Determination of resistance to indentation. Test method</p> <p><b>ISO 3350:1975.</b> Wood – Determination of static hardness.</p> <p><b>ISO 17959:2014.</b> General requirements for solid wood flooring.</p> <p><b>SFS-EN 14342:2014.</b> Wood flooring and parquet. Characteristics, evaluation of conformity and marking. Puiset lattianpäällysteet. Ominaisuudet, vaatimustenmukaisuuden arviointi ja merkintä.</p>	<p><b>ISO 8905:1988.</b> Sawn timber – Test methods -- Determination of ultimate strength in shearing parallel to grain.</p> <p><b>EN 310:1993.</b> Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength.</p>	
---	---	---	--

<p><b>Puumateriaalin kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Tiheys</b></li>   <li>• <b>Tasapainokosteus</b></li> <li>• <b>Hygroskooppisuus</b></li> <li>• <b>Kontaktikulma</b></li>   <li>• <b>Permeabiliteetti</b></li>   <li>• <b>Vesihöyryn läpäisevyys</b></li> </ul>	<p><b>ISO 13061-2:2014.</b> Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests.</p> <p><b>EN 1910:2016.</b> Wood flooring and wood paneling and cladding. Determination of dimensional stability.</p> <p><b>EN 927-5:2007.</b> Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Part 5: Assessment of the liquid water permeability</p> <p><b>EN ISO 12572:2016.</b> Hygrothermal performance of building materials and products. Determination of water vapour transmission properties. Cup method</p>	<p><b>SFS-EN 408:2012.</b> Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties.</p> <p>Puun kosteuden määrittämiseen on useita keinoja. Luotettavana keinona tunnetaan ns. lämpökaappimenetelmä. Siinä puun massa mitataan ensin kosteana, minkä jälkeen puu kuivataan lämpökaapissa absoluuttisen kuivaksi ja massa mitataan uudestaan. Kosteus lasketaan vertaamalla puussa olevan veden massaa absoluuttisen kuivan puun massaan. (Kärkkäinen 2003, 178.)</p> <p>Veden käyttäytymisellä materiaalin pinnalla on merkitystä alustan kostumisen kannalta. Kun vesi levittäytyy tehokkaasti, se kastelee pinnan ja pitää sen kosteana pidempään. Kontaktikulman avulla voidaan vertailla nesteiden käyttäytymistä eri alustamateriaaleilla.</p>	<p>ISO 11890-2:2013 is one of a series of standards dealing with the sampling and testing of paints, varnishes and related products.</p> <p>It specifies a method for the determination of the volatile organic compound (VOC) content of paints, varnishes and their raw materials. This part is preferred if the expected VOC content is greater than 0,1 % by mass and less than about 15 % by mass. When the VOC content is greater than about 15 % by mass, the less complicated method given in ISO 11890-1 may be used. This method assumes that the volatile matter is either water or organic. However, other volatile inorganic compounds can be present and might need to be quantified by another suitable method and allowed for in the calculations.</p>
---	---	---	--

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Emissiot (VOC, formaldehydi yms.)</b></li>   <li>• <b>Äänen absorptio</b></li>   <li>• <b>Lämmön johtavuus</b></li>   <li>• <b>pH</b></li> <li>• <b>Reaktiivisuus</b></li> </ul>	<p><b>EN ISO 11890-2:2013.</b> Paints and varnishes. Determination of volatile organic compound (VOC) content. Part 2: Gas-chromatographic method</p> <p><b>EN 717-1:2004.</b> Wood-based panels. Determination of formaldehyde release. Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method.</p> <p><b>EN ISO 354:2003.</b> Acoustics. Measurement of sound absorption in a reverberation room.</p> <p><b>EN ISO 11654:1997.</b> Acoustics. Sound absorbers for use in buildings. Rating of sound absorption.</p> <p><b>EN ISO 10456:2008.</b> Building materials and products. Hygrothermal properties -Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values (ISO 10456:2007). Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpötekni- sen suunnitteluarvon määrittämiseksi.</p>	<p>pH-mittari on sähköinen mittalaite, joka mittaa happamuuden eli vetyionien aktiivisuuden liuoksessa. Puun normaalista poikkeava pH voi muuttaa puumateriaalin eliöille epäsopivaksi, mutta samalla aiheuttaa esim. voimakasta happohydrolyysiä ja tai kiinnikkeiden korroosiota. Poikkeava pH voi myös muuttaa voimakkaasti puumateriaalin reaktiivisuutta eri kemikaaleihin.</p>	
--	--	--	--



<p><b>Pintakäsittely- ja liima- aineiden käsittelypro- sessi ja niiden toimi- vuus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Liimaus</b></li> <li>• <b>Pintakäsittely</b></li> </ul>	<p><b>SFS-EN 14080:2013.</b> Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements. Puurakenteet. Liimapuu ja liimattu sahatavara. Vaatimukset.</p> <p><b>EN 330:2014.</b> Wood preservatives. Determination of the relative protective effectiveness of a wood preservative for use under a coating and exposed out-of-ground contact. Field test: L-joint method.</p> <p><b>EN 927-6:2006.</b> Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Part 6: Exposure of wood coatings to artificial weathering using fluorescent UV lamps and water.</p> <p><b>EN 927-3:2012.</b> Paints and varnishes. Coating materials and coating systems for exterior wood. Part 3: Natural weathering test.</p>	<p>Quick Ultra Violet eli QUV testi (4 h UV rasitusta, 4 h pimeää kondensiorasitusta, 1 min vesispraytä) ja Cold Check -testi, nopeutettu säärasitus (10 sykliä: 6 h vedessä +23 °C, 16 h pakkasessa -18 °C ja 24 h lämpökaapissa +60 °C)</p> <p><b>EN 839:2014.</b> Wood preservatives. Determination of the protective effectiveness against wood destroying basidiomycetes. Application by surface treatment.</p> <p>Cold test</p>	<p>Maalipinnan säänkestävyyttä voidaan arvioida tutkimalla, tapahtuuko näytteessä säärasituksen vaikutuksesta esimerkiksi kiillon tai värisävyn muutosta, liituuntumista tai maalikalvon halkeilua.</p>
<p><b>Kiinnikkeiden pysyvyys ja korroosio</b></p>	<p><b>EN 1382:2016.</b> Timber Structures. Test methods. Withdrawal capacity of timber fasteners</p> <p><b>ISO 9227:2006.</b> Corrosion tests in artificial atmospheres — Salt spray tests.</p> <p><b>ISO 9087:1998.</b> Wood - Determination of nail and screw holding power under axial load application.</p>		
<p><b>Työstettävyys</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Pintakovuus (Case-hardening)</b></li> </ul>		<p><b>CEN/TS 14464:2010.</b> Sawn timber. Method for assessment of case-hardening.</p> <p>Jos kappaleessa on pintakovuutta, niin se voi aiheuttaa työstettäessä muodonmuutoksia kappaleessa.</p>	<p>Voidaan seurata myös esim. seuraamalla tai mittaamalla terien kulumista tai työstettävän materiaalin pinnankarheutta.</p>

Sivutuotteiden hyödyntäminen ja kierrätys			Muutokset puumateriaalissa voivat muuttaa sivutuotteiden hyödyntämistä esim. MDF- ja lastulevyn valmistuksessa, poltossa, briketöinnissä, pelletöinnissä, kuivikkeena ja katemateriaalina. Ominaisuudet voivat parantua tai muuttua heikommiksi esim. eivät täytä säädösten tai asiakkaan vaatimuksia.
Lopputuotteen LCA, kierrätys ja hävittäminen	<p><b>EN 15603:2008.</b> Energy performance of buildings. Overall energy use and definition of energy rating. Rakennusten energiatehokkuus. Kokonaisenergiantarve ja energialuokitusten määrittely</p> <p><b>EN 15804:2014.</b> Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products. Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt.</p>		



luke.fi

Luonnonvarakeskus  
Latokartanonkaari 9  
00790 Helsinki  
puh. 029 532 6000